



**jtc**



Asociación Española de Fabricantes  
de Maquinaria y Bienes de Equipo  
para la Industria Cerámica





## **Guide Asebec 4.0**

**Projet financé à l'ITC-AICE par:**

*La Generalitat Valenciana à travers l'Institut Valencien pour la Compétitivité des Entreprises (IVACE) et les Fonds Européens FEDER de Développement Régional. Référence du dossier: IMDE40 / 2018/5*

*Traduction et mise en page financées par le Ministère de l'Industrie, du Commerce et du Tourisme à travers de ICEX*

**Collaborateur:**

ASEBEC – Asociación Española de Fabricantes de Maquinaria para la Industria Cerámica

**Auteurs**

Instituto de Tecnología Cerámica (ITC-AICE)

José Gustavo Mallol Gasch

Juan Boix Palomero

Juan Ignacio Cantero Ramis

Margarita García Corcoles

Juan Miguel Tiscar Cervera

Alfredo Beltrán González

Création et mise en page : Digitales Imagen Visual, S.L.

Traduction en français : Thierry Monnot

ISBN 978-84-948373-6-4

**Financé par:**



**GENERALITAT  
VALENCIANA**

**TOTS  
A UNA  
VEU**

**iVACE**  
INSTITUTO VALENCIANO DE  
COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL



**UNIÓN EUROPEA**  
Fondo Europeo de  
Desarrollo Regional

*Una manera de hacer Europa*



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE INDUSTRIA, COMERCIO  
Y TURISMO

**iCEX**

**Collaborateur:**

**Asebec**  
Asociación Española de Fabricantes  
de Maquinaria y Bienes de Equipo  
para la Industria Cerámica

**Spanish Ceramic  
TECHNOLOGY**

**Auteur:**

**jtc**   
AICE





La digitalisation des entreprises est la base de la croissance de notre tissu industriel et de l'interconnexion entre toutes les phases de la chaîne de valeur, du processus de production jusqu'à la vente et aux utilisateurs. C'est une voie qu'il est nécessaire de mettre en place et d'emprunter le plus tôt possible afin de ne pas rester à la traîne dans un cadre global de plus en plus complexe, mouvant et plein d'incertitudes

Au moment d'écrire ces quelques lignes en guise d'introduction au Guide ASEBEC 4.0, force est d'avoir à l'esprit la grave crise économique que nous subissons actuellement en raison de la pandémie de SARS-CoV-2, qui a changé nos vies et qui fait qu'il est nécessaire d'accélérer le développement et la mise en œuvre de processus et technologies qui n'étaient pas suffisamment implantés.

Le Ministère de l'Économie Durable, des Secteurs Productifs, du Commerce et du Travail du Gouvernement de la Communauté Autonome de Valencia (GVA), et, notamment, l'Institut Valencien de la Concurrence Entrepreneuriale (IVACE) misent fermement et durablement sur le développement d'un secteur céramique pionnier dans l'implantation de la stratégie 4.0 et qui intègre la dénommée "4ème révolution industrielle" dans son activité. C'est pourquoi, nous félicitons l'Association des Fabricants de Machines et Biens d'Équipement pour l'Industrie Céramique (ASEBEC) et l'Institut de Technologie Céramique (ITC) pour cette initiative conjointe qui permettra de faciliter le transfert de technologie à haute valeur ajoutée à chacune des étapes du processus de fabrication des usines de céramique, ainsi que leur interconnexion, de manière à ce que les propres fabricants de machines aident les fabricants de carreaux à franchir ce pas indispensable.

L'heure est venue d'agir et, au sein de l'IVACE, nous n'avons pas hésité à répondre à ce besoin vital pour le développement de l'industrie céramique, afin que celle-ci demeure une référence mondiale en matière d'innovation à travers également l'implantation de ces nouvelles technologies, base de la prochaine révolution industrielle.

### **Júlia Company Sanus**

*Directrice de l'Institut Valencien de la Concurrence Entrepreneuriale (IVACE).*

*Ministère de l'Économie Durable, des Secteurs Productifs, du Commerce et du Travail du Gouvernement de la Communauté Autonome de Valencia. GVA.*





En tant que président de l'Association des Fabricants de Machines et Biens d'Équipement pour l'Industrie Céramique (ASEBEC), à mon sens, il est de ma responsabilité d'introduire la lecture de ce GUIDE ASEBEC 4.0 que nous avons développé grâce au support de l'Institut Valencien de la Concurrence Entrepreneuriale (IVACE) au travers des Fonds Européens FEDER de Développement Régional et avec l'aide de l'Institut de Technologie Céramique (ITC), centre pionnier dans l'implantation de la stratégie 4.0 dans l'industrie céramique. Avec ce Guide, nous autres, les fabricants de machines pour l'industrie céramique, nous nous attachons à mettre au service des fabricants de carreaux céramiques un instrument qui les aidera à digitaliser leurs usines et à interconnecter les différentes étapes des processus de fabrication.

Nous nous trouvons dans un environnement soumis à de grandes mutations et dans lequel démonstration a été faite, plus que jamais, de l'importance de l'implantation de technologies innovantes comme l'Internet des Objets (IoT), l'Intelligence Artificielle, le Big Data, le Jumeau Numérique et autres technologies pouvant être consultées dans ce Guide qui, par ailleurs, explique de quelle manière ces technologies peuvent être implantées. S'il y a bien quelque chose que nous avons constaté, c'est que le temps s'écoule rapidement et qu'il faut dorénavant lancer cette nouvelle étape de l'industrialisation céramique. Nous en prenons maintenant le chemin et, en effet, la dernière étude de marché réalisée par l'ITC a mis en évidence, au terme d'une enquête menée auprès de nos entreprises associées, que 38% d'entre elles investissaient ou avaient l'intention de le faire dans la promotion et le développement de l'adoption de l'Industrie 4.0.

Il me reste à remercier l'IVACE et l'ITC pour leur soutien et leur travail, et j'invite l'industrie à se joindre le plus tôt possible à la mise en pratique de tout ce que cet outil, à savoir le GUIDE ASEBEC 4.0, leur apporte.

#### **Juan Vicente Bono**

*Président de l'Association des Fabricants de Machines et Biens d'Équipement pour l'Industrie Céramique*

# Indice

## Chapitre 1

1.1	Qu'est-ce que l'Industrie 4.0?	14
1.2	Processus de transformation vers l'Industrie Céramique 4.0	18
1.2.1	Première étape : Informatisation	22
1.2.2	Deuxième étape : Connectivité.	23
1.2.3	Troisième étape : Visualisation	25
1.2.4	Quatrième étape : Transparence	26
1.2.5	Cinquième étape : Capacité prédictive	28
1.2.6	Sixième étape : Adaptabilité	30
1.3	Structure générale du guide pour la transformation vers l'Industrie Céramique 4.0	31

## Chapitre 2

2.1	Fondements généraux des communications industrielles	34
2.1.1	Niveaux d'automatisation : la pyramide CIM	35
2.1.2	Types de réseaux industriels	39
2.1.3	Typologies de contrôle	40
2.2	Principaux bus et standards de communication	42
2.2.1	Bus de terrain	42
2.2.2	Réseaux LAN industriels	48
	Modbus TCP	49
	Ethernet/IP	50
	EtherCAT	50
	ProfiNET	50
2.3	Nouveaux standards de communication pour l'Industrie 4.0	51
2.3.1	OPC : Open Platform Communications	53
2.3.2	TSN : Time Sensitive Networking	55
2.3.3	IIoT: Industrial Internet of Things	55
2.3.4	MQTT, AMQP et CoAP	60

## Chapitre 3

3.1	Niveaux de contrôle dans l'industrie céramique	64
	Niveau 1 : Contrôle manuel	66
	Niveau 2 : Contrôle automatique des variables de machine	67
	Niveau 3 : Contrôle automatique des variables de produit	67
	Niveau 4 : Contrôle global	68
3.2	Contrôle et automatisation des différentes étapes du processus	69
3.2.1	Préparation de compositions	70
3.2.2	Façonnage	80
3.2.3	Émaillage et décoration	94
3.2.4	Cuisson	102
3.2.5	Classification	109
3.2.6	Situation générale	113

<b>Chapitre 4</b>		
4.1	Outils de visualisation et gestion assistée par ordinateur	116
4.1.1	Systèmes ERP : Enterprise Resources Planning	116
4.1.2	Systèmes de Planification et Séquencement de la Production	118
4.1.3	Systèmes MES/MOM	122
4.1.4	Systèmes GMAO	126
4.2	Le "jumeau numérique"	128
4.2.1	Caractéristiques générales d'un "jumeau numérique"	128
4.2.2	Modélisation numérique du processus céramique	132
4.2.3	Intégration du modèle digital avec le processus de fabrication pour l'obtention du "jumeau numérique"	134
<b>Chapitre 5</b>		
5.1	Généralités	140
5.2	L'Intelligence Artificielle (IA)	141
5.2.1	Champs d'application de l'Intelligence Artificielle	141
5.2.2	Approches de l'Intelligence Artificielle	145
5.3	Le Machine Learning (ML) ou Apprentissage Automatique	146
5.3.1	Systèmes de Machine Learning en fonction du type de supervision	149
5.3.2	Systèmes de Machine Learning selon leur capacité d'apprentissage incrémental	154
5.3.3	Systèmes de Machine Learning selon leur capacité à définir des modèles prédictifs	155
5.3.4	Réseaux de Neurones Artificiels (ANN)	156
5.4	Deep Learning (DL) ou Apprentissage Profond	158
<b>Chapitre 6</b>		
6.1	La standardisation comme moteur de l'Industrie 4.0	162
6.2	Normalisation et "facilitateurs digitaux" dans l'Industrie 4.0	163
6.2.1	Cybersécurité	165
6.2.2	Connectivité	166
6.2.3	Robotique avancée	166
6.2.4	Nouvelles technologies de fabrication	167
6.2.5	Capteurs et internet des objets	168
6.2.6	Cloud computing	168
6.2.7	Intelligence artificielle	169
6.3	Système de gestion pour la digitalisation industrielle	170
6.4	Modèles de gestion et de bonnes pratiques	173
<b>Bibliographie</b>		
Accès à la bibliographie par chapitres		177
<b>Annexe</b>		
Accès externe aux informations de l'entreprise sponsor		





# Chapitre 1: Introduction



'Industrie 4.0, également connue en Espagne sous la dénomination Industrie Connectée, est un concept dont la paternité fait encore débat aujourd'hui. Certains auteurs indiquent que ce concept est né en 2011, lors du Salon d'Hanovre où le Communication Promoters Group of the Industry-Science Research Alliance a présenté sa vision de l'industrie du futur, en décrivant l'intégration de plus en plus étendue des technologies de l'information et des communications dans la production industrielle<sup>1</sup>. D'autres auteurs soutiennent que ce furent plusieurs groupes d'études économiques qui ont commencé à utiliser le terme en 2013<sup>2</sup>, en se référant au changement qui commençait à s'opérer dans l'industrie. Certains documents mentionnent même que c'est le gouvernement allemand<sup>3</sup> qui a proposé cette appellation à l'époque où il définissait un ambitieux programme de soutien pour le renforcement de l'industrie allemande, dont le leadership dans le domaine de l'automatisation industrielle commençait à être menacé par le potentiel des économies émergentes. En tout cas, ce qui ne fait aucun doute, c'est que le terme "4.0" fait allusion à l'impact potentiellement révolutionnaire des tendances industrielles actuelles qui, assurément, sera synonyme de poursuite des trois révolutions industrielles préalables.

## 1.1 Qu'est-ce que l'Industrie 4.0 ?

L'Industrie 4.0, qui dans de nombreux contextes est dénommée quatrième révolution industrielle, devient possible grâce à une série d'actions ou événements qui, ces derniers temps, se sont développés dans le secteur de l'industrie et lui ont permis de s'orienter vers la configuration actuellement connue. Au contraire des trois révolutions industrielles précédentes, la quatrième révolution industrielle ne se décrit pas d'un point de vue historique mais est interprétée au moment où elle se produit (*voir figure 1.1*).

En regardant dans le passé, nous pouvons observer que, depuis la première révolution industrielle née de la mécanisation des moyens de production par l'introduction de la machine à vapeur, de nombreux progrès ont été réalisés pour améliorer les capacités de production et les conditions d'exploitation de l'industrie manufacturière. La deuxième révolution industrielle, marquée par l'électrification des moyens de production, a vu l'apparition des chaînes de montage et, avec celles-ci, le début de la production de masse et le développement de nouveaux matériels et modes de transport. Enfin, la troisième révolution industrielle a eu lieu dans les années 70 avec l'incorporation des systèmes informatiques et des électroniques de contrôle, ce qui a donné lieu au début de l'automatisation des opérations et tâches répétitives.

À l'heure actuelle, les sociétés manufacturières, notamment en Europe et aux États-Unis, doivent faire face à des marchés de plus en plus concurrentiels. Dans un environnement globalisé et dynamique à forte complexité, la prise de décisions doit s'effectuer correctement et avec la plus grande rapidité qui soit pour maintenir la compétitivité à long terme. Malheureusement, la gestion actuelle des opérations des entreprises ne parvient pas à relever ce défi, ce qui peut mettre en danger, dans certains cas, le contrôle de ses noyaux d'activité. En effet, dans de nombreuses occasions, la prise de décisions peut sup-

poser des latences de plusieurs semaines ou mois et les décisions reposent quasiment toujours sur des sensations intuitives plutôt que sur l'analyse d'informations détaillées.

Ainsi par exemple, dans de nombreux cas, les processus de développement de produit établissent des caractéristiques de produit sans avoir préalablement réalisé une analyse détaillée des exigences du client. En d'autres occasions, quand une entreprise prend connaissance d'un nouveau procédé ou technique, il est très compliqué de bouleverser grandement les processus de développement ou de fabrication, les changements que cela implique étant très coûteux en termes de ressources et de temps. Et généralement, nombreux sont les employés et cadres dirigeants qui consacrent une grande partie de leur temps à rechercher et/ou attendre des informations correctes pour prendre des décisions. Il s'agit là de quelques exemples illustrant les plus grandes déficiences actuelles de l'industrie et le potentiel d'une transformation de grande ampleur comme la transformation initiée avec la quatrième révolution industrielle.

L'Industrie 4.0 est également connue en Espagne sous le nom d'Industrie Connectée, suite à l'initiative stratégique du même nom, promue par le Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de la Concurrence et inscrite à l'Agenda pour le Renforcement du Secteur Industriel en Espagne (2014) <sup>4</sup>. Le potentiel économique de l'Industrie 4.0 réside dans sa capacité à accélérer la prise de décisions des entreprises et adapter les processus internes des organisations aux changements de l'environnement. Cela s'applique aussi bien aux processus d'amélioration de l'efficacité dans les différents départements des entreprises (bureaux d'études, opérations de fabrication, services, ventes et marketing) qu'aux modèles d'affaires en général.

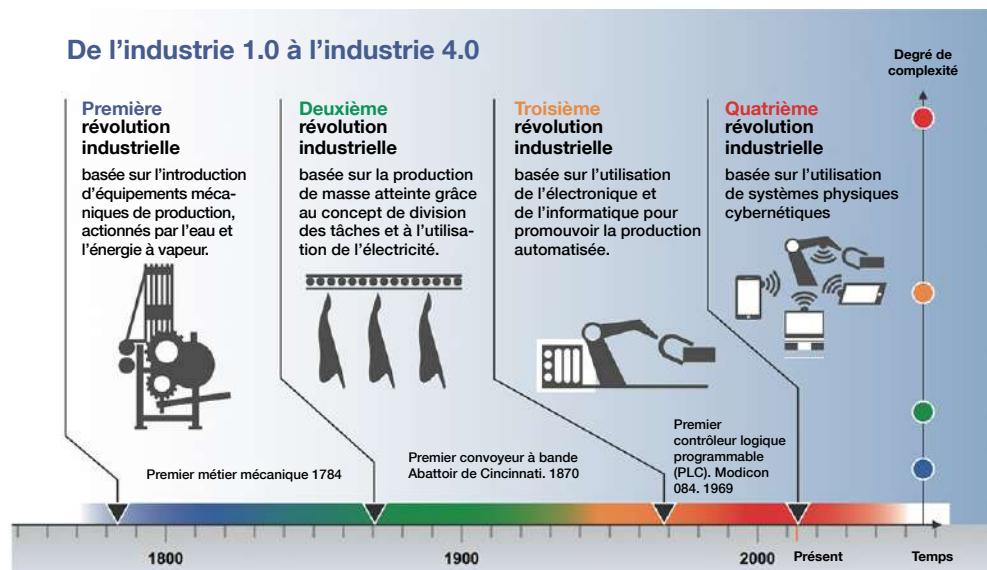


Figure 1.1. Révolutions industrielles tout au long de l'histoire (source: <http://nctech.com.mx>).

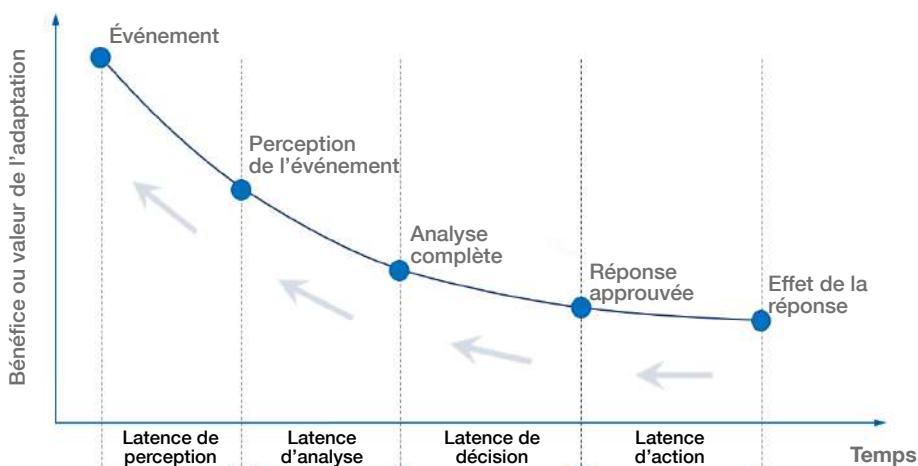


L'Industrie 4.0 peut être ainsi définie comme "un processus de transformation digitale de l'industrie qui permettra une communication multilatérale et une interconnectivité entre les systèmes cyber-physiques et les personnes grâce à la manipulation en temps réel de grands volumes de données". La disponibilité de grandes quantités de données et d'informations, à des prix abordables et en temps réel, permet une meilleure compréhension des relations existantes entre les différents événements qui peuvent avoir un impact sur les processus, en fournissant les bases nécessaires à l'accélération de la prise de décisions.

En s'appuyant sur une bonne structure d'organisation, l'Industrie 4.0 permet aux entreprises de réagir avec une plus grande souplesse sur des marchés progressivement plus dynamiques, réduire les temps de développement de produits plus adaptés aux besoins de leurs clients et lancer ces produits sur les marchés, d'une façon exponentiellement plus rapide. L'interconnexion des composants technologiques, mais surtout de leur structure d'organisation, permet aux entreprises d'acquérir une souplesse qui est un élément clé dans la transformation associée à l'Industrie 4.0.

La souplesse est une caractéristique stratégique qui s'avère de plus en plus importante pour les entreprises à succès. Dans le contexte actuel, la souplesse d'une entreprise fait référence à son habileté à mettre en place des changements en temps réel au sein de ses processus internes, avec des changements systématiques dans ses modèles d'affaires.

Face à des événements pouvant générer des changements dans leurs opérations ou modèles d'affaires, les entreprises doivent nécessairement s'adapter pour pouvoir rester compétitives ([voir figure 1.2](#)). Plus l'adaptation d'une organisation à ces événements sera

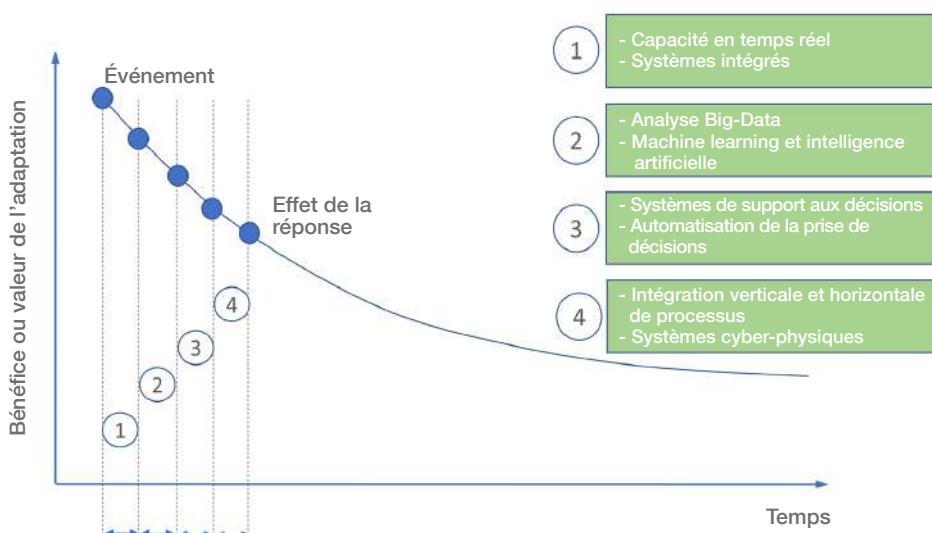


**Figure 1.2** Processus d'adaptation aux changements dans l'environnement (source : Hackathom 2002 ; Muehlen/Sahapiro 2010)

rapide, plus grand sera le bénéfice qui pourra être tiré de cette nécessaire adaptation et, par conséquent, plus l'entreprise pourra en tirer un avantage concurrentiel. Ces événements peuvent être de multiples natures, avec différents degrés d'incidence sur l'activité. Ainsi, par exemple, on pourrait parler d'un événement à court terme en se référant à une panne sur une ligne de fabrication. En revanche, des modifications dans les requêtes des produits fabriqués et, par conséquent, dans leur conception, leur processus de fabrication et dans les processus associés d'approvisionnement, de qualité et de services, seraient des événements à moyen et long terme.

À l'heure actuelle, quand un événement se produit, dès son apparition, il y a inévitablement une série de retards dans sa détection, son analyse et l'application des mesures d'adaptation correspondantes. La cause principale de ces retards réside dans le fait que les informations primordiales ne sont pas suffisamment intégrées pour permettre un traitement complet du début à la fin, depuis la capture de données jusqu'à leur analyse.

Les capacités de l'Industrie 4.0 peuvent aider les sociétés manufacturières à réduire drastiquement la durée entre le moment où se produit l'événement et le moment où sont mises en œuvre les mesures correctives correspondantes ([voir figure 1.3](#)). Pour y parvenir, des technologies habilitantes doivent être déployées et les informations primordiales doivent être accessibles, en supprimant les "îlots d'informations". En même temps, il faut intégrer de nouvelles approches dans la structure et la culture organisationnelles des entreprises afin qu'elles soient prêtes aux changements continus associés à la transformation.



**Figure 1.3** Augmentation du bénéfice associé à une adaptation grâce à l'apprentissage des organisations apporté par l'Industrie 4.0. (source : basée sur FIR e.V. en RWTH Aachen University).



Tous ces concepts qui semblent si éloignés sont actuellement réunis et éprouvés dans différents secteurs industriels. Il existe, par exemple, des machines capables de travailler de façon autonome, en communiquant en temps réel des informations sur leur état de fonctionnement, lesquelles informations peuvent être traitées et analysées pour prévoir des défauts ou pannes et les anticiper pour réduire les temps de réponse et améliorer le rendement des installations. Il est également possible de connaître avec précision la rentabilité de production d'un produit déterminé et de savoir quelles sont les étapes les plus critiques dans son processus de fabrication. Ou de la même manière, et tout simplement, il est possible de savoir si l'organisation de moyens de production est adaptée, comme il se doit, aux besoins de production d'un article déterminé ou si une dépense énergétique précise est justifiée ou pourrait être optimisée. Bien que ces simples exemples illustrent les possibilités qu'offre actuellement la transformation initiée, les mesures mises en place dans de nombreuses entreprises se limitent à des projets pilotes qui, souvent, n'impliquent que des actions de validation technologique. En effet, Henning Kagermann, président d'Acatech, souligne que "*l'hésitante mise en place de l'Industrie 4.0 est due à des structures organisationnelles rigides qui se sont organiquement développées et à une culture conservatrice où les gens n'ont pas la valeur de faire les choses différemment.*"<sup>5</sup> C'est pour cette raison que, nécessairement, le processus de transformation technologique lié à l'Industrie 4.0 doit être accompagné d'une transformation culturelle des organisations pour garantir l'adaptation au nouveau paradigme.

L'objectif final de la transformation vers l'Industrie 4.0 est la création d'entreprises flexibles, s'appuyant sur la connaissance, capables de s'adapter aux conditions changeantes de son environnement grâce à l'utilisation de technologies habilitantes, à la capacité d'apprentissage de la propre organisation et à l'emploi de processus rapides de prise de décisions, exploitant les données de qualité disponibles.

## 1.2 Processus de transformation vers l'Industrie Céramique 4.0

Comme cela a été expliqué dans le point précédent, la tendance actuelle dans les processus de production industrielle est de disposer de systèmes souples et flexibles qui répondront rapidement aux changements constants et autres altérations dans l'environnement de production. Les industries de traitement en général doivent être capables de répondre aux exigences des marchés actuels et des chaînes d'approvisionnement, raison pour laquelle les tendances à la personnalisation de masse, les temps rapides de réponse, les cycles plus courts de vie du produit et l'utilisation efficace de l'énergie et des ressources les obligent à prendre en considération des aspects comme la flexibilité, la souplesse de reconfiguration, la décentralisation et l'intégration de fournisseurs.

De même que dans d'autres secteurs manufacturiers, l'industrie céramique est également confrontée à ce type de défis afin de fournir un degré de contrôle de la production, de supervision et gestion de systèmes qui permettront de satisfaire aux besoins de flexibilité et de réponse rapide des processus de fabrication. À ce jour, dans une fabrique

de céramique, il est quasiment impossible de trouver des systèmes avancés de contrôle comme, par exemple, des systèmes de mesure en continu qui informent les personnes du déroulement des opérations en temps réel ou des systèmes d'alarmes sur l'écart des variables des consignes établies. Même si, à première vue, le processus de fabrication céramique semble automatisé, en réalité, seules la manipulation du produit et quelques étapes isolées le sont, sans que, par ailleurs, les informations s'échangent raisonnablement et avec souplesse entre elles. L'information gérée est manuelle, discontinue, peu élaborée, décalée dans le temps par rapport à la production réelle et, souvent, elle n'est pas analysée parce que sa validité fait l'objet d'une certaine méfiance.

En effet, cette méconnaissance de l'information du processus de production empêche une bonne traçabilité de la production en continu et en temps réel, laquelle traçabilité permettrait de connaître avec exactitude des aspects aussi importants que, par exemple, le coût réel de fabrication d'un carreau céramique, le rendement d'un système dans le processus de production ou la consommation en énergie dérivée de la production d'un lot, entre autres. Et tout ce, sans oublier qu'une exploitation correcte de l'information générée lors du processus de production permettrait d'utiliser des modèles d'affaires avancés afin d'améliorer la compétitivité des entreprises.

Les modèles les plus modernes de contrôle de processus existants parlent du concept de contrôle hiérarchique introduit par le Max Planck Institute. Selon cette théorie, dans toute industrie classique, il est possible de définir six niveaux de contrôle hiérarchisés. Dans une fabrique de céramique actuelle, les niveaux résolus sont le niveau de sécurité des machines (niveau 0), une partie des niveaux 1, 2 et 3, correspondant à l'utilisation de capteurs et actionneurs (niveau 1), contrôle basique (niveau 2) et développement d'interfaces avec l'opérateur et supervision du contrôle (niveau 3). Les niveaux 4 et 5, correspondant à la gestion complète de la fabrique, au contrôle avancé, à la planification de l'activité et de la logistique, en lien avec le processus, sont encore à développer dans de nombreux cas.

Il existe actuellement différentes approches pour mener à bien la transformation digitale des entreprises. Ces approches sont souvent structurées sur la base des initiatives propres à chaque pays. Dans le cas de l'Espagne, l'Initiative Industrie Connectée 4.0 établit<sup>6</sup> un cadre conceptuel d'Industrie 4.0 dont l'application permet de relever une série de défis posés par la digitalisation de la société et de l'industrie. Et tout ce, afin de générer pour les secteurs industriels des opportunités qui leur permettront d'adapter leurs modèles d'affaires, processus, infrastructures et organisation à la nouvelle conjecture.

Les entreprises relevant avec succès les défis posés ([voir figure 1.4](#)) contribuent à créer un modèle industriel dans lequel l'innovation est collaborative, les moyens de production sont connectés et totalement flexibles, les chaînes d'approvisionnement sont intégrées et les circuits de distribution et de service client sont des circuits digitaux. En même temps, ce modèle facilite la gestion d'un produit intelligent, personnalisé et permettant la génération de nouveaux modèles d'affaires.



	De...	Vers...
1 Utiliser des méthodes de collaboration pour renforcer l'innovation	... innovation individuelle et continuiste	... innovation impliquant plusieurs entreprises et clients et de rupture
2 Combiner flexibilité et efficacité dans les moyens de production	... moyens de production pas toujours efficaces et peu flexibles	... moyens de production efficaces, flexibles et intégrant l'intelligence
3 Gérer des tailles de séries et temps de réponse plus courts	... fabrication en série avec des temps de réponse longs	... tirages et temps de plus en plus courts
4 Adopter des modèles logistiques intelligents	... gestion logistique réactive	... gestion logistique intégrée et intelligente
5 S'adapter à la transformation de canaux (digitalisation et omnicanalité)	... canaux traditionnels sans lien	... digitalisation de canaux et gestion omnicanale
6 Exploiter les informations pour anticiper les besoins du client	... réactivité face à la demande	... analyse prédictive des besoins du client
7 S'adapter à l'hyperconnectivité du client	... information limitée et peu diffusée	... information exhaustive et de valeur
8 Gérer la traçabilité multidimensionnelle point par point	... aucun ou peu de suivi et visibilité sur l'élaboration du produit	... transparence dans la traçabilité multidimensionnelle de l'ensemble du processus de production
9 Gérer la spécialisation par la coordination d'écosystèmes industriels de valeur	... chaînes de valeur linéaires	... spécialisation et écosystèmes de valeur
10 Garantir la durabilité à long terme	... faible sensibilisation à la durabilité	... impact environnemental minimisé du processus de production et produit
11 Offrir des produits personnalisés	... produits standards	... personnalisation massive de produits
12 Adapter le portefeuille de produits au monde digital	... produit industriel classique	... évolution digitale du portefeuille de produits

**Figure 1.4.** Défis posés par la digitalisation de la société et l'environnement industriel (source : La transformation digitale de l'industrie espagnole. Rapport préliminaire).<sup>6</sup>



**Figure 1.5.** Cadre conceptuel de l'Industrie 4.0 selon l'Initiative Industrie Connectée 4.0 (source : Outil d'autodiagnostic HADA).

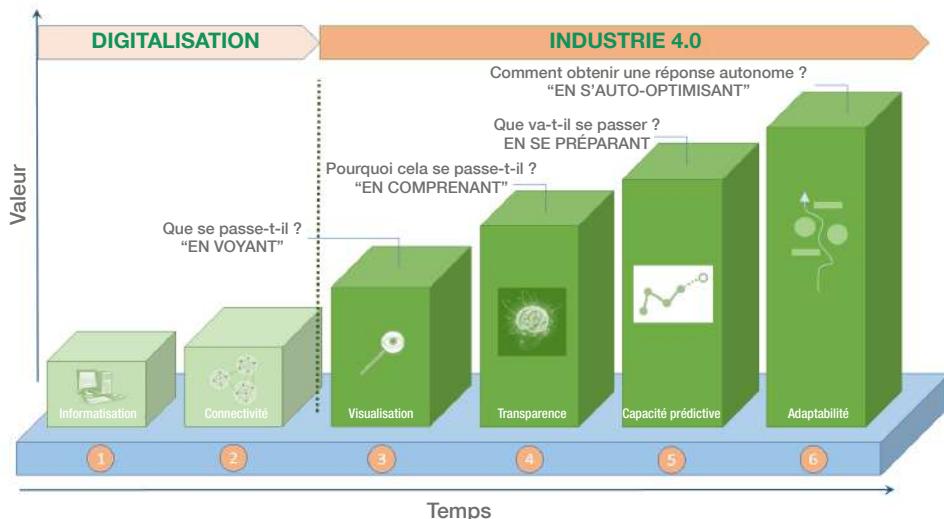
Le cadre conceptuel porté par l'Initiative Industrie Connectée 4.0 ([voir figure 1.5](#)) reflète la façon dont doit être et avec laquelle doit opérer une PME qui s'est transformée en une Industrie 4.0 à un horizon de 5 ans, en envisageant cinq dimensions spécifiques :

- Stratégie d'affaires et marché
- Processus
- Organisation et Personnes
- Infrastructures
- Produits et services

Les outils et concepts propres à l'Industrie 4.0, lesquels, dûment appliqués, permettent le développement d'entreprises flexibles et conscientes du changement, sont relativement simples à appliquer pendant l'implantation de nouveaux modèles d'affaires, entreprises ou processus de production. En revanche, quand une entreprise est bien établie, qu'elle dispose d'un modèle d'affaires consolidé et de marchés à servir, la transformation vers l'Industrie 4.0 doit être graduelle et planifiée. Tel est le cas de la majorité des entreprises de fabrication de carreaux céramiques et des entreprises de production de poudre atomisée, frites et émaux, que ce soit dans le cluster espagnol de la céramique ou dans le reste du monde.

Le cadre conceptuel défini par l'Initiative Industrie Connectée 4.0 est axé sur la transformation globale des entreprises, notamment des PME. Cependant, pour illustrer le processus de transformation vers l'Industrie Céramique 4.0, notamment dans le processus de fabrication dans lequel les associés d'ASEBEC sont les leaders technologiques, nous préférions suivre dans ce guide le modèle établi par l'Académie Allemande des Sciences et de l'Ingénierie (Acatech) ([figure 1.6](#)). L'approche introduite par son modèle conceptuel repose sur la succession de différents états de maturité, lesquels définissent une série de niveaux de développement pouvant servir de guide aux entreprises pendant leur processus de transformation, des requêtes de base de l'Industrie 4.0 jusqu'à l'implantation complète.

Comme cela a été précisé, l'introduction de l'Industrie 4.0 dans un secteur industriel en général, et dans le secteur de la fabrication de carreaux céramiques en particulier, requiert une adéquation significative des compétences et capacités digitales de l'entreprise ainsi que l'introduction de changements dans sa structure d'organisation. Puisqu'il s'agit d'une transformation en profondeur des entreprises, celle-ci s'effectue nécessairement en plusieurs années. Qui plus est, il est particulièrement intéressant de planifier et mettre en œuvre la transformation de manière à pouvoir observer les impacts positifs sur l'organisation, que ce soit au niveau de l'amélioration de l'efficacité ou au niveau de la croissance, lors des différents stades du processus de transformation. En procédant de la sorte, les bénéfices de la transformation sont visibles aux différents stades, ce qui sert d'indicateur pour réaliser un suivi de la réussite globale de l'opération.



**Figure 1.6.** Étapes du développement et de l'implantation de l'Industrie 4.0 (source : FIR e.V. en RWTH Aachen University).

La stratégie de transformation des entreprises doit être appliquée en suivant une approche progressive qui commence par les requêtes de base pour l'Industrie 4.0 et leur sert de base pour que l'entreprise devienne une entreprise flexible, avec une capacité d'auto-apprentissage. Cette approche progressive est structurée en 6 niveaux de développement. Chaque niveau s'appuie sur le précédent et décrit les capacités que doivent posséder les entreprises pour l'atteindre et les bénéfices qui en résultent.

À ce jour, nombreuses sont les entreprises qui doivent encore relever le défi de créer les conditions de base pour pouvoir initier leur transformation vers l'Industrie 4.0. Cela signifie qu'elles se trouvent toujours au stade de la digitalisation. Bien que la digitalisation en soi ne fasse pas partie de l'Industrie 4.0, l'informatisation et la connectivité sont des étapes ou conditions requises pour sa mise en œuvre. Ces deux étapes initiales sont suivies par quatre autres au cours desquelles sont développées les capacités propres à la transformation vers l'Industrie 4.0. (**figure 1.6**)

### 1.2.1 Première étape : Informatisation

Le degré d'informatisation des entreprises de céramique est assez avancé, les ordinateurs étant utilisés pour la réalisation de tâches répétitives, ce qui procure aux entreprises des bénéfices très importants. Ainsi, par exemple, grâce à l'informatisation du design céramique et à l'impression numérique, il est possible de fabriquer des produits céramiques relativement économiques, avec des niveaux de qualité très élevés et des niveaux de précision qui n'auraient pas pu être atteints avec d'autres technologies. Cependant, il est également vrai que dans le processus de fabrication, il est encore possible de trouver un

nombre significatif de machines dotées d'interfaces digitales très limitées, voire qui n'en possèdent pas. Ceci est particulièrement urgent sur les équipements d'une très longue vie utile ou sur les éléments de production dédiés uniquement à la manipulation et à la mise en mouvement de pièces.

Le besoin de hausser le niveau d'informatisation dans l'industrie céramique pourrait, par exemple, s'appliquer à une ligne de façonnage, séchage et décoration de supports de carreaux. Bien que des opérations répétitives soient exécutées sur chaque partie de cette ligne, avec un haut degré de précision et d'automatisme, grâce à l'utilisation, dans la majorité des cas, de systèmes informatiques de contrôle, à ce jour, les informations relatives à la "recette" de travail et/ou l'ordre de fabrication doivent être transférées aux équipements manuellement. Autrement dit, les machines ne sont pas connectées. Ainsi, un premier pas dans le processus de transformation de l'industrie céramique serait la suppression du travail sur papier, lequel devrait être remplacé par un système de gestion de l'information qui traiterait, de façon entièrement digitalisée, les informations actuellement enregistrées manuellement sur papier.

Autre exemple plus général : les applications d'affaires et/ou de gestion qui ne sont pas connectées aux systèmes ERP de l'entreprise. Cet état de fait peut conduire facilement à des situations dans lesquelles les contrôles de qualité propres à un système de garantie de qualité génèrent des données qui ne sont pas correctement associées aux ordres de fabrication ou aux références d'article, ce qui pose ensuite des difficultés pour l'exploitation des résultats.

### **1.2.2 Deuxième étape : Connectivité.**

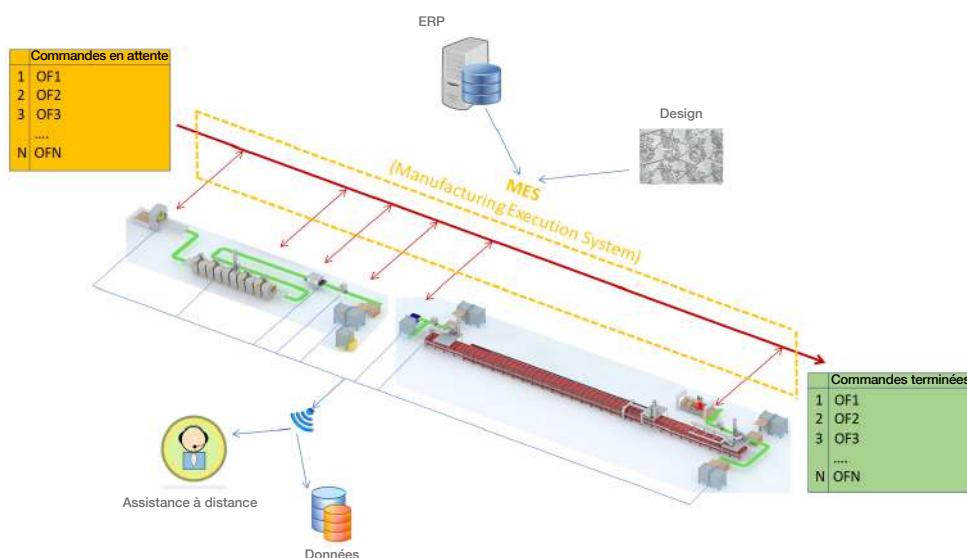
Lors de cette étape dite de connectivité, les déploiements isolés de systèmes informatiques sont remplacés ou intégrés dans des éléments ou systèmes connectés. Les applications d'affaires utilisées par les entreprises de céramique sont, dans leur grande majorité, connectées entre elles, ce qui permet de refléter de façon centralisée le noyau des processus d'affaires de ces entreprises. En revanche, au niveau des processus de production, cette connectivité est beaucoup plus limitée et les différentes étapes de fabrication sont des îlots d'informations ne partageant pas d'informations entre eux. Nous pouvons dire que la majorité des technologies d'exploitation existant dans les fabriques de céramique apportent une connectivité et un certain degré d'interopérabilité, mais l'intégration entre les systèmes informatiques et les technologies d'exploitation n'a pas encore eu lieu.

Le Protocole d'Internet (IP) est de plus en plus utilisé dans les entreprises de céramique, y compris au niveau de l'atelier de production. Du fait que la version actuelle du protocole IPv6 permet un nombre d'adresses de réseau beaucoup plus important que son prédecesseur (le protocole IPv4), tous les éléments des systèmes de production peuvent être connectés sans qu'il soit nécessaire de traduire les adresses de réseau (NAT, de l'anglais, Network Address Translation), ce qui constitue un point clé pour ce qui est connu sous l'appellation "Internet des objets".<sup>7</sup>



Atteindre l'état de connectivité dans une fabrique de céramique signifierait, par exemple, qu'au moment où un projet est créé et validé, les données correspondant à ce projet seraient envoyées à la production afin que, une fois ces données complétées par celles correspondant à l'article et aux besoins, les étapes de production se dérouleraient pour l'obtention d'un ordre de fabrication déterminé. Au cours du processus de production, au terme de chacune des étapes, une confirmation de fin serait générée et envoyée automatiquement en temps réel à travers un système d'exécution de la production (MES, Manufacturing Execution System). De la même manière, la connectivité permettrait de réaliser des assistances à distance de machines et équipements qui seraient utilisés dans les installations des clients, grâce à la disponibilité de connexions à haut débit à des prix accessibles ([voir figure 1.7](#)).

Il est intéressant de souligner que, comme dans d'autres secteurs industriels, il est habituel de trouver sans le secteur céramique des actifs industriels qui sont maintenus en production tant qu'ils seront capables de fabriquer des produits possédant les qualités exigées par le marché. Ainsi, il n'est pas difficile de trouver dans les fabriques des équipements fonctionnant depuis plus de 25 ans, dont la productivité est toujours élevée pour certains produits, mais offrant une connectivité très limitée. Ceci étant, actuellement, grâce à la connectivité fournie par le Protocole d'Internet et à la captation, il est relativement facile d'obtenir des données de production issues de ces actifs industriels.

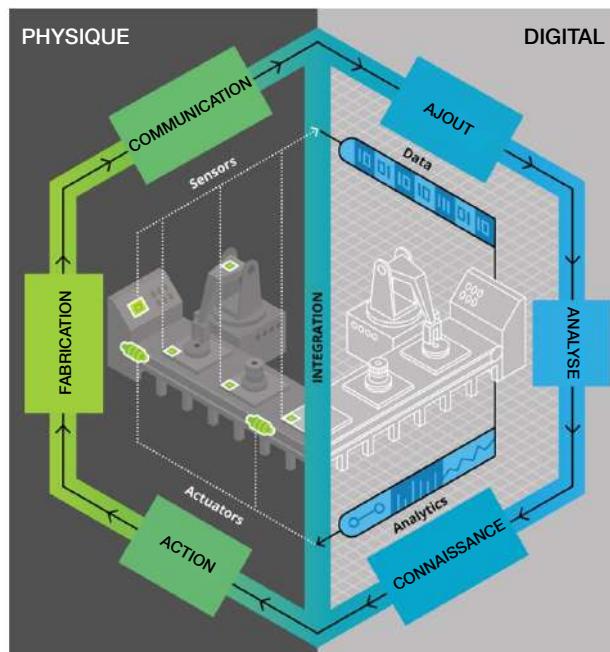


**Figure 1.7.** Connectivité dans la fabrique lors du processus de fabrication de carreaux céramiques.

### 1.2.3 Troisième étape : Visualisation

Le degré actuel de captation des processus industriels permet la capture de données du début à la fin, avec un grand nombre de points d'acquisition. De plus, les technologies disponibles offrent la possibilité d'enregistrer en temps réel tous les événements et états du processus de production, au-delà de la capture de quelques variables de processus dans certaines étapes de production, comme cela était réalisé jusqu'à présent. Cela offre la possibilité de disposer à tout moment d'un modèle numérique actualisé de la fabrique, lequel est généralement connu sous le nom de "jumeau numérique" ou "double numérique" (digital twin ou digital shadow) (**figure 1.8**). Ce "jumeau numérique" aide à savoir ce qu'il se passe en temps réel, soit dans le processus de production, soit au sein de l'entreprise, si ce jumeau est étendu à tous les départements de l'entreprise. L'intérêt de disposer d'un "jumeau numérique" réside dans le fait de pouvoir effectuer une gestion des décisions sur la base des informations générées à partir de données réelles.

L'obtention d'un "jumeau numérique"<sup>8</sup> dans une entreprise de céramique est un véritable défi, du fait, essentiellement, que les informations sont décentralisées en différents îlots de données, en l'absence, dans de nombreux cas, d'une unique origine valide. Qui plus est, surtout dans les processus de fabrication et de logistique, la quantité d'informations est souvent limitée et leur visualisation est restreinte à un certain nombre d'em-



**Figure 1.8.** Intégration entre le "jumeau numérique" et le monde physique (source : Deloitte University Press).



ployés ayant la capacité d'accéder à ces informations ou de comprendre les systèmes dans lesquels elles sont stockées. Tel serait le cas, par exemple, des variables de processus relatives aux opérations de pressage, lesquelles résident dans la machine même et ne peuvent être consultées au pied de la machine que par les opérateurs et le personnel du département de façonnage. Autrement dit, d'une certaine manière, l'usage étendu des informations dans les entreprises n'est pas possible du fait des limites mêmes de contour des systèmes. Cependant, pour atteindre l'objectif de transformation vers une entreprise flexible, il est indispensable pour les entreprises de parvenir à mettre en place une capture globale de données, laquelle est essentielle pour pouvoir générer des informations importantes sur les opérations des installations et de l'activité.

Par exemple, un niveau de visualisation adéquat permettrait de définir avec une plus grande précision les délais de livraison et de déterminer de quelle façon ceux-ci sont impactés par un problème particulier grâce à l'utilisation d'indicateurs et de rapports en temps réel. L'utilisation de cette information permettrait aux responsables de production d'ajuster la planification et, de la sorte, les clients et les fournisseurs pourraient être informés des changements survenus.

L'obtention de ce troisième niveau, qui marque le début de la transformation vers l'Industrie 4.0 proprement dite, requiert, sans nul doute, un changement de mentalité des entreprises<sup>9</sup>. Ce qui est primordial, bien plus que le fait de collecter des données pour procéder à une certaine analyse ou appuyer le développement de certaines opérations, c'est de faire en sorte que les données doivent permettre de créer un modèle actualisé, à tout moment, du processus de fabrication ou, dans le meilleur des cas, de l'activité complète, qui ne soit pas lié à l'analyse individuelle de données concrètes.

Pour une entreprise de céramique, la combinaison des sources d'information actuelles, avec les données fournies par de nouveaux capteurs installés sur site et l'intégration des systèmes ERP et MES donnera une image complète de l'état des opérations, ce qui donnera de la visibilité sur la situation de l'entreprise. Cette intégration, combinée à l'utilisation d'applications modulaires et d'applications mobiles, contribuera à obtenir une seule source d'informations pour la gestion des opérations.

#### 1.2.4 Quatrième étape : Transparence

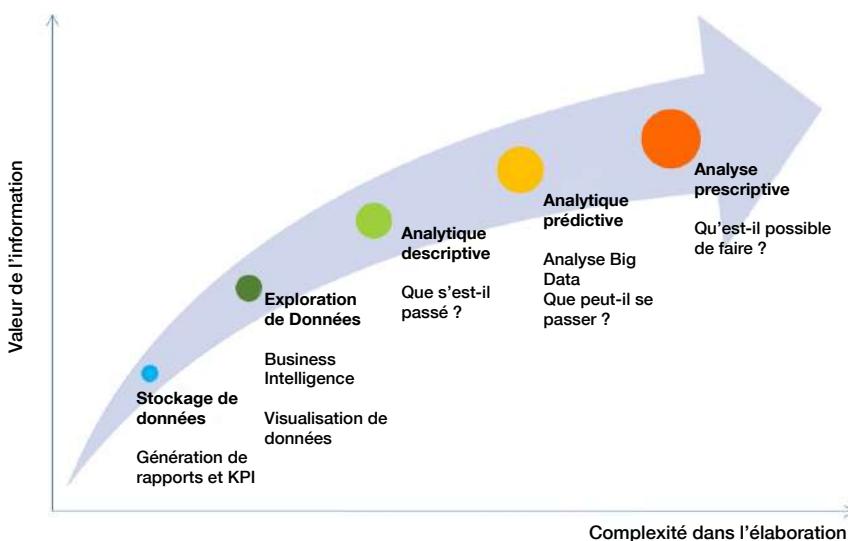
Comme expliqué précédemment, se hisser à la troisième étape dans le processus de transformation suppose de disposer d'un "jumeau numérique" qui reflétera la situation de l'entreprise à tout moment. L'étape suivante supposerait d'utiliser ce "jumeau" pour comprendre les motifs pour lesquels se produisent les événements et d'utiliser ce processus de compréhension pour générer de la connaissance à partir de l'analyse casuistique. Afin d'identifier et d'interpréter les interactions sur le propre "jumeau numérique", les données capturées doivent être analysées en appliquant des outils et techniques propres à l'ingénierie des processus. L'exploitation des données, pour ajouter des informations et la contextualisation correspondante dans l'écosystème industriel, permet de connaître le

processus requis pour faciliter la prise de décisions, pour que celle-ci soit plus rapide et efficace, y compris quand les décisions à prendre présentent une forte complexité.

En ce sens, les nouvelles technologies habilitantes qui permettent d'analyser de grands volumes de données peuvent être d'une grande aide. En effet, le Big Data est un terme très en vogue, fréquemment utilisé dans ces contextes et faisant référence aux grandes quantités de données qui ne peuvent être traitées et analysées à l'aide d'outils classiques pour l'analyse de processus d'affaires. Ainsi, le terme Big Data s'utilise également pour se référer aux technologies et applications permettant l'exploitation de ces quantités de données si importantes et, généralement, hétérogènes.

En général, les applications de Big Data sont développées parallèlement aux applications de gestion d'affaires comme les ERP ou MES. Elles offrent une plateforme commune où il est possible, par exemple, d'effectuer des analyses statistiques qui permettent de révéler les interactions entre les actions et événements reflétés dans le "jumeau numérique".

Cette transparence atteinte au quatrième niveau de la transformation peut être utilisée pour effectuer une surveillance avancée des conditions de fonctionnement des différents équipements et machines d'une usine. Les paramètres capturés d'un équipement peuvent être analysés en continu, dans une recherche de liens et dépendances, que ce soit avec les paramètres d'autres équipements ou avec la qualité des produits fabriqués. Et tout ce afin de générer des informations ajoutées qui refléteront avec précision les conditions d'exploitation des actifs industriels et qui serviront de base aux actions de maintenance préventive ([voir schéma de la figure 1.9](#)).



**Figure 1.9.** Utilité des techniques d'analyse Big Data dans le contexte de la transformation vers l'industrie 4.0.



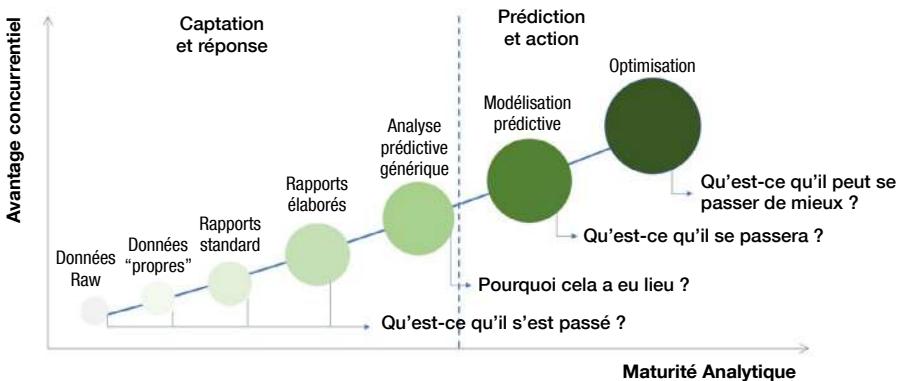
Étant donné les requêtes particulières en matière de qualité et de finition esthétique qu'exigent les produits céramiques, dans une fabrique de carreaux, le niveau de transparence du processus de fabrication sera particulièrement axé sur la mise en place et la connaissance des rapports existants entre les variables de processus et les propriétés du produit final. Bien que ces rapports soient connus depuis de nombreuses années, il n'y a jamais eu d'analyse de ces rapports en temps réel dans des conditions industrielles de fabrication. Ainsi, par exemple, même si nous savons que la densité apparente des supports récemment pressés influe sur les dimensions finales des produits grésifiés, la transparence actuelle dans le processus ne permet pas, à la fin d'un lot de production, d'établir le rapport direct entre ces deux variables. Il se passe quasiment la même chose avec d'autres variables de processus. À titre d'exemples, nous pourrions mentionner le rapport existant entre l'humidité de la poudre atomisée et la propre densité apparente, le rapport entre la courbure des pièces en sortie de four et les conditions de cuisson ou l'influence des conditions de cuisson et/ou d'application d'email sur la tonalité du produit.

Pour parvenir à cette transparence qui permettra de connaître précisément le rapport existant entre les variables critiques du processus de fabrication céramique, il est considéré qu'il est indispensable de disposer d'un processus adéquatement tracé. En assurant la traçabilité des produits, il est possible d'établir des rapports évidents entre leurs propriétés (tonalité, dimensions, courbure, défauts etc.) et leur passage par les différentes étapes de fabrication. Dans le cas contraire, il est très compliqué d'établir des liens de causalité entre les différents événements survenus lors des différentes étapes de production en ne connaissant pas, avec certitude, l'impact de celles-ci sur le produit fabriqué. Pour prendre un exemple du niveau de transparence qui peut être atteint dans le processus céramique, en disposant d'une traçabilité par unité de produit, il est même possible de mettre en relation les défauts détectés par les dispositifs de vision artificielle sur des pièces en particulier, avec leurs conditions de traitement et/ou l'état de fonctionnement de l'équipement.

### 1.2.5 Cinquième étape : Capacité prédictive

En s'appuyant sur les outils mis en place avec l'introduction de l'étape de transparence, il est possible de développer le niveau suivant basé sur le fait de doter les différents processus de l'entreprise d'une capacité prédictive, et notamment le processus de production. Après avoir atteint les étapes relatives à ce cinquième niveau, l'entreprise est capable de simuler différents scénarios futurs et de choisir les plus intéressants. Cela suppose de projeter dans le futur le "jumeau numérique" ([voir figure 1.10](#)) afin de prédire une série de scénarios éventuels qui seront privilégiés après avoir évalué les probabilités selon lesquelles ils peuvent se produire. Avec ces prédictions, les entreprises sont capables d'anticiper d'éventuels événements et d'accélérer leurs processus de prise de décision et la mise en place de mesures correctives.

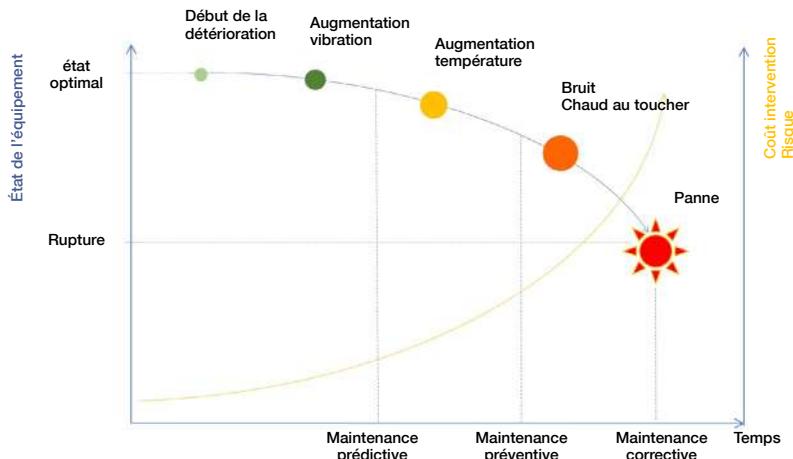
Bien que, à ce stade, les mesures d'action contre des événements et imprévus s'effectuent toujours manuellement, la plus grande souplesse obtenue dans la prise de décisions apporte une amélioration substantielle dans les temps d'exécution, des phases de



**Figure 1.10.** Lien entre les étapes de transparence (captation et réponse) et de capacité prédictive (prédiction et action) par la projection dans le futur des données acquises dans le “jumeau numérique”.

conception et/ou planification jusqu'à l'expédition du produit final. De plus, grâce à l'anticipation apportée par la capacité prédictive, la réduction d'événements imprévus comme, par exemple, des interruptions de production ou des changements dans la planification, contribue grandement à améliorer la solidité des opérations des fabriques et, avec cela, de l'activité en général. Tel serait le cas de la prédiction d'une panne grave comme peut l'être la rupture d'un multiplicateur de pression sur une presse hydraulique dont la réparation ou le remplacement anticipé peut être beaucoup moins grave pour l'entreprise qu'un arrêt non prévu de la ligne de fabrication, sur plusieurs jours.

Le cas de la maintenance prédictive ([figure 1.11](#)) est l'exemple le plus utilisé pour se référer à l'étape de capacité prédictive dans le cadre du processus de transformation vers l'industrie 4.0.



**Figure 1.11.** Reducción de costes asociada a un mantenimiento predictivo de fallos en un equipo productivo.



Cependant, la capacité prédictive devrait être étendue à tous les domaines des entreprises et dans le secteur céramique, particulièrement dans les départements de processus de manufacture. En effet, à ce jour, de multiples imprévus surviennent au cours du déroulement habituel des opérations en usine ; des imprévus qui, avec une instauration adéquate des capacités prédictives, pourraient être détectés ou anticipés avant qu'ils ne surviennent. Tel serait le cas de la problématique associée à la variabilité de la tonalité du produit, laquelle est susceptible d'être étudiée du point de vue de l'analyse prédictive puisque l'analyse en temps réel de données de processus relatives à la décoration et au traitement du produit, sur la base de modèles définis à l'étape de transparence, pourrait anticiper la fluctuation des propriétés chromatiques du produit final.

Il est important de souligner que le degré de capacité prédictive atteint par une entreprise dépend grandement du travail de base préalablement réalisé lors de la mise en œuvre des niveaux antérieurs de l'Industrie 4.0. Un "jumeau numérique" correctement appliqué ainsi qu'une connaissance spécifique des interactions pouvant exister dans les processus de l'entreprise sont indispensables pour garantir que les prédictions et les recommandations d'intervention qui en découlent seront de la plus haute qualité.

#### **1.2.6 Sixième étape : Adaptabilité**

La capacité prédictive atteinte lors du niveau précédent est fondamentale pour pouvoir automatiser les actions d'une entreprise et les processus de prise de décisions. Afin de garantir une adaptation continue des entreprises dans un environnement en perpétuelle évolution, il est nécessaire de déléguer certaines décisions à des systèmes informatiques capables d'adapter le plus rapidement possible, à partir de la prédiction préalable de scénarios, les opérations de l'entreprise.

Le degré d'adaptabilité qui sera atteint dans le processus de transformation dépendra de la complexité des décisions à prendre et des éventuels bénéfices qui seront apportés. Ainsi, dans de nombreux cas, il sera préférable d'automatiser uniquement des processus individuels, comme pourrait l'être la planification de la production. Dans d'autres cas, à savoir des opérations plus générales mais impliquant la réalisation répétitive de certaines actions, cela vaudrait la peine, au minimum, d'évaluer la possibilité de les doter d'une certaine autonomie. Mais dans tous les cas, il est primordial de toujours évaluer le risque que supposerait l'automatisation d'approbations et d'avis pour les clients et fournisseurs, puisque cela pourrait devenir contreproductif. Par exemple, dans certains cas, il conviendra que la séquence d'ordres de fabrication planifiés puisse être automatiquement modifiée sur la base de prédictions d'une panne ou pour éviter des retards dans certaines commandes de production. Cependant, il peut arriver qu'il ne soit pas pertinent d'informer un client du retard d'une commande.

Ce qui est sûr, c'est que ce sixième niveau de la transformation vers l'Industrie 4.0 peut être celui qui pose le plus de difficultés pour sa mise en œuvre, surtout dans le secteur de fabrication de carreaux céramiques. En tout cas, nous pouvons dire que l'objectif principal

de cette dernière étape d'adaptabilité aura été atteint dès lors que l'entreprise sera capable d'utiliser les données de son "jumeau numérique" pour prendre le plus rapidement possible des décisions qui, à leur tour, apporteront les meilleurs résultats qui soient. Et tout ce, grâce à l'introduction d'actions correctives qui devront être mises en place, dans la mesure des possibilités, automatiquement et sans intervention humaine.

Un exemple simple de cette adaptabilité pourrait une régulation automatique du processus de cuisson de produits grésifiés à partir de mesures des propriétés du produit cuit en sortie de four et de l'anticipation apportée par l'analyse des conditions de façonnage des supports. Dans une première approche, les données du "jumeau numérique" sur les conditions de façonnage pourraient être utilisées pour prédire différents scénarios en sortie de four et faire part de quelques recommandations pour une cuisson optimisée du matériau. En même temps, grâce au suivi en temps réel des propriétés du produit cuit, ces recommandations pourraient être validées ou adaptées pour garantir que la production ait lieu dans le respect des meilleurs standards de qualité lors de la fabrication de lots successifs du même matériau. À un stade plus avancé, ces recommandations pourraient même être automatiquement transmises au système même de contrôle du four afin de ne pas avoir à recourir, à priori, à une assistance humaine, les opérateurs étant uniquement dédiés à un rôle de supervision. Cet exemple, relativement simple, peut se complexifier si s'ajoutent des variables pouvant avoir une incidence non seulement sur les propriétés du produit mais également sur les opérations de l'entreprise.

### **1.3 Structure générale du guide pour la transformation vers l'Industrie Céramique 4.0**

Le projet ASEBEC 4.0 vise à mettre en œuvre une plateforme Web issue de la collaboration entrepreneuriale entre plusieurs sociétés membres de l'Association. Cette plateforme structure et centralise les adaptations que doivent expérimenter les industries de production de carreaux céramiques, ainsi que les fabricants de biens d'équipement, pour permettre la transformation digitale de l'industrie manufacturière de carreaux céramiques.

Pendant des décennies, le processus de fabrication de carreaux céramiques a démontré son efficacité dans la fabrication de la plupart des produits. Cependant, à l'heure actuelle, il existe de nouveaux défis qui requièrent d'autres façons de faire les choses. La nécessité de fabriquer de nouveaux produits, en maintenant les standards de qualité et en réduisant les coûts de fabrication, la globalisation de la technologie actuelle, en introduisant de nouveaux acteurs comme les pays émergeants, l'intégration de nouvelles technologies permettant la digitalisation complète de la fabrique, font qu'il est nécessaire de se pencher sur la configuration d'une nouvelle fabrique du futur pour la production de carreaux céramiques.

Quelques-uns des défis que devrait relever la nouvelle fabrique du futur sont la fabrication de produits de grands formats, la différenciation des produits par rapport à la concurrence, l'intégration de nouvelles techniques de décoration, le revêtement de nouvelles surfaces, etc., et tout cela en maintenant la qualité du produit final, à des coûts contenus



et avec un impact environnemental réduit. Les fabricants espagnols de machines et biens d'équipement pour l'industrie céramique, membres de l'ASEBEC, souhaitent jouer un rôle important dans ce processus d'automatisation et de digitalisation des fabriques de céramique. Les machines qu'ils proposent à leurs clients doivent être prêtes à relever ce défi. ASEBEC 4.0 est un projet qui vise à mettre en service une plateforme collaborative pour montrer aux fabricants de carreaux céramiques quelles sont les modifications qu'ils doivent apporter à leurs machines et environnements de production, quels sont les systèmes de contrôle qu'ils doivent mettre en place et quelles sont les informations qu'ils ont besoin de connaître en temps réel pour transformer leur fabrique actuelle en une fabrique intelligente, parfaitement alignée sur le concept de l'Industrie 4.0.

Pour ce faire, il est tout d'abord indispensable de réaliser une série d'analyses de besoins qui permettront de générer les informations qui alimenteront la plateforme. Parmi ces analyses de besoins, les points les plus importants à traiter sont :

- Définition des variables d'exploitation et de contrôle critiques.
- Identification de la situation actuelle de l'art en technologies de capture de données.
- Identification des besoins d'interconnexion et de digitalisation des différents éléments de production.

Sur la base de ces informations, la plateforme apporte, comme fonctionnalités les plus significatives, d'une part, des informations sur les systèmes de contrôle existants et à développer au sein de chacune des étapes de fabrication et, d'autre part, des informations sur les systèmes d'intégration de l'information et les dispositifs de contrôle automatique du processus de fabrication.

Avec le développement de la plateforme, qui supposera une collaboration des différents acteurs du secteur céramique, le projet impliquera également une importante avancée dans la connaissance de l'Industrie 4.0 pour l'environnement de l'ASEBEC. En effet, la structuration même des informations requises pour la mise au point de la plateforme, ainsi que le développement de nouveaux systèmes d'information, de contrôle et de traitement, pensés comme des solutions déjà établies ou générées après définition de la plateforme, permettront d'étendre la "culture" de l'Industrie 4.0 à l'ensemble du cluster céramique.



# Chapitre 2: Infrastructure



**A**près avoir présenté les généralités de l'industrie 4.0 et le cadre conceptuel autour duquel les entreprises de céramique peuvent axer leur processus de transformation, ce chapitre décrit les différents éléments de communication permettant d'atteindre le deuxième niveau de la digitalisation : la connectivité ([lien avec la figure 1.6](#)). Pour cela, nous présenterons les principes fondamentaux des réseaux de communication, lesquels constituent les infrastructures à travers lesquelles les différents systèmes informatiques établis dans la première étape de la transformation vont pouvoir communiquer entre eux. Nous présenterons ensuite les principaux types de bus de terrain existant dans le monde industriel et à travers lesquels les équipements industriels peuvent fournir des données, en exposant de façon résumée leurs caractéristiques, avantages et inconvénients. Enfin, nous nous attacherons à présenter les protocoles de communication les plus répandus au niveau industriel et les concepts de base s'y rapportant.

## 2.1 Fondements généraux des communications industrielles

L'intercommunication entre les différents éléments d'un écosystème industriel s'effectue à travers les réseaux de communication de données. Pour connaître l'état d'un système de production, il existe de nombreux dispositifs de terrain (capteurs de température, de pression, verrouillages de sécurité, compteurs, débitmètres, photocellules, etc.) qui transmettent des informations aux systèmes de contrôle et aux opérateurs de l'installation. L'utilisation de ces informations permet de maintenir les processus industriels dans des conditions optimales d'exploitation, afin de maximiser leur productivité, et à des niveaux de sécurité adéquats, que ce soit pour le personnel travaillant dans les fabriques ou pour l'environnement des installations.

Les processus industriels, en général, et le processus de fabrication de carreaux céramiques, en particulier, comptent généralement différentes étapes dont la surveillance et le contrôle sont automatisés, ce qui donne lieu à la constitution d'une série d'"îlots d'automatisation" entre lesquels il n'est pas indispensable qu'il ait une communication pour que le processus puisse s'exécuter. Exemple de cette "isolement" entre les étapes : le processus de fabrication de carreaux céramiques, au cours duquel l'étape d'atomisation est séparée du reste du processus de fabrication à tel point que, souvent, la production de la poudre atomisée est externalisée et réalisée par des entreprises extérieures.

Pour la transmission des informations à travers les réseaux de communication au sein d'un processus de production, des règles sont utilisées, à savoir des règles qui permettent le transfert et l'échange de données de façon structurée et standardisée. Ces standards de communication sont dénommés protocoles de communication.

En général, deux typologies de réseaux se distinguent dans les environnements industriels, même si, comme cela sera expliqué par la suite, les protocoles de communication à employer pour la transmission de données à travers ceux-ci peuvent être communs.

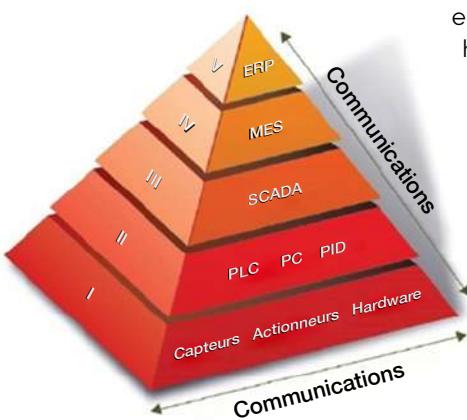
C'est ainsi que, d'une part, on parle habituellement de réseaux ou bus de terrain en se référant aux structures de réseau les plus proches du processus. Ces réseaux sont conçus pour supporter un trafic de données constitué d'une grande quantité de petits paquets d'informations, travaillant généralement en temps réel, et sont généralement utilisés pour interconnecter des PLC, des PC, des capteurs ainsi que des éléments primaires de mesure. De plus, il s'agit de réseaux qui doivent résister à un environnement généralement hostile où il existe une grande quantité de bruit électromagnétique et des conditions environnementales sévères.

Par ailleurs, il faut distinguer les réseaux d'informations (LAN (Local Area Network)/ WAN(Wide Area Network)) qui sont axés sur le transport et l'échange de gros paquets de données et, de ce fait, ils requièrent des débits bien plus importants pour garantir un envoi rapide des informations. Par conséquent, ces réseaux s'utilisent pour l'échange d'un gros volume d'informations avec des temps de réponse pas nécessairement critiques, au contraire de ce qui se produit généralement en terrain. Les PC et serveurs sont typiquement les éléments qui sont généralement connectés au moyen de ces réseaux.

### 2.1.1 Niveaux d'automatisation : la pyramide CIM

Les réseaux de communication de données dans le cadre des processus industriels sont structurés sur la base de ce que nous connaissons comme les niveaux d'automatisation du processus. Pour la définition des niveaux d'automatisation, le modèle CIM (Computer Integrated Manufacturing) établi par le National Bureau of Standards des États-Unis en 1981<sup>10</sup> est actuellement reconnu au niveau mondial.

Ce modèle est un des plus répandus pour structurer la distribution des réseaux de communication, selon l'objectif pour lequel ils ont été conçus et mis en place, en prenant en considération la fabrique dans son ensemble et en divisant les actions de contrôle en différents niveaux hiérarchiques en fonction de leur fonctionnalité<sup>11</sup>.



**Figure 2.1.** Niveaux d'automatisation selon la pyramide CIM  
(Source : <http://www.autracen.com/la-piramide-cim/>).

Dans la pyramide CIM (voir figure 2.1), chaque niveau développe des tâches spécifiques associant un type de données et un traitement d'informations différents. La hiérarchie d'un réseau de communication précis est déterminée par le niveau de contrôle auquel il appartient, en commandant les fonctions du niveau inférieur et en servant d'interface pour le niveau supérieur. Cela permet de garantir que le flux d'informations sera établi, que ce soit horizontalement (à un même niveau) ou verticalement (vers un niveau supérieur ou inférieur).



La structure CIM permet de définir les niveaux suivants, au sein d'un réseau de communications industrielles. La définition des caractéristiques de la pyramide CIM pour un processus déterminé devrait être effectuée en mode "top-down" (de haut en bas). En revanche, la mise en œuvre doit être nécessairement "bottom-up" (de bas en haut), raison pour laquelle il est préférable d'introduire les niveaux dans ce dernier sens :

#### Niveau 1 : Contrôle de processus

Il s'agit du niveau d'acquisition de données de terrain ou instruments et, par conséquent, celui le plus proche du processus de fabrication. C'est à ce niveau que se situent les capteurs et actionneurs de l'équipement de la fabrique et des lignes de production, lesquels permettent d'exécuter le processus de production et de procéder au relevé de mesures pour une bonne automatisation et surveillance. Généralement, à ce niveau, les communications s'effectuent à l'aide de systèmes de câblage classiques, même si certaines industries commencent à utiliser des bus de terrain aux performances simples. À ce niveau, une fabrique de céramique serait dotée des éléments primaires de mesure comme des thermocouples sur les fours de cuisson, des capteurs de pression sur les presses de façonnage ou des capteurs de niveau dans les silos de stockage, pour ne citer que quelques exemples.

#### Niveau 2 : Contrôle de terrain

À ce deuxième niveau sont regroupés tous les contrôleurs locaux comme les ordinateurs, PLC, contrôleurs PID, etc. Les appareils de ce niveau utilisent des données du processus transmises par les instruments du niveau 1 et donnent des consignes aux actionneurs. Au plus haut de ces réseaux, nous trouvons généralement un ou plusieurs automates modulaires dédiés à la gestion de l'"ilot d'automatisation" correspondant. À ce niveau, l'utilisation de bus de terrain est déjà bien consolidée et l'utilisation de réseaux de communication plus avancés comme l'Ethernet Industrielle est en plein essor. En général, dans les fabriques de céramique, le niveau de contrôle de terrain est garanti par les systèmes de contrôle de l'équipement industriel. Ainsi par exemple, les presses les plus récentes sont équipées d'un PLC et/ou d'un PC d'automatisation dédié au contrôle du fonctionnement de l'étape de pressage. De même, les machines de chargement/déchargement de pièces entre les différentes étapes des processus intègrent un automate de contrôle qui se situerait à ce niveau de hiérarchie dans la pyramide CIM.

#### Niveau 3 : Contrôle de cellule

À ce niveau sont regroupés les équipements de surveillance destinés à coordonner les séquences de fabrication entre les machines appartenant à une cellule de fabrication, le processus de production étant sous-divisé en différentes zones ou systèmes reliés entre eux par des automates à hautes performances ou des ordinateurs dédiés au contrôle ou à la programmation. Dans le processus de fabrication de la céramique, ce niveau serait composé des systèmes HMI (Human Machine Interfaces) dont sont fréquemment dotés

les équipements industriels comme les presses, séchoirs, fours ou machines de tri des produits finis. Nous pourrons également inclure dans cette hiérarchie les systèmes SCADA dans lesquels sont graphiquement concentrées les informations de différents points d'une cellule de fabrication comme pourraient l'être, par exemple, les systèmes de stockage et de préparation de matière première préalablement au façonnage du produit.

#### Niveau 4 : Contrôle d'usine

Ce niveau correspond aux systèmes exerçant des fonctions de gestion et planification des opérations de fabrication dans l'ensemble de la fabrique. Ces systèmes génèrent les ordres d'exécution vers le niveau de cellule sur la base des indications du niveau immédiatement supérieur. Des séquences de production et des tâches sont également générées, auxquelles s'ajoute la coordination des ressources de l'usine, et tout ce afin d'optimiser les flux de travail et la qualité du produit fini. Parmi les systèmes qui pourraient être pris en compte au niveau du contrôle d'usine, nous pourrions citer les systèmes d'historisation, les systèmes de gestion de la maintenance (GMAO, Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur) ou les systèmes d'aide à l'exécution de la production (MES, Manufacturing Execution Systems). En plus des propres systèmes d'historisation de l'information, qui sont indispensables pour accéder rapidement et simplement à des données de processus qui sont stockées, les systèmes MES sont devenus un outil quasiment indispensable au développement des opérations en usine. Malheureusement, dans le secteur de la céramique, ce niveau de la pyramide CIM ne s'est pas encore déployé de façon généralisée. Il existe des propositions émanant aussi bien des fabricants de machines industrielles que d'autres agents, que les entreprises de céramique commencent à évaluer.

Les MES sont des systèmes informatiques utilisés dans les opérations de fabrication pour suivre et documenter les transformations des matières premières et/ou des produits semi-finis en produits finis. Ils fournissent des informations qui facilitent la prise de décisions pendant le processus de fabrication en donnant une vision sur la façon dont peuvent être optimisées les conditions d'usine pour améliorer la production. Les MES travaillent en temps réel afin d'intégrer des informations issues de différents éléments de la chaîne de production comme les données de production, les opérateurs, les machines et les services de support. En combinant les informations collectées à partir de toutes ces sources, les MES peuvent opérer dans différents domaines d'intervention comme, par exemple, la planification de ressources, l'exécution et le suivi d'ordres de fabrication, l'analyse de variables de production, l'exploitation de métriques de production pour la gestion de la disponibilité de l'équipement (OEE, Overall Equipment Effectiveness), la gestion de la qualité du produit ou des produits semi-finis et la traçabilité du produit.

#### Niveau 5 : Contrôle et gestion d'affaires

Le dernier niveau de la pyramide CIM se charge d'intégrer le processus de production avec le département de gestion de l'entreprise. C'est à ce niveau que se déroulent toutes les activités liées aux affaires et permettant de maintenir une certaine organisation



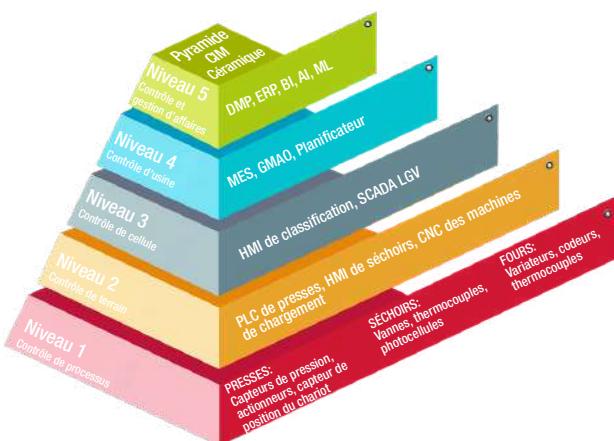
industrielle, en mettant en communication, si tel est le cas, plusieurs établissements de production et en supportant différents outils pour la relation avec les clients et les fournisseurs. De cette manière, le dernier niveau permet aux différents départements de l'entreprise de superviser l'évolution ou la situation du processus de production, en obtenant des informations de ce dernier mais jamais en intervenant sur celui-ci. C'est ici que sont inclus les systèmes ERP (Enterprise Resource Planning) ou les outils de BI (Business Intelligence), dont l'utilisation est assez répandue dans le secteur de la céramique. Cependant, il convient d'indiquer que, généralement, les systèmes de niveau 5 habituellement utilisés par les entreprises du secteur de la céramique montrent un défaut d'intégration dans la pyramide CIM, précisément à cause de l'absence d'une bonne implantation des systèmes de niveau 4, à travers lesquels ils devraient se nourrir des informations issues du processus de fabrication.

Sur la base de la structure de la pyramide CIM générique, il est intéressant de définir une pyramide CIM spécialement axée sur l'industrie de fabrication de carreaux céramiques. Cette pyramide apparaît dans le graphique de la [figure 2.2](#) et comprend les différents systèmes et outils qu'une entreprise de céramique (avec la pyramide CIM correctement implantée) devrait posséder à chacun de ses niveaux d'automatisation.

Pour chaque niveau d'automatisation, nous incluons quelques exemples de systèmes qui seraient placés à ce niveau. C'est ainsi que seraient situés au niveau le plus proche des processus de fabrication, à savoir le niveau 1, les dispositifs de terrain chargés de surveiller et contrôler les opérations de transformation réalisées dans la fabrique. À titre d'exemple, nous pouvons mentionner les dispositifs propres aux étapes de façonnage, séchage et cuisson.

Au deuxième niveau, celui de contrôle de terrain, seraient inclus des éléments et dispositifs propres au contrôle local de l'équipement industriel, comme les PLC d'automatisation de presse ou les éléments de visualisation et d'interface d'un séchoir.

Comme éléments typiques du contrôle de cellule, nous pourrions citer les systèmes SCADA habituellement utilisés dans les parcs de LGV pour la gestion du stockage de produits semi-finis ou, bien que ce ne soit pas indiqué sur le schéma de la [figure 2.2](#), les systèmes de visualisation et de gestion des installations d'automatisation dans une centrale de cogénération.



**Figure 2.2.** Niveaux d'automatisation selon la pyramide CIM dans une fabrique de céramique générique.

Le niveau quatre, celui correspondant au contrôle d'usine, ferait apparaître tous les outils exerçant des fonctions de gestion et planification des opérations de fabrication dans l'ensemble de l'usine. Malheureusement, dans l'industrie céramique, ce quatrième niveau de la pyramide CIM est généralement peu développé. Dans les cas les plus avancés, il existe des systèmes d'aide à l'exécution de la production (MES) mais les systèmes de gestion de la maintenance (GMAO) et les systèmes de planification/séquençage de la production présentent des déficiences significatives.

Enfin, au niveau 5, malgré le "gap" technologique détecté au niveau 4, les entreprises de céramique disposent généralement d'outils permettant de garantir la gestion et le contrôle de l'activité, comme les ERP ou systèmes de BI (Business Intelligence). Pour le moment, d'autres outils propres au niveau 5, qui pourraient commencer à se déployer, comme la Plateforme Digitale de Fabrication ou des modules spécifiques pour Machine Learning (MA)/Intelligence Artificielle (IA), ne sont encore quasiment pas implantés.

### 2.1.2 Types de réseaux industriels

Compte tenu des différents niveaux du module CIM, les réseaux industriels peuvent se différencier en au moins 4 niveaux. À titre d'exemple, la **figure 2.3** présente un schéma reprenant quelques-uns de ces types de réseaux.

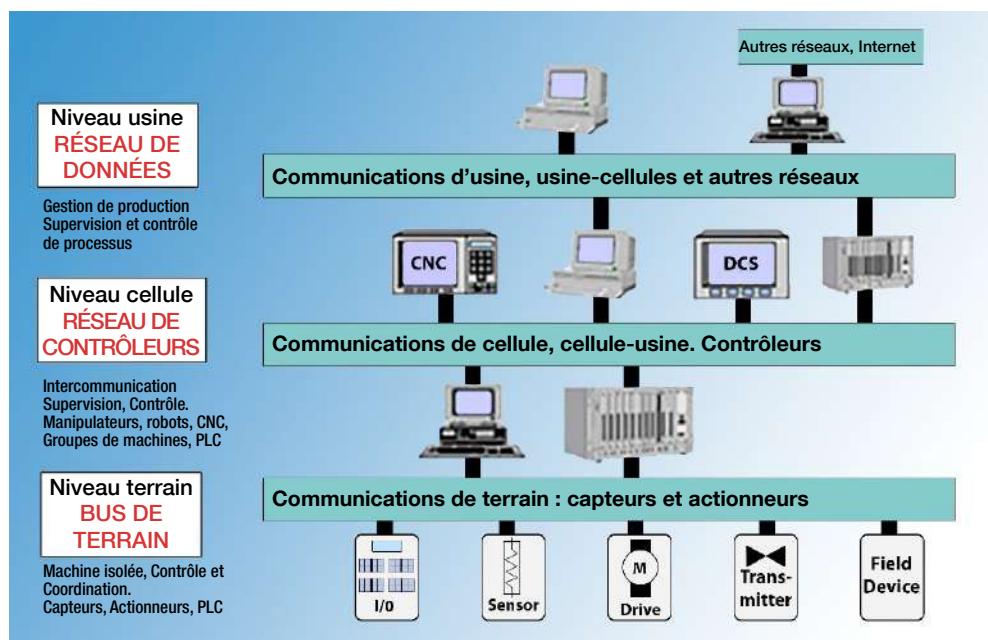


Figure 2.3. Réseaux de communication déployés dans un environnement industriel.



a. Réseau de fabrique ou d'usine :

Il s'agit des réseaux reliant les départements et services de la fabrique en utilisant pour ce faire des ordinateurs ou des serveurs : production, stockage, laboratoire, bureau d'études, services généraux, ventes et marketing, etc. Il s'agit généralement du réseau à travers lequel les différents systèmes du niveau 5 de la pyramide CIM échangent des informations.

b. Réseau de contrôle ou surveillance :

Ces réseaux sont utilisés pour gérer les données nécessaires à la conduite du processus ou des processus de production de l'usine. Par l'intermédiaire de ces réseaux, les systèmes de contrôle et les opérateurs transmettent les données nécessaires au suivi de la production et envoient au processus les changements de consigne requis pour maintenir la production dans des conditions optimales d'exploitation. Dans une fabrique de céramique, ce réseau serait celui qu'utiliseraient principalement le système MES pour effectuer le suivi des opérations de production.

c. Réseau de cellule :

Les réseaux de cellule sont des réseaux de contrôle restreints au niveau d'un "ilot d'automatisation", où sont connectés entre eux les équipements de commande et de contrôle de chaque cellule. Selon la hiérarchisation CIM, les réseaux de cellule connectent les fonctions définies au niveau 3.

d. Réseau ou bus de terrain :

Enfin, le bus de terrain est un réseau local industriel connectant les dispositifs de terrain comme les actionneurs, capteurs, transducteurs, éléments de visualisation, etc. aux équipements qui supportent des processus d'application comme les PLC, CPU, robots ou autres systèmes ayant besoin d'accéder aux dispositifs de terrain pour réaliser leurs fonctions. Traditionnellement, ce niveau de communications est établi à travers des réseaux câblés entre capteurs, actionneurs et éléments de contrôle, où la transmission de données s'effectue au moyen de boucles de courant 4-20 mA ou 0-10 VDC. Aujourd'hui, dans l'industrie céramique, il existe encore des équipements et dispositifs qui continuent de fonctionner de la sorte.

### 2.1.3 Typologies de contrôle

Après avoir révisé les concepts généraux des systèmes de communication industrielle et la hiérarchisation des niveaux d'automatisation, il convient de présenter les différentes typologies de contrôle généralement présentes dans l'industrie.

Nous pouvons distinguer trois types de systèmes de contrôle industriel : contrôle centralisé, contrôle hybride et contrôle distribué. La criticité des tâches à exécuter par le système de contrôle ou la possibilité de sous-diviser les tâches de contrôle du processus déterminera, dans de nombreux cas, le choix entre un type de contrôle et un autre.

- Contrôle centralisé :

Il s'agit du type de contrôle normalement suivi dans des cas peu complexes, où les processus peuvent être gérés grâce à un seul élément de contrôle qui se chargera de superviser et gérer les tâches associées au processus de production.

Le principal avantage de ce mode de contrôle est qu'il n'est pas nécessaire de planifier un système d'interconnexion entre éléments ou processus, puisque tous sont générés par le même système, ce qui fait qu'il sera moins onéreux que d'autres méthodes. L'inconvénient de ce type de contrôle, c'est qu'il exige de créer un système redondant, puisque, dans le cas contraire, si le système est en défaut, c'est toute l'installation qui est arrêtée.

- Contrôle distribué :

Le contrôle distribué repose sur le partage de processus, groupes de processus ou zones fonctionnelles aux algorithmes de contrôle spécifiques qui peuvent s'exécuter de façon autonome. Du fait de l'interdépendance entre les phases de production, il faut tenir compte que ces unités de contrôle doivent être interconnectées entre elles au moyen d'entrées et sorties numériques ou d'un réseau de communication pour partager des données et/ou des états.

L'avantage le plus important de ce modèle de contrôle réside dans le fait que chaque unité fonctionnelle est plus simple qu'une unique unité de contrôle global, ce qui permet de réduire sensiblement les erreurs de programmation et de gestion, et d'utiliser des unités de contrôle plus simples. De plus, contrairement à ce qu'il se passe avec les systèmes de contrôle centralisés, dans ces systèmes, quand une panne survient sur une des unités, il n'y a pas de chute globale du système.

- Contrôle hybride :

Les systèmes de contrôle hybrides présentent des caractéristiques propres aux deux précédents, avec une structure combinée. Leur utilisation est justifiée dans des environnements industriels où dans des processus dans lesquels il convient d'exploiter simultanément les avantages des systèmes centralisés et distribués, ou bien encore dans les systèmes dans lesquels, de par leur complexité, le système de contrôle ne pourra être un contrôle complètement distribué.



Un système de contrôle distribué compte généralement un réseau de communications avec divers nœuds distribués physiquement, dotés d'une capacité de traitement et reliés aux capteurs et systèmes d'actionnement. En revanche, comme expliqué précédemment, dans un contrôle centralisé, il existe un seul contrôleur où convergent tous les signaux d'entrée échantillonnés. Ils sont traités en appliquant les algorithmes de contrôle nécessaires et les signaux de sortie sont générés. Traditionnellement, la centralisation du contrôle était la façon habituelle de procéder, donnant lieu à de courtes et lourdes câblages point à point et à l'utilisation de réseaux analogiques, que ce soit pour la connexion de capteurs dédiés ou pour l'activation d'actionneurs.

La tendance actuelle des systèmes industriels est la migration vers les systèmes distribués du fait de la nécessité de simplifier et normaliser les câblages, en passant des câblages point à point avec des boucles analogiques à des systèmes de nœuds intelligents reliés par un réseau ou bus de terrain par l'intermédiaire de câblages de faible section.

Parmi les systèmes distribués, un des exemples les plus courants est celui utilisé dans les véhicules automobiles. Ces véhicules requièrent un grand nombre de composants à bas coût, fiables et capables de fonctionner dans des environnements agressifs, ce qui constraint à utiliser des systèmes distribués intégrés au véhicule par le bus CAN (Controller Area Network), que nous évoquerons par la suite <sup>12</sup>.

## 2.2 Principaux bus et standards de communication

Les communications au niveau horizontal et au niveau vertical, au sein des structures de réseau déployées dans une usine, peuvent avoir lieu grâce à une grande variété de protocoles de communication, moyens physiques, bus de terrain ou réseaux, dont l'applicabilité dépend de l'environnement dans lequel ils seront déployés et des conditions du système.

Les moyens physiques les plus répandus sont le RS-485, Ethernet, la fibre optique et, plus récemment, le support Wi-Fi. Quant aux bus de communication et protocoles associés, ceux-ci dépendent généralement du moyen physique sur lequel les informations seront transmises. Ainsi par exemple, en travaillant sur un RS-485, les bus les plus répandus sont le Canbus, le Modbus et le Profibus. Au niveau des réseaux de type Ethernet, la plupart des bus classiques ont évolué afin de pouvoir être utilisés sur ces réseaux et présentent des spécifications basées sur ledit moyen physique. En ce sens, il est possible de trouver sur le marché les bus Profinet, Ethernet/IP, Ethercat ou Modbus/TCP, entre autres. Enfin, sont apparus plus récemment des protocoles ou standards de communication exclusivement destinés aux réseaux de surveillance dans lesquels, en plus du Modbus/TCP, sont généralement utilisés le protocole DNP3 ou le protocole OPC. Nous décrirons par la suite les bus de terrain les plus largement utilisés dans les environnements industriels, ainsi que leur évolution vers le support Ethernet.

## 2.2.1 Bus de terrain

Comme indiqué précédemment, un bus de terrain est un système de transmission de données permettant de remplacer les connexions point à point à l'aide de boucles de courant entre les éléments de terrain et l'équipement de contrôle correspondant. Les bus de terrain sont des réseaux numériques, bidirectionnels ou multipoints qui mettent en communication des dispositifs comme des PLC, transducteurs, éléments terminaux de contrôle ou capteurs. Historiquement, différents groupes industriels et/ou académiques ont essayé de développer et de mettre en place une norme permettant l'intégration d'équipements de différents fournisseurs. Cependant, il n'existe pas actuellement de bus de terrain pouvant être qualifié de bus universel.

Bien qu'ils puissent sembler évidents, les principaux avantages que présentent les bus de terrain pour procéder à l'échange de données aux niveaux les plus bas de la pyramide CIM sont précisés ci-après :

- Ils permettent de remplacer les signaux analogiques, basés sur des boucles de courant, par des signaux numériques beaucoup plus précis et fiables.
- Ils permettent un accès multivariable, les sorties des composants ne se limitant pas à une unique variable.
- Ils facilitent la configuration et le diagnostic des dispositifs en permettant un accès à distance à ceux-ci, ce qui simplifie, par exemple, les processus de calibrage ou la détection de défauts.
- Ils réduisent et simplifient de manière significative le câblage des installations.
- Ils ouvrent les portes pour réaliser un contrôle distribué de processus.
- Ils garantissent l'interopérabilité des dispositifs en facilitant le remplacement d'éléments par d'autres éléments répondant aux spécifications du réseau.
- Ils garantissent le développement de systèmes ouverts puisque les spécifications pour produire du hardware et/ou software compatible avec un bus déterminé sont disponibles pour les développeurs de dispositifs.

Vu la grande diversité de bus de terrain présents sur le marché, il est intéressant de les classer en fonction du volume de données qu'ils peuvent transmettre et de leurs fonctionnalités. La vitesse de transmission et les fonctionnalités du bus vont indiquer le niveau auquel ils se placent dans la pyramide CIM et, par conséquent, quelle est la typologie de réseau industriel qu'il est de préférence recommandé d'aborder avec chaque type de bus. Ainsi, il est possible d'établir une classification distinguant trois types de bus de terrain :

- Bus à haute vitesse et faible fonctionnalité
- Bus à haute vitesse et fonctionnalité moyenne
- Bus à hautes performances

Par simplicité, pour chacun de ces groupes de bus, nous indiquons ci-après quelles sont leurs principales caractéristiques, en donnant un exemple du bus de terrain le plus répandu dans chaque groupe.



### 2.2.1.1 Bus de terrain à haute vitesse et faible fonctionnalité : le bus CAN

Ces bus de terrain permettent d'aborder la communication et l'automatisation industrielles des niveaux 1 et 2 de la pyramide CIM où sont établis, d'une part, les réseaux de communication entre capteurs et actionneurs et, d'autre part, les réseaux de contrôle de machine. Leur utilisation est éminemment axée sur l'implantation et le déploiement de réseaux de terrain. Ils transmettent les informations au niveau des bits par des variables numériques pour interconnecter des interrupteurs, détecteurs, capteurs, éléments d'interaction de type boutons, etc. Les bus de terrain les plus utilisés dans l'industrie, dans cette typologie, sont :

- AS-i (Actuator-Sensor Interface)
- CAN (Controller Area Network)
- SDS (Smart Distributed System).

Le bus le plus répandu au sein de ce groupe est Canbus, lequel, bien qu'initialement développé pour être utilisé dans l'industrie automobile, a été largement accepté au niveau industriel en raison de ses performances, de sa robustesse et de son coût réduit. Le protocole CAN sur lequel est basé ce bus de terrain a été propulsé par la société allemande Bosch, en 1986<sup>13</sup>, afin de simplifier le câblage dans les automobiles de différentes marques, ce qui a permis de réduire sensiblement le nombre de fils existants pour la communication de la grande quantité d'électronique associée aux éléments installés dans le moteur et le reste du véhicule (système de freinage, airbags, ceintures de sécurité, etc.).

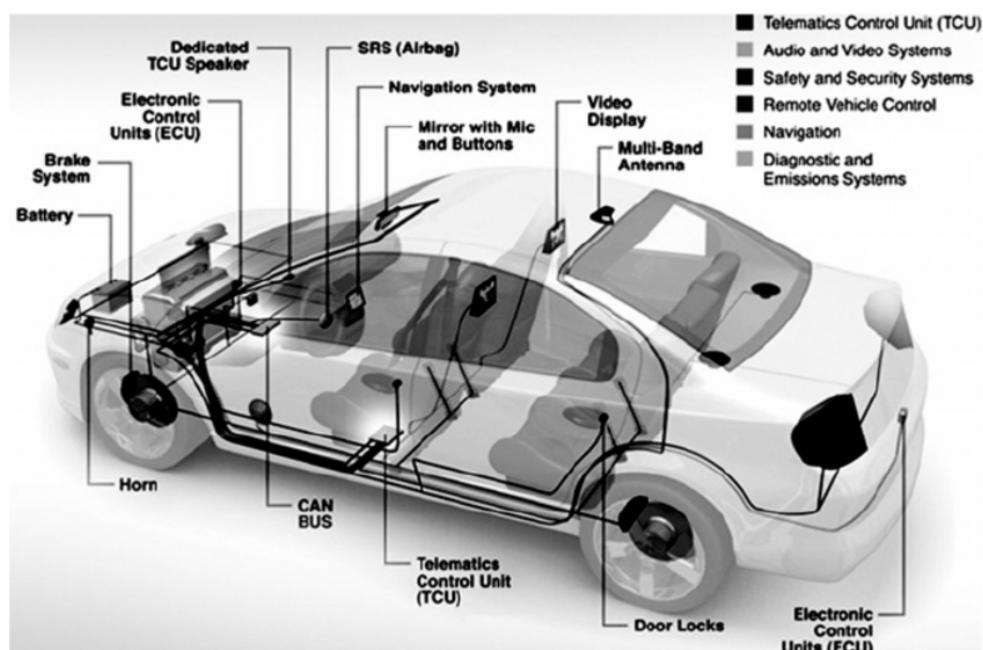


Figure 2.4. Exemple de réseau de communications CAN dans une automobile.<sup>15</sup>

rité, climatisation, etc.). Son utilisation permet un accès distribué à tous ces éléments du réseau et, actuellement<sup>14</sup>, il est dédié à beaucoup plus d'utilisations dans les environnements industriels comme, par exemple, la connexion des dispositifs intelligents (robots, ascenseurs, machines, etc.).

Le protocole CAN est normalisé depuis 1993 selon la norme ISO 11898<sup>16</sup> et à partir de ce protocole, d'autres protocoles comme DeviceNet ou CANOpen ont été développés par la suite.

Ses principales caractéristiques sont les suivantes :

- CAN est un protocole orienté messages, autrement dit les informations échangées se décomposent en messages auxquels est assigné un identificateur et qui s'encapsulent dans des trames pour leur transmission. Chaque message possède un identificateur unique dans le réseau, avec lequel les nœuds décident d'accepter ou non le message.
- Priorité de messages.
- Garantie de temps de latence.
- Souplesse dans la configuration.
- Réception par multidiffusion (multicast) avec synchronisation de temps.
- Système robuste en matière de consistance de données.
- Système multi-maître.
- Détection et signalisation d'erreurs.
- Retransmission automatique de trames erronées.
- Distinction entre erreurs temporaires et défauts permanents des nœuds du réseau, et déconnexion autonome de nœuds défectueux.

*Avantages :*

- Minimisation de la quantité de câbles.
- Moins de capteurs et connexions utilisés entre les unités de contrôle.
- Meilleur rendement des composants.
- Diagnostic intégré et avertissement de défauts.

*Inconvénients :*

- Plus complexe et plus cher à implanter que d'autres bus.

### **2.2.1.2 Bus de terrain à haute vitesse et fonctionnalité moyenne : MODBUS**

Ces bus transmettent des informations en bytes, en utilisant aussi bien des variables numériques qu'analogiques. Ils sont utilisés pour connecter des dispositifs, contrôleurs, PLC et PC afin de partager des dispositifs de terrain entre plusieurs équipements de contrôle. Dans la pyramide CIM, ces bus seraient utilisés dans les communications au niveau du contrôle



de cellule et leur utilisation est par conséquent tournée vers l'implantation de réseaux de cellule. Les bus de ce type les plus utilisés dans l'industrie sont actuellement les suivants :

- |             |            |              |
|-------------|------------|--------------|
| - DeviceNet | - COMPOBUS | - LONWorks   |
| - MODBUS    | - INTERBUS | - UNI-TELWAY |
| - BITBUS    |            |              |

Et parmi ces bus, un des plus utilisés dans le secteur de la céramique en particulier, et dans d'autres industries de type process en général, est le MODBUS. C'est un des protocoles de communication industrielle les plus utilisés actuellement en raison du fait que, de par sa simplicité et s'agissant d'un protocole ouvert, il est très répandu chez de nombreux fabricants de dispositifs.

Dans le secteur de la céramique précisément, un exemple bien représentatif de l'utilisation de ce protocole pour l'interconnexion de systèmes de contrôle de processus est la communication entre la presse et le système de contrôle automatique de l'opération de pressage, à partir de la mesure de l'humidité des supports récemment pressés, que l'Instituto de Tecnología Cerámica (ITC) a développée en 2007. Ce système de contrôle recueille les valeurs de pression auxquelles sont façonnées les pièces, en communiquant directement avec le système de contrôle de la propre presse par l'intermédiaire d'un bus MODBUS. À partir de cette pression, et des mesures d'humidité réalisées au moyen d'un capteur infrarouge, le système calcule la valeur de pression à laquelle devrait fonctionner la presse pour que la densité des supports reste constante. Cette pression est à nouveau retransmise à la presse par le biais du même bus de communication MODBUS.

MODBUS est un protocole de type requête/réponse, ce qui fait que, dans les transactions de données, le dispositif qui effectue une requête sera identifié comme le client ou maître et celui qui restituera la réponse sera considéré comme le serveur ou esclave de la communication. Dans un réseau MODBUS, un équipement maître peut accéder à plusieurs équipements esclaves, identifiés par une adresse de dispositif unique. L'échange de données peut s'effectuer de 3 façons différentes : RTU, ASCII et TCP. Les supports de couche physique sur lesquels peut être utilisé MODBUS sont RS-232, RS-422, RS-485 ou un réseau à haute vitesse en HDLC (High-Level Data Link Control), dans les modes de transmission classiques, et Ethernet dans le mode TCP, développé pour fonctionner sur des réseaux à architecture TCP/IP.

À l'origine, MODBUS a été développé par MODICON (aujourd'hui Schneider Electric) en 1979 <sup>17</sup>. Comme cela a été précisé, il existe plusieurs variantes, avec différentes représentations numériques des données et détails du protocole légèrement inégales. Modbus RTU est une représentation binaire compacte des données. Modbus ASCII est une représentation lisible du protocole, mais moins efficace. Les deux implantations du protocole sont série. Le format RTU finalise la trame avec une somme de "contrôle de redondance cyclique" (CRC), tandis que le format ASCII utilise une somme de "contrôle de redondance longitudinale" (LRC). La version Modbus/TCP est très semblable au format RTU, mais elle établit la transmission au moyen de paquets TCP/IP.

*Avantages :*

- Conçu en tenant compte de son utilisation pour des applications industrielles.
- Public et gratuit.
- Facile à planter et requiert peu de développement.
- Utilise des blocs de données sans supposer de restrictions.
- Approprié pour de petites ou moyennes quantités de données <= 255 Bytes
- Transfert de données avec accusé.

*Inconvénients :*

- Les objets binaires de grande taille ne sont pas compatibles.
- Les transmissions Modbus doivent être contigües, ce qui limite les types de dispositifs de communications à distance à ceux pouvant stocker des données pour éviter des lacunes dans la transmission.
- Le protocole Modbus n'offre pas de sécurité contre les ordres non autorisés ou l'interception de données.

**2.2.1.3 Bus à hautes performances : PROFIBUS**

Les informations transmises par ces bus sont structurées sous forme de "mots" ou tables permettant l'échange de données entre dispositifs et contrôleurs ou PC. Dans la pyramide CIM, ces bus se situeraient au niveau inférieur, en permettant la génération d'ordres d'exécution vers le niveau de cellule sur la base du traitement des informations reçues. Ces bus sont utilisés pour la création de réseaux de contrôle ou de surveillance permettant de transmettre à l'opérateur les données nécessaires pour conduire le processus et envoyer des changements de consigne aux éléments des cellules. Dans ce groupe, le bus actuellement le plus utilisé est PROFIBUS, bien qu'il en existe d'autres comme les bus suivants :

- ControlNet

- Fielbus Foundation

- World FIP

PROFIBUS a été développé entre les années 1987-1989 par des entreprises allemandes (ABB, Bosch, Klöckner Möller, Siemens, entre autres) et cinq instituts de recherche allemands. C'est le bus de terrain le plus utilisé au monde avec plus de 20 millions de nœuds de communication installés. Il dispose actuellement de la version PROFINET, spécialement développée pour une utilisation sur les réseaux Ethernet. Son fonctionnement repose sur l'utilisation de nœuds maîtres et de nœuds esclaves, les nœuds maîtres étant également dénommés actifs et les esclaves passifs. Il existe trois formats possibles pour ce bus : PROFIBUS-DP, PROFIBUS-PA et PROFIBUS-FMS.

- *PROFIBUS DP (Distributed Peripherals).* Il offre une grande vitesse de transmission, il est peu coûteux et permet le transfert de petites quantités de données. Sa structure maître-esclave est classique. C'est le plus répandu et il est utilisé au niveau terrain ou cellule, en agissant au niveau terrain. La couche physique sur laquelle il est implanté est RS-485.



- *PROFIBUS PA (Process Automation)*. Ses caractéristiques sont similaires à celles du DP mais il est adapté à des zones intrinsèquement sécurisées, autrement dit, pour des environnements dangereux et avec risque d'explosion. Il agit au niveau terrain.
- *PROFIBUS FMS (Fieldbus Messages Specifications)*. Il s'agit du format universel, de surveillance et configuration. Il est multi-maître (passage de jeton entre maîtres, maître-esclave avec les autres dispositifs) et il s'utilise au niveau usine ou cellule. Avec l'évolution de PROFIBUS vers une utilisation avec le protocole TCP/IP, ce format perd de l'importance pour la liaison au niveau cellule ou usine.

Les caractéristiques générales du bus PROFIBUS, indépendamment de la modalité sous laquelle il est utilisé, sont les suivantes :

- Longueur maximale : 9 Km avec moyen électrique, 150 Km avec fibre optique en verre, 150 m avec infrarouge.
- Peut supporter jusqu'à 126 noeuds.
- Vitesse de transmission entre 9,6 Kbit/s et 12 Mbit/s.
- Peut transférer un maximum de 244 bytes d'informations par noeud et cycle.
- Topologie : étoile, arbre, anneau et anneau redondant.

*Avantages :*

- Il s'agit du standard le plus accepté au niveau mondial et il est largement répandu en Europe.
- Les trois versions disponibles permettent de couvrir la quasi-totalité des applications d'automatisation.

*Inconvénients :*

- Il est peu performant dans la transmission de messages courts puisque le message intègre un grand nombre d'informations relatives à l'adressage.
- Il ne possède pas d'alimentation associée et il est légèrement plus cher que d'autres bus.

## 2.2.2 Réseaux LAN industriels

En 1984, sous la norme ISO 7498<sup>18</sup>, l'ISO (International Standards Organization) a approuvé le modèle OSI (Open Systems Interconnection), lequel décrit les règles régissant les équipements de communication échangeant des informations à travers une infrastructure de réseau. Le modèle spécifie les règles en tenant compte de leur objectif fonctionnel et les classe en sept couches ou niveaux : *application, présentation, session, transport, réseaux, liaison et physique*.

En 1985, l'IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers) a produit un ensemble de normes pour les LAN sous la dénomination IEEE 802.X<sup>19</sup>. Une des normes IEEE

802 est la célèbre norme connue sous le nom d'Ethernet (IEEE 802.3) <sup>20</sup>, adoptée par l'ISO comme ISO 8802-3. Ethernet est un réseau avec une topologie logique en bus dont le standard spécifie une vitesse de transmission de 10 Mbit/s, même si avec la version Fast Ethernet, la vitesse atteinte est de 100 Mbit/s, et jusqu'à 10 Gbit/s avec l'actuel Ethernet Gigabit.

Ethernet est un réseau de communication extrêmement populaire du fait, entre autres, du schéma ouvert de son interconnexion, de son efficacité dans l'échange de gros volumes d'informations, du faible coût des interfaces requises dans son implantation et de sa vitesse. Sa spectaculaire diffusion lui a permis de prendre des parts de marché y compris au niveau de la pyramide de communications réservé aux bus de terrain. Dans le support de nombreux systèmes distribués de contrôle, il se présente comme un sérieux concurrent aux réseaux traditionnels. Cependant, quand il faut garantir le retard maximum que peuvent subir les messages, principalement dans des applications en temps réel, son choix n'a pas été exempt de risques, de par sa nature initialement non déterministe. Ce comportement non déterministe des réseaux Ethernet classiques ne permettait pas de garantir l'envoi et la réception d'un paquet de données sur une période de temps déterminée, chose qui est indispensable dans la conception de réseaux industriels, d'autant plus quand ces réseaux sont axés sur la surveillance et/ou le contrôle d'applications critiques.

Cependant, l'évolution d'Ethernet a aujourd'hui atteint un niveau de développement dans lequel il est possible de contrôler la livraison déterministe de l'information, avec des contrôles distribués en temps réel. Ceci a été obtenu par l'implantation de nouveaux protocoles et contrôles de transmission, qui ont permis de faire évoluer le réseau Ethernet "standard".

Comme indiqué précédemment, les bus traditionnels les plus avancés ont évolué pour une utilisation sur des réseaux Ethernet, grâce au développement de spécifications au niveau de la couche de transport du standard OSI et en maintenant sur les couches inférieures les spécifications d'origine. Ainsi, les bus classiques avec des spécifications basées sur Ethernet et actuellement utilisés dans le milieu industriel, pour développer surtout des réseaux situés aux niveaux les plus hauts de la pyramide CIM, sont les suivants :

- Modbus TCP
- EtherCAT
- CYP Sync
- Ethernet/IP
- PROFINET
- FieldBus HSE

Les principales caractéristiques des protocoles les plus répandus dans l'utilisation de réseaux LAN industriels (Modbus TCP, Ethernet/IP, EtherCAT et PROFINET) sont décrites ci-après :

#### *Modbus TCP*

La spécification Modbus TCP/IP a été développée sur la base du standard Modbus RTU en 1999, ce qui a permis d'encapsuler le paquet d'informations de la trame Modbus dans la structure de messagerie du protocole TCP/IP.



Modbus TCP peut être aujourd'hui considéré comme le protocole d'Ethernet Industriel le plus populaire en raison de la simplicité de son application en utilisant le standard Ethernet.

#### *Ethernet/IP*

Il s'agit d'un protocole également basé sur Ethernet et utilisé pour des applications d'automatisation industrielle sous l'ensemble de protocoles d'Ethernet IP/UDP/TCP standard. À la différence du Modbus/TCP, le protocole Ethernet/IP a été développé pour offrir des caractéristiques de sécurité en temps réel.

#### *EtherCAT*

Il pourrait être considéré comme un bus de terrain en temps réel pour une utilisation sur Ethernet Industriel. Il a été développé par la société Beckhoff, dans la recherche d'une solution pour l'intégration du protocole Ethernet dans un environnement industriel, et il a été ensuite remis au groupe de technologie ouvert EtherCAT pour sa maintenance, ses supports et son développement. Il combine les fonctionnalités et technologies d'Ethernet à la simplicité d'un bus de terrain, plus précisément CANopen, ce dernier constituant sa base.

Le système de bus utilisé par ce protocole modifie légèrement le «hardware» utilisé de façon standard sur Ethernet, afin de garantir l'efficacité des communications grâce à l'utilisation d'une structure permettant de transférer les données entre des dispositifs de façon répétitive. Cela rend impossible la création de réseaux en étoile et la réalisation d'un quelconque type de structure en arbre, si ce n'est par l'utilisation de bornes E/S avec des câbles de dérivation. Enfin, la communication entre composants Ethernet et EtherCAT doit toujours s'effectuer à travers un Switch Virtual dans le PLC, une communication directe étant impossible.

#### *ProfiNET*

Son fonctionnement repose sur le standard Profibus, mais son intégration s'effectue, comme indiqué précédemment, sur Ethernet. Cela signifie que, tout en conservant les fonctionnalités de Profibus, il améliore et optimise la transmission au niveau de couche 2, ce qui permet de cohabiter avec les télégrammes de protocoles informatiques comme TCP/IP, en maintenant la même connexion.

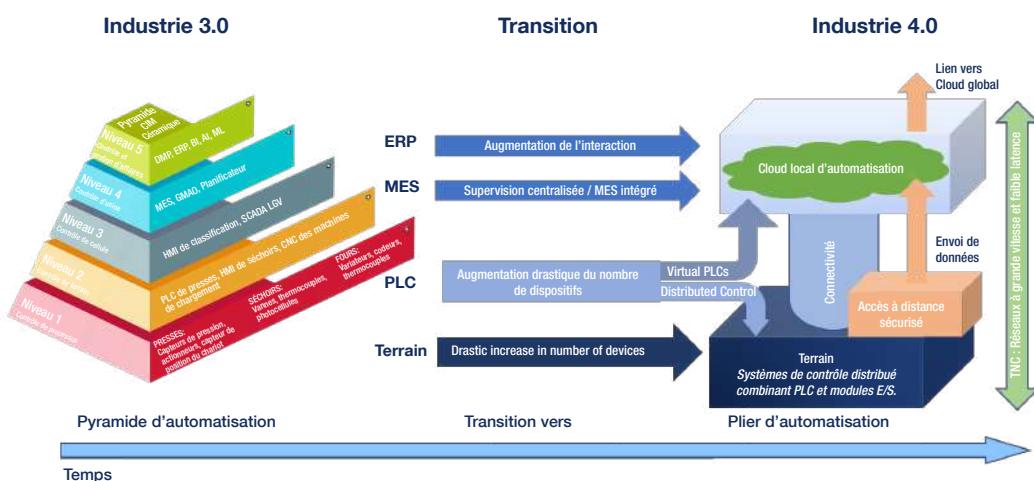
Le principal avantage de ProfiNet est qu'il offre aux utilisateurs une utilisation d'Ethernet industrielle sûre et fiable, en alliant facilité d'utilisation d'un standard bien établi, comme le bus de terrain PROFIBUS DP, et l'efficacité et capacité de haut rendement caractérisant le niveau physique du standard Ethernet, tout en pouvant partager l'infrastructure de réseau avec d'autres communications Ethernet.

## 2.3 Nouveaux standards de communication pour l'Industrie 4.0

La pyramide CIM a été le standard de conception sur lequel s'est basé, au cours des 20 dernières années, tout projet de contrôle industriel destiné à connecter des systèmes de terrain, le fameux "shop floor", aux niveaux de gestion de l'affaire, le "top floor". C'est à travers elle que se structurent les différentes technologies reliant les dispositifs d'entrée/sortie sur terrain, avec les éléments de contrôle et ces derniers avec les systèmes MES et les systèmes de contrôle de l'activité. Cependant, l'irruption de concepts comme l'Internet Industriel des Objets <sup>21</sup> (IIoT, de l'anglais Industrial Internet of Things) incite à une transformation progressive du modèle CIM avec lequel s'était familiarisée l'industrie.

IIoT est un terme qui fait référence aux différents dispositifs de hardware pouvant opérer conjointement à travers l'internet des objets afin d'aider à améliorer la fabrication et les processus industriels. L'IIoT englobe, par conséquent, tous les capteurs, dispositifs et machines qui contribuent à améliorer les processus physiques dans un environnement industriel. En revanche, en se référant à l'Internet des Objets (IoT) de manière générale, on considère tout dispositif s'adaptant au modèle IoT, par exemple, des dispositifs domestiques intelligents permettant de connecter directement le consommateur final au fournisseur.

Ce changement dans les standards de communication associés à l'IIoT suppose implicitement et nécessairement une transformation de la structure du modèle CIM. En effet, comme cela est représenté sur le schéma de la **figure 2.5**, la structure des niveaux d'automatisation cessera progressivement d'être une pyramide pour devenir un véritable pilier d'automatisation.



**Figure 2.5.** Processus de transformation de la pyramide CIM vers une structure basée sur un pilier de connectivité (source : Belden).



La réorientation que connaît actuellement la pyramide CIM est nécessaire, pour deux raisons principalement. En premier lieu, par la nécessité de distinguer de façon plus marquée les différentes couches de contrôle/gestion dans les processus industriels, et en second lieu, pour refléter le fait que certaines technologies peuvent cesser de résider dans les installations des entreprises et être hébergées dans un environnement de "cloud computing", que ce soit au niveau local qu'au niveau externe.

Les nouvelles applications d'IoT, telles que l'accès à distance sécurisé pour la maintenance ou le déploiement d'applications industrielles de Big Data pour l'optimisation continue de processus et la maintenance prédictive, exigent un accès direct à des données de terrain, ce qui est rendu difficile si elles sont supportées avec un modèle pyramidal strict, d'où la nécessité d'un nouveau modèle ou d'une nouvelle structure, à savoir le dénommé pilier d'automatisation.

L'industrie se tourne actuellement vers l'utilisation de plus en plus généralisée de réseaux reposant sur la technologie Ethernet, et non pas uniquement dans les unités d'affaires mais également dans le processus même, où l'acquisition de données et l'informatique ont réellement beaucoup d'importance. En ce sens, les processus qui ne requièrent pas un contrôle exhaustif en temps réel peuvent actuellement arriver à se développer de façon virtuelle dans le "cloud", comme le reflète la [figure 2.5](#). Le graphique montre également comment, grâce à l'IoT, les données pourraient être partagées plus simplement entre tous les niveaux, sans qu'elles aient à passer séquentiellement d'une couche à la couche supérieure.

Le nouveau modèle proposé est plus ouvert et souple, et il peut supporter de nouvelles requêtes associées à une communication verticale intensive. Résultat : certaines fonctionnalités associées à des PLC et à des systèmes SCADA et ERP peuvent être virtualisées et relocalisées dans un "cloud" local ou déporté. En même temps, le nouveau modèle prend aussi en considération la croissance constante dans le nombre de dispositifs "intelligents" et capteurs existant au niveau terrain, ce qui facilite le déplacement au niveau terrain de certaines fonctions critiques comme, par exemple, la sécurité.

Dans la situation actuelle, dans laquelle l'industrie va commencer à abandonner progressivement sa dépendance aux bus de terrain, pour se tourner vers un usage massif d'Ethernet, il est nécessaire de distinguer plus clairement les aspects relatifs aux réseaux de communication entre les dispositifs, de ceux se référant aux systèmes de gestion, de là les deux blocs reliés à travers le pilier de connectivité, représentés sur la figure 5. Le développement de la technologie TSN (Time Sensitive Networking), laquelle apporte du déterminisme au standard Ethernet, autrement dit une garantie de réception de l'information dans un temps défini, souligne l'importance des changements qui sont ici décrits.

Dans les paragraphes qui suivent, nous allons décrire brièvement quelques-uns des outils et technologies qui contribueront, à notre sens et au cours des prochaines années, au changement de paradigme : l'OPC, le TDN, le "cloud computing", la 5G et la cybersécurité. Il est important de souligner que, en dépit des changements qui vont se produire dans les environnements de production, les prémisses opérationnelles établies par la

pyramide CIM sont actuellement toujours nécessaires pour garantir une transformation fluide des processus de production. En effet, dans la mesure où l'exploitation massive de données de traitement va générer des informations en temps réel pour améliorer la prise de décisions, l'organisation des structures de production de départ doit au minimum se conformer aux standards CIM. Si tel n'est pas le cas, le processus de transformation peut s'avérer beaucoup plus coûteux que ce qui était escompté.

### **2.3.1 OPC : Open Platform Communications**

OPC (Object linking and embedding for Process Control ou Open Platform Communications) est un ensemble de spécifications qui offre un standard de communication, en simplifiant la relation entre les dispositifs d'entrée/sortie (sources de données) et l'élément ou les éléments des réseaux agissant comme des "clients" de données. Il a été développé dans le but d'apporter une solution au problème généré par l'existence d'une multitude de formats de données, drivers et protocoles de communication sur le marché industriel.

En 1995, cinq sociétés dédiées au développement de technologies d'automatisation (Intellution, Opto-22, Fisher-Rosemount, Rockwell Software et Intuitiv Software) se sont alliées à Microsoft et ont créé OPC Foundation, un consortium industriel à but non lucratif pour le développement et la mise en place d'un système ouvert de communications qui supprimerait ces barrières de communication. Résultat : OLE/COM (Object Linking and Embedding/Common Object Model), base de l'actuel OPC classique <sup>22</sup>, a été créé.

OPC facilite, d'une part, la tâche des intégrateurs de solutions d'automatisation en réduisant la complexité associée à l'interconnexion d'éléments. De plus, OPC permet de développer des environnements d'essais moins onéreux et plus simples avec des simulateurs implantant OPC. D'autre part, les industries peuvent tirer profit de l'utilisation d'OPC en ayant la possibilité de choisir les meilleures solutions parmi les différents fournisseurs, sans être confrontées à des restrictions de compatibilité. Tout cela se répercute par une baisse du coût de la technologie de contrôle et d'automatisation, en générant des écosystèmes industriels plus souples et dynamiques. Ceci étant, l'OPC classique, bien qu'il apporte une solution à de nombreux problèmes d'interopérabilité, présente plusieurs inconvénients comme les suivants :

1. Être basé sur la technologie de Windows en utilisant les Distributed Component Object Model COM/DCOM. (Technologie qui permet de développer des composants software distribués et communiquant entre eux).
2. Il n'est pas possible de monter le serveur OPC directement sur un PLC. Des ordinateurs communiquant avec les machines sont nécessaires.
3. Les données ne sont pas cryptées et il n'y a pas de niveaux de sécurité.
4. Il n'est pas facile à utiliser avec un Firewall. Le nombre de ports et d'éléments de configuration font que sa mise en marche est fastidieuse.
5. Les modèles de données sont différents selon le type d'information. OPC DA pour le temps réel, OPC HDA pour l'historisation de données et OPC A&E pour les alarmes et événements.

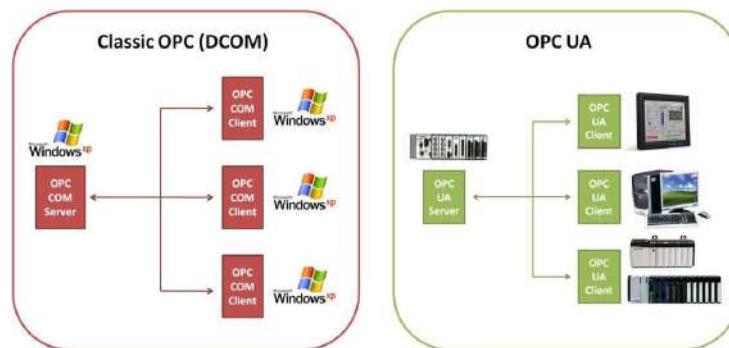


Figure 2.6 Principales différences entre OPC-DA et OPC-UA <sup>23</sup>

En réponse à ces problèmes, l'OPC Foundation a lancé en 2008 une nouvelle version dénommée OPC-UA (Unified Architecture), en remplacement de l'ensemble des spécifications basées sur le standard COM sans perdre aucune de ses caractéristiques ni son rendement, comme indiqué sur la [figure 2.6](#).

À l'heure actuelle, la grande diversité d'applications dans lesquelles est utilisé OPC requiert une scalabilité allant des systèmes intégrés aux outils MES et ERP, en passant par les systèmes SCADA. Les conditions nécessaires et les plus importantes sur lesquelles s'est appuyée l'OPC Foundation pour le développement d'OPC-UA sont reprises dans le [tableau 2.1](#).

Tableau 2.1 Conditions de développement de l'OPC – UASource : <https://larraioz.com>

Communication entre systèmes distribués	Modèle de données
Fiabilité	Modèle commun à toutes les données OPC
Robustesse et tolérance aux défauts	Orienté vers les objets
Redondance	Système de type extensible
Indépendance de plateforme	Méta-information
Scalabilité	Données et méthodes complexes
Communication avec Internet et pare-feu	Scalabilité de modèles, des simples aux complexes
Haut rendement	Modèle basique abstrait
Sécurité et contrôle d'accès	Base pour un autre modèle de données standard
Interopérabilité	

### 2.3.2 TSN : Time Sensitive Networking

TSN (Time Sensitive Networking) est un standard défini par l'IEEE et permettant de transmettre des messages déterministes sur le standard Ethernet.<sup>24</sup>

Comme indiqué dans l'introduction du point 3, Ethernet est un standard de réseau de communications très populaire, qui est de plus en plus étendu à la partie production de l'usine. Cette expansion rencontre généralement de sérieuses limites, surtout en termes de temps de réponse et de tolérance aux pannes.

Afin de résoudre les inconvénients associés à l'utilisation d'Ethernet dans des environnements industriels, TSN reformule et optimise Ethernet, en améliorant les mécanismes de qualité de service (QoS) et la synchronisation de temps, en réduisant les latences dans la transmission et la redondance sans interruption pour permettre une communication en temps réel.

TSN est défini dans des standards spécifiés au niveau de l'IEEE 802.1Q-1CM-1CB<sup>25</sup>. Ces normes peuvent être regroupées principalement en trois catégories de base. Chacune peut être utilisée seule, mais en joignant les trois, cela permet de tirer tout le potentiel du TSN. Les trois composants sont :

1. Temps de synchronisation : Tous les dispositifs qui participent à la communication en temps réel nécessitent d'avoir une compréhension commune du temps. Autrement dit, tous disposent du même format et de la même heure au même instant.
2. Programmation et configuration du trafic : Les dispositifs qui prennent part au réseau le font en temps réel avec les mêmes règles de traitement et renvoi des paquets.
3. Sélection de chemins de communication et tolérance aux pannes : Tous les dispositifs respectent les mêmes règles de communication et de bande passante, en utilisant plus d'un chemin et en réduisant par conséquent la possibilité de pannes.

### 2.3.3 IIoT : Industrial Internet of Things

Comme indiqué tout au long du guide, l'équipement distribué dans les fabriques de céramique est généralement isolé du reste de l'équipement et des niveaux supérieurs de contrôle, en formant des îlots d'information auxquels il est difficile d'avoir accès à partir d'autres points de l'usine. Le nouveau paradigme de l'Industrie 4.0 vise à éliminer ces îlots et à apporter de la transparence à tous les éléments impliqués dans la production, ce qui constraint à connecter l'industrie dans son ensemble.

Le câblage possède de nombreux avantages, surtout en termes de robustesse, bande passante, faible latence et scalabilité, mais il n'est pas toujours possible de l'utiliser ou le coût de mise en œuvre est trop élevé pour la criticité de la connexion. Dans ces cas, dans

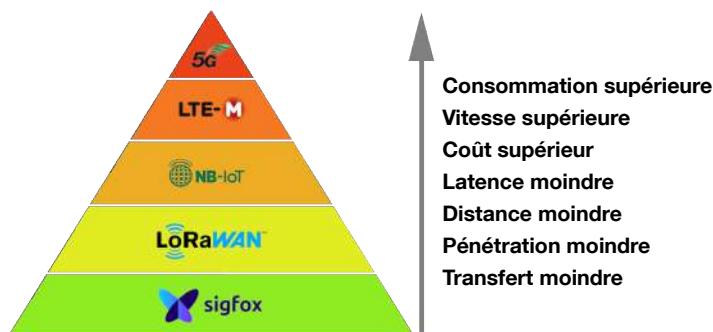


Figure 2.7. Comparatif entre les fonctionnalités de différentes technologies d'IoT.

lesquels la connectivité sur des supports câblés peut être compromise, l'utilisation de l'IloT peut être une bonne alternative pour garantir la connexion des actifs industriels. Cependant, il faut bien avoir à l'esprit que la technologie existante dans le domaine de l'IloT n'est pas toute fonctionnelle dans tous les scénarios possibles. Comme représenté sur la figure 2.7, les besoins de communication, les conditions environnementales et de situation et l'élément à connecter feront qu'il faudra choisir une technologie.

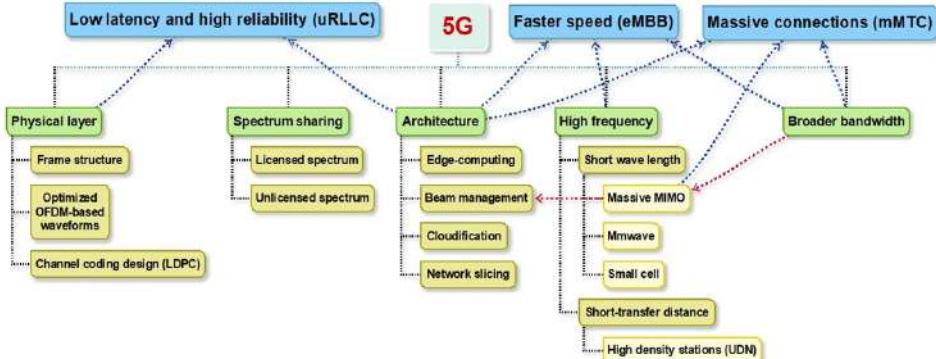
Les points qui suivent décrivent quelles sont les principales technologies qui peuvent être utilisées dans le déploiement de réseaux d'IloT, ainsi que les avantages et inconvénients que présente chacune d'elles.

### 2.3.3.1 5G.

La 5G (5th Generation) est un standard défini par la 3GPP (3rd Generation Partnership Project)<sup>26</sup> en réponse aux nouveaux besoins de communication existant sur le marché, que ce dernier soit domestique ou industriel. Il s'agit de la dernière actualisation du réseau de couverture sans fil 4G.

En principe, d'après les spécifications fixées par ses développeurs, la 5G doit apporter une solution à certaines limites existantes dans les communications sans fil actuelles, comme la stabilité, les temps de réponse ou la vitesse de transmission.

La figure 2.8 montre les relations entre l'essentiel des techniques actuelles et les nouveaux apports de la 5G.



**Figure 2.8.** Relation des techniques 5G essentielles (en jaune) et caractéristiques clé (en bleu). Flèches bleues : liaisons directes entre la technique et la caractéristique résultante ; flèches rouges : connexions entre deux technologies. Source : IDTechEx Research<sup>27</sup>

Sa bande passante plus large, sa plus grande vitesse, sa plus faible consommation en énergie et ses latences en dessous de la milliseconde peuvent permettre à la 5G de représenter une vraie alternative au câble. Une grande partie de ces avantages provient, comme indiqué sur la **figure 2.8**, de l'utilisation d'ondes radio à haute fréquence et d'améliorations des couches physiques (antennes et récepteurs).

Même s'il est vrai que plus la fréquence est grande plus la vitesse est grande, il n'en est pas moins vrai que les hautes fréquences permettent des distances de transmissions moindres et une plus faible capacité de pénétration des murs. De ce fait, l'infrastructure hardware nécessaire sera plus importante et, par conséquent, le coût d'implantation aussi. La couverture sera également trop pauvre pour une liaison au réseau.

Par conséquent, la 5G apporte de nouvelles possibilités de communication sans fil à des dispositifs qui, de par leurs temps de réponse, étaient impensables. Mais il ne faut pas oublier qu'une bonne étude et analyse des requêtes et coût est essentielle avant d'opter pour cette technologie. Son choix ou non ne devra pas se baser principalement sur les exigences de consommations, latences et couverture nécessaires.

### 2.3.3.2 LPWAN.

LPWAN (Low Power Wide Area Network)<sup>28</sup> est un type de réseau de communications sans fil conçu pour une longue portée, avec un taux de bits bas entre objets connectés alimentés par batterie. Il est possible de distinguer les technologies à spectre à usage privé et les solutions qui utilisent les bandes à usage courant. Plusieurs de ces technologies sont décrites ci-après, en commençant par celles à bande privative (vendues aux enchères).



### 2.3.3.2.1 NB-IoT.

NB-IoT (Narrowband IoT) est un standard développé par 3GPP<sup>29</sup> dans les réseaux LPWAN avec des bandes à usage privatif pour permettre la connexion à une large gamme de dispositifs et services au moyen des réseaux mobiles LTE. Les basses fréquences (180 KHz) permettent d'axer son champ d'utilisation spécialement sur des dispositifs d'intérieur ou souterrain avec une faible consommation, tout en offrant une longue durée de batterie et un faible coût d'implantation.

Ses principaux avantages sont les suivants :

- Grande efficacité énergétique, avec des durées de batterie de plus de 10 ans.
- Modules peu coûteux (à partir de 1€).
- Fiabilité et sécurité grâce au chiffrement de ses connexions.
- Déploiement simple et scalabilité en utilisant l'architecture de réseau mobile LTE existante.
- Grand nombre de dispositifs connectés, jusqu'à 100 000 dispositifs par antenne.
- Excellente pénétration dans les bâtiments et sous terre.

Le débit maximum en téléchargement est de 200 Kbits/s et en transfert de 144 Kbits/s.

### 2.3.3.2.2 LTE-M1

LTE-M (Long Term Evolution, Category M1)<sup>30</sup> est une autre option dans le spectre des bandes commerciales. Ce réseau est également normalisé par 3GPP.

Il a une position intermédiaire entre NB-IoT et LTE. La bande passante de ses canaux est dans les 1,08 MHz. Grâce à son exploitation efficace de l'énergie, la durée des batteries est de 5 à 10 ans en fonction de la vitesse de transmission. La vitesse maximale de transmission, que ce soit en téléchargement ou transfert est de 1 Mbps.

La capacité de transmission vocale et de support pour positionnement est une autre amélioration qui a été apportée. En comparant les réseaux LTE-M1 et NB-IoT, nous pouvons observer les différences suivantes.

### 2.3.3.2.3 SigFox

SigFox<sup>32</sup> fait partie des bandes couramment utilisées. SigFox se définit comme une technologie mais aussi comme un opérateur de télécommunications français opérant sur sa propre technologie.

Il fonctionne en dessous des fréquences sous-GHz, plus précisément à 868 MHz en Europe et 902 MHz aux États-Unis. Il dispose de son propre réseau, ce qui permet aux utilisateurs de déployer leurs dispositifs sans besoin d'un grand investissement ni de grandes

**Tableau 2.2** Comparatif entre les réseaux LTE-M1 et NB-IoT. (source : accent systems <sup>31)</sup>

	NB-IoT	LTE-M
Bandé passante	180 KHz	1,08 MHz
Vitesse de téléchargement / transfert	1 Mbps / 1 Mbps	160-250 Kbps / 100-150 kbps
Latence	1,5-10 sec.	10-100 ms
Durée de la batterie	+ 10 ans	5-10 ans
Puissance de transmission	20 / 23 dBm	20 / 23 dBm
Coût par module	5 – 10 €	10 – 15 €
Positionnement	Non	Oui
Pénétration	Extrêmement bonne	Bonne
Voix	Non	Oui

connaissances en télécommunications. Il suffit d'acheter un module radio compatible (à partir de 20 centimes) et d'une souscription au réseau des 47 pays où il est implanté.

Les principaux aspects ou limites à prendre en compte avant de choisir cette technologie sont la taille et le nombre de messages qu'il permet d'envoyer et de recevoir par jour. Actuellement, le nombre maximum de messages à envoyer par jour est de 140, la taille maximale du message étant de 12 bytes. De ce fait, il ne s'agit pas d'une technologie étudiée pour des applications en temps réel ou avec un important besoin d'envoi de données.

#### 2.3.3.2.4 LoRa et LoRaWAN

LoRa est le type de modulation de radiofréquence inventé par Oliver Bernar Andre et breveté par Semtech <sup>33</sup> pour des communications LPWAN à bandes à usage courant. Il fonctionne sous les fréquences de 868 MHz en Europe, 915Mhz en Amérique et 433MHz en Asie. Sa portée va de 10 à 20 km avec une transmission de données jusqu'à 255 bytes.

Par ailleurs, LoRaWAN est un protocole de réseau utilisant la technologie LoRa pour communiquer. Ses principales caractéristiques sont la capacité à créer des réseaux publics et privés à basse consommation, avec un support pour encryption AES-128 et conception de topologie point à point ou en étoile.

Les réseaux LoRaWAN doivent toujours disposer, au minimum, d'un Gateway qui fera office de passerelle et conduira la communication entre les nœuds. Ce protocole peut supporter jusqu'à 62 500 nœuds et écouter jusqu'à 8 nœuds en même temps.

Le principal inconvénient de ce réseau est son coût élevé et le besoin de connaissances pour l'implémentation. Ainsi, alors que Sig Fox dispose déjà d'une infrastructure de réseau où il est uniquement nécessaire d'ajouter le dispositif par le paiement de la souscription, pour LoRa, il est nécessaire de créer l'infrastructure pour son utilisation.



### 2.3.4 MQTT, AMQP et CoAP

Pour clore ce chapitre, nous allons nous pencher sur les principaux protocoles de communication utilisés dans l'IoT. Il convient de souligner que ces protocoles, notamment MQTT et CoAP, n'ont pas été conçus en prenant en compte la sécurité et par conséquent, il existe un risque non négligeable pour la Cybersécurité <sup>34</sup>.

MQTT (Message Queue Telemetry Transport Protocol) est un protocole de messagerie du type publication/souscription développé par Andy Stanford-Clark d'IBM et Arlen Nipper d'ARCOM en 1999. Il est ouvert et a été normalisé ISO (ISO/IEC PRF 20922 <sup>35</sup>).

Il est principalement conçu pour des dispositifs alimentés par des batteries pour former des réseaux de communication de capteurs, bien qu'il puisse être utilisé comme protocole pour d'autres types d'applications, comme par exemple des applications de communication de type Facebook Messenger.

L'architecture MQTT est simple. Un serveur dénommé "Broker" reçoit les communications des clients. La communication repose sur la publication de "sujets". Ceux-ci sont créés par le client qui publie le message. Les noeuds souhaitant les recevoir doivent souscrire au sujet et feront ensuite partie de communications "un à un" ou "un à plusieurs" selon le nombre de noeuds souscrits au "sujet". Cela permet de créer une hiérarchie de clients qui publient et reçoivent des données. Un "sujet" est représenté par une chaîne hiérarchique séparée par le symbole "/".

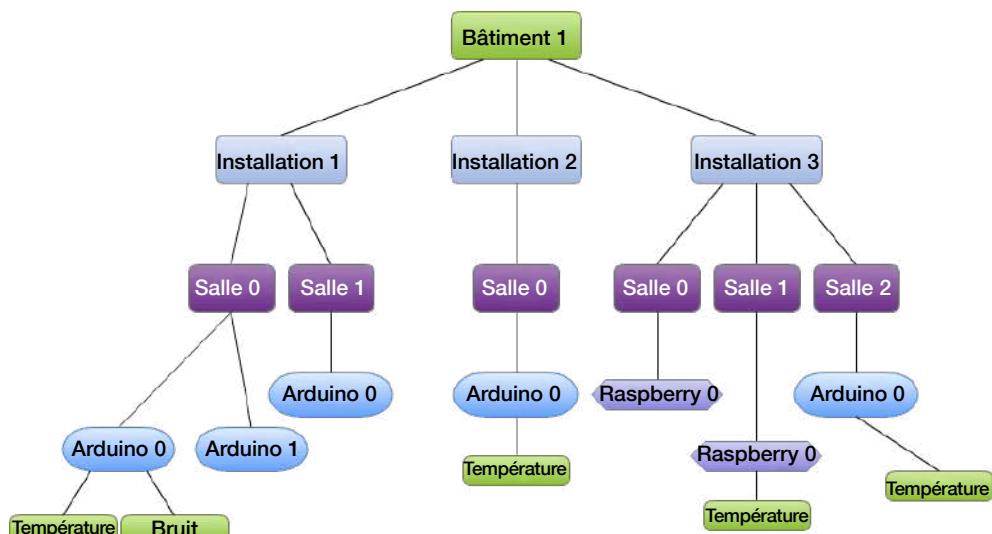


Figure 2.9 Schéma de fonctionnement d'un "topic" MQTT avec la trame qui s'ensuit "bâtiment1/ installation5/salle1/raspberry2/température". (Source : <https://geekytheory.com/que-es-mqtt>)

AMQP (Advanced Message Queuing Protocol) est un autre standard largement accepté dans le monde de l'IoT. Il a été développé par John O'Hara chez JP Morgan <sup>36</sup>. Son développement a été documenté et remis à un groupe de travail (avec des entreprises comme Cisco, Red Hat, Microsoft, Bank of America, Barclays, etc.) pour son amélioration, implémentation et diffusion.

Il s'agit d'un protocole «wire-level» pour des messages type MOM (Message-oriented middleware). Il a été conçu pour supporter la messagerie question/réponse ainsi que celle par abonnement. AMQP stipule le comportement du serveur et des clients en autorisant une interopérabilité très élevée. Cela signifie que tout programme peut créer et interpréter des messages conformément au format de données établi et, par conséquent, tout autre outil respectant ce format peut communiquer indépendamment du langage d'implémentation.

CoAP (Constrained Application Protocol) est un protocole qui se situe au niveau applicatif de la couche OSI. Il a été développé par l'IETF (Internet Engineering Task Force) <sup>37</sup> et a été conçu pour connecter des dispositifs de faible puissance à Internet.

À l'origine, il a été conçu en s'inspirant de http. Il a été étudié pour fonctionner sur UDP sur des réseaux à bas débit et faible disponibilité. Le protocole ajoutait, à UDP, la livraison fiable, le contrôle de congestion et le contrôle de flux.

Par la suite, des mises à jour ont permis le fonctionnement de DTLS (Datagram Transport Layer Security) <sup>38,39</sup> sur TCP, ce qui permet, par rapport à d'autres protocoles comme MQTT, de sécuriser le protocole grâce au DTLS et de le faire fonctionner sur des réseaux à pauvre connectivité ou avec des milliards de nœuds connectés simultanément grâce au TCP.





# Chapitre 3: Captation et contrôle



Dans le chapitre précédent de ce Guide, nous avons passé en revue les fondements des communications industrielles ainsi que les différents protocoles de communication les plus utilisés dans l'industrie céramique, y compris quelques généralités sur les standards de l'Industrie 4.0. Le présent chapitre rassemble les différentes typologies de capteurs et leurs applications dans le processus de fabrication de produits céramiques, avec indication des variables du processus de fabrication qu'il est indispensable de suivre et surveiller pour contrôler correctement les usines de production et jeter les bases du développement d'outils propres à l'Industrie 4.0. Enfin, dans ce même chapitre, nous examinerons les différents systèmes de contrôle automatique qui peuvent être actuellement utilisés dans les étapes du processus de fabrication afin de fermer des boucles de contrôle pour maintenir constantes les variables critiques du processus qui ont un impact direct sur la qualité et les propriétés des produits fabriqués.

### 3.1 Niveaux de contrôle dans l'industrie céramique

De manière générale, les capteurs sont des dispositifs permettant de détecter des changements dans leur environnement, ce qui est utilisé pour mesurer différents types de grandeurs physiques comme la température, la pression, la distance, etc. De plus, dans la majorité des cas, ces dispositifs sont capables de convertir la mesure effectuée en un signal qui peut être envoyé et traité dans d'autres dispositifs électroniques. Aujourd'hui, les capteurs sont utilisés dans une multitude d'objets du quotidien.

Les premières références sur l'utilisation d'éléments capteurs pour la mesure de grandeurs physiques remontent à l'époque de la Renaissance, période au cours de laquelle des expériences ont vu le jour avec des dispositifs capables de fournir des informations sur la température de l'air. Ainsi, en 1592, Galilée a proposé un système basé sur le déplacement d'un liquide à l'intérieur d'un tube hermétiquement fermé, dans lequel la contraction-expansion de l'air quand celui-ci est soumis à des changements de température apportait une indication de cette grandeur. En 1612, l'italien Santorre Santorio a apporté une graduation numérique à l'invention de Galilée et lui a donné un usage médical.

Au cours des XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles, la recherche d'amélioration des éléments de mesure de la température et les recherches menées dans le domaine de l'électricité ont conduit à la découverte, en 1821, de l'effet Seebeck, sur lequel sont basés les thermocouples actuels, et à l'invention de la thermorésistance, au début du XX<sup>e</sup> siècle.

Depuis lors, les évolutions constantes des capteurs ont donné naissance aux capteurs actuels, lesquels permettent de mesurer une grande quantité de grandeurs physiques dans des plages très étendues et diverses, et favorisent le développement de nombreuses applications techniques. Au cours des dernières années, les développements dans le domaine des capteurs se sont focalisés sur l'amélioration des systèmes numériques dérivés de la transformation de signaux, qui permettent les communications à grandes distances en préservant l'intégrité des mesures.

Il existe de multiples classifications possibles pour les typologies de capteurs en fonction de leur principe de mesure, de la grandeur à mesurer, etc. Exemple de classification possible :

- Selon le type de signal reçu, les capteurs peuvent être analogiques ou numériques.

- Selon le type de paramètre variable, ils peuvent être :

- Résistifs
- Capacitifs
- Inductifs
- Magnétiques
- Optiques

- Selon la grandeur ou variable physique ou chimique à détecter, ils peuvent être :

- De position
- De proximité
- De présence
- Tactiles
- Acoustiques
- De déplacement
- De température
- D'humidité
- De vitesse
- D'accélération
- De force et de couple
- De pression
- De déformation
- De lumière
- De débit

L'intégration des capteurs et du contrôle associé à ceux-ci dans l'industrie céramique a progressé en plusieurs étapes, qui ont souvent évolué en parallèle et qui ne se trouvent pas au même degré de développement dans toutes les étapes de production.

Dans l'industrie chimique traditionnelle, le contrôle des processus est plus développé que dans l'industrie céramique. Cela est en grande partie dû au fait que, dans le secteur céramique, le travail porte sur des solides et que le niveau de connaissance que l'on a des opérations unitaires impliquant des solides est bien inférieur à celui que l'on a quand on travaille avec des fluides. Le deuxième point qui complique le contrôle automatique réside dans la nature structurelle du produit céramique, ce qui implique que les caractéristiques finales qui lui sont exigibles ne seront pas uniques, au contraire de la plupart des processus chimiques où le point le plus important est généralement leur composition chimique. Dans le cas des carreaux céramiques, le produit final doit remplir un ensemble de conditions qui vont des exigences purement techniques (faible porosité, résistance à



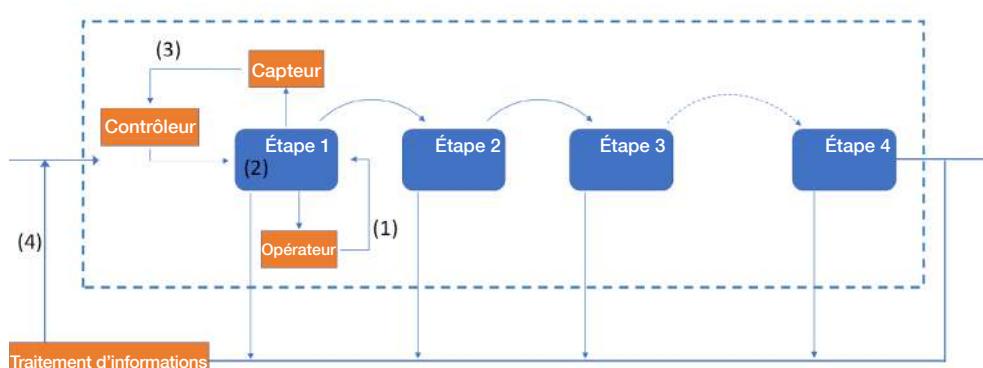
l'usure, etc.) aux exigences esthétiques (brillance, dessin, etc.), qui rendent souvent difficile l'implantation de systèmes de contrôle. Enfin, la grande diversité de produits (modèles) que doit fabriquer une même entreprise est un autre point encore qui pose des difficultés à l'automatisation de ce type d'industries.

Le fait que le processus de fabrication de matériaux céramiques requiert l'exécution consécutive de différentes opérations de base (atomisation, pressage, etc.) sur les matériaux avant obtention du produit final, fait que l'introduction du contrôle automatique aura été lente, en procédant par étapes dans le processus. Ce caractère modulaire du processus fait que les caractéristiques d'un matériau, résultant d'une série d'opérations qui constituent en soi une étape, même si elles n'ont pas un impact déterminant sur le produit final, sont d'une extrême importance puisqu'elles déterminent son comportement à l'étape suivante. Ce matériau résultant d'une étape déterminée et qui est parfois dénommé produit est en réalité une matière première semi-finie qui sera utilisée comme telle dans une phase postérieure du processus (la poudre atomisée, par exemple) ou un produit intermédiaire, qui fera l'objet de transformations postérieures (un support récemment pressé, par exemple).

Afin de quantifier l'implantation du contrôle dans l'industrie céramique, plusieurs «niveaux d'automatisation» (**figure 3.1**) ont été définis. Le contrôle purement manuel se trouverait au niveau inférieur tandis qu'au niveau supérieur figureraient un contrôle automatique global, qui impliquerait toutes les étapes de production ainsi que leurs interactions.

#### Niveau 1 : Contrôle manuel

Le premier niveau de contrôle pourrait être dénommé manuel. À ce niveau de contrôle, un opérateur effectue la mesure d'une ou plusieurs variables et, en fonction des spécifications du produit (consignes), il modifie manuellement une série de variables. Exemples de



**Figure 3.1.** Distribution des niveaux de contrôle dans l'environnement de fabrication de produits céramiques ((1) contrôle manuel ; (2) contrôle de machine ; (3) contrôle de produit ; (4) contrôle global).

ce type d'actions : les fours-tunnels ou de passages anciens, où le contrôle de la température s'effectuait au moyen d'un pyromètre à fil chaud manipulé par un opérateur.

Mais il n'est pas nécessaire de regarder aussi loin dans le passé. Actuellement, dans la plupart des entreprises, le contrôle de l'humidité de la poudre atomisée générée par l'atomiseur se s'effectue en mesurant manuellement, à l'aide d'une balance à infrarouges, et en agissant sur la température de consigne d'un brûleur ou toute autre variable de façon discontinue et manuellement.

### Niveau 2 : Contrôle automatique des variables de machine

La complexité de nombreuses machines actuelles (séchoirs, presses, fours, etc.) fait que toutes comportent un certain niveau de contrôle. Ce contrôle implique des variables de machine, par opposition aux variables de produit, qui sont les caractéristiques du matériau en cours d'élaboration. Ce niveau de contrôle se retrouve sur une multitude d'équipements comme, par exemple, la presse, où la variable de machine qui est contrôlée est la pression de pressage tandis que les variables de produit à régler sont, par exemple, la densité apparente et l'épaisseur de la pièce.

Les niveaux de contrôle ne sont pas associés à des machines, comme on pourrait à priori le penser, mais à des ensembles de variables d'entrée et de sortie. Ainsi, sur l'atomiseur, la paire de variables température des gaz / humidité de la poudre atomisée est contrôlée manuellement (niveau 1) dans la majorité des entreprises, alors que la paire de variables température des gaz / position de la vanne de gaz du brûleur est un clair exemple de contrôle des variables de machine (niveau 2).

Pour ce niveau, il est caractéristique d'utiliser des systèmes de contrôle relativement simples, comme le sont les contrôleurs PID ou les automates programmables PLC. Le développement vertigineux de l'informatique au cours des deux dernières décennies a fait que de nombreuses machines d'une certaine complexité disposent d'ordinateurs intégrés. Ce qui est un peu décourageant, c'est que, malgré la puissance de ces équipements, dans la majorité des cas, ils seront utilisés comme de simples enregistreurs de données alors qu'ils pourraient jouer un rôle beaucoup plus actif.

### Niveau 3 : Contrôle automatique des variables de produit

Au troisième niveau de contrôle se trouve le réglage des variables de produit, en intégrant les capteurs nécessaires. Ce troisième niveau implique au minimum deux domaines de connaissance différents : celui des matériaux et processus et celui de l'instrumentation.

La connaissance des matériaux et des processus impliqués dans la fabrication de frites et carreaux céramiques est suffisamment avancée pour instaurer un système de contrôle dans la majorité des cas. Cela est en partie dû au fait que, pour mettre en place le contrôle, il suffit de disposer d'un modèle d'entrées/sorties listant les modifications qui



se produisent sur une variable de sortie suite aux changements sur une variable d'entrée. Des techniques générales comme la conception d'expériences ou l'identification empirique de paramètres peuvent permettre d'acquérir la connaissance nécessaire pour réaliser un contrôle automatique.

Les plus grandes difficultés du contrôle automatique résident, dans presque tous les cas, dans le fait de disposer du capteur adéquat pour réaliser la mesure ou dans la définition des variables sur lesquelles il faut agir (variables manipulées). Le choix d'un nouveau capteur est généralement un processus complexe puisque celui-ci doit fonctionner avec suffisamment de précision et de robustesse dans un domaine pour lequel, selon toute probabilité, il n'a pas été à l'origine conçu. À titre d'exemples, nous pouvons citer les mesureurs d'humidité à infrarouges, originellement conçus pour la mesure de l'humidité des feuilles de tabac ; les mesureurs de radiofréquence, utilisés dans l'industrie du bois et du plâtre ; ou les capteurs de densité par bulles, appliqués à l'industrie minière.

En poursuivant avec l'exemple de l'atomiseur, le troisième niveau d'automatisation consisterait à contrôler la variable du produit intermédiaire ou semi-fin : l'humidité de la poudre atomisée (par opposition à la variable de machine qu'est la température des gaz).

Dans les cas les plus simples, ce contrôle peut être exécuté avec des contrôleurs PID ou avec des automates programmables. Cependant, dès lors que les équations régissant les processus deviennent de plus en plus complexes, il faut recourir aux ordinateurs. Dans d'autres secteurs industriels, les ordinateurs sont utilisés pour le contrôle anticipatif, prédictif, des systèmes experts ou pour la solution dynamique <sup>40</sup>. Dans tous ces cas, un modèle du processus est implanté dans l'ordinateur ; un modèle pouvant être théorique (basé sur des équations de conservation, des équations de vitesse, des équations thermodynamiques, etc.), empirique (réseaux neuronaux ou équations d'ajustement) ou semi-empirique (basé sur des équations théoriques avec des paramètres d'ajustement déterminés expérimentalement).

À l'heure actuelle, l'utilisation de modèles de ce type n'est étendue qu'aux systèmes de classification automatique de carreaux céramiques. Bien que des travaux aient été développés pour l'application de ces systèmes avancés au contrôle de processus (application de modèles DMC <sup>41</sup> au broyage, simulation dynamique appliquée au séchage de carreaux <sup>42</sup>, ou implantation des diagrammes de compactage pour le contrôle de la densité des pièces en sortie de presse <sup>43</sup>), ces développements ne sont pas très étendus actuellement.

#### Niveau 4 : Contrôle global

Les différentes opérations unitaires qui constituent le processus céramique (broyage, atomisation, pressage, etc.) ne sont pas indépendantes. La sortie d'une opération représente l'entrée de la suivante. Ainsi, le contrôle de l'humidité de la poudre atomisée conditionne la densité des pièces pressées, laquelle, à son tour, influe sur leur contraction pendant la cuisson.

Une exécution incorrecte de l'une quelconque des étapes du processus nuit non seulement au déroulement des étapes suivantes mais également aux caractéristiques des produits intermédiaires (porosité, perméabilité, etc.) ainsi qu'à celles des produits finis. Le processus de fabrication de carreaux céramiques doit être considéré comme un ensemble d'étapes interconnectées qui transforment progressivement les matières premières en un produit fini <sup>44</sup>. Le contrôle automatique ne peut ni ne doit se limiter à des étapes individuelles. Le contrôle global du processus est une philosophie dont l'application permettrait de disposer d'informations (et pas seulement de données) du processus, d'optimiser globalement la fabrication de carreaux et de détecter les points faibles.

L'industrie céramique commence à aborder ce quatrième niveau, bien que ce ne soit que les prémixes et que cela concerne surtout l'acquisition d'informations. Les entreprises disposant d'un système centralisé dans lequel les opérateurs de chaque étape saisissent les données du processus sont de plus en plus nombreuses. Le nombre de pièces traitées est indiqué et il existe un suivi des pièces tout au long du processus. De plus, des aspects clés pour atteindre ce niveau ont maintenant commencé à être abordés par certains fabricants. Ainsi, aujourd'hui, dans de nombreux cas, l'intercommunication des machines est viable du fait que les fabricants de machines utilisent des protocoles de communications de plus en plus ouverts et normalisés. Ce n'est que dans quelques cas précis que des protocoles fermés sont toujours utilisés de façon à garantir une exclusivité : personne, à l'exception du fabricant, ne pourra établir des communications avec la machine ou l'intégrer dans un réseau plus grand.

Un contrôle global devrait envisager également une action intégrale, autrement dit la manipulation de variables et non uniquement l'acquisition des informations. La technologie existante à ce jour permet de franchir ce pas.

### **3.2 Contrôle et automatisation des différentes étapes du processus**

Bien que, comme commenté précédemment, les niveaux de contrôle global plus avancés soient encore peu implantés dans le processus de fabrication de carreaux céramiques, il est vrai qu'au cours des dernières années, il y a eu de nets progrès dans le domaine de l'automatisation des contrôles des variables de produit. Ces avancées permettent aujourd'hui, dans quasiment toutes les étapes du processus de fabrication, de réaliser un contrôle automatique des variables critiques de processus. Nous verrons par la suite, pour chacune des étapes du processus de fabrication, quelles sont les technologies de contrôle qui pourraient être déployées dans les usines de fabrication, lesquelles servent, en quelque sorte, à finir par consolider les niveaux de contrôle les plus bas préalablement à l'implantation de systèmes avancés de contrôle dans les étapes suivantes du processus de transformation vers l'Industrie 4.0.



Les informations exposées sont regroupées lors des étapes suivantes de fabrication :

- Préparation de compositions
- Façonnage (pressage + séchage)
- Émaillage et décoration
- Cuisson
- Rectification et classification

Ces étapes sont articulées d'une manière générale autour du schéma représenté sur la **figure 3.2**. Pour chaque section, sont compilées les technologies de contrôle automatique les plus significatives et sont établies les données minimum qu'il est jugé indispensable d'acquérir dans chacune d'elles pour assurer les bases de la transformation vers l'Industrie 4.0 dans les fabriques de carreaux.

Le recueil de ces données minimales, en continu et de façon automatisée, permettra d'implanter un "jumeau numérique", qui sert de source unique d'information pour la gestion des opérations en usine.

### 3.2.1 Préparation de compositions

La section de préparation de compositions comprend généralement une première étape de broyage en continu par voie humide à l'aide de broyeurs à billes puis un séchage par atomisation de la suspension résultante pour l'obtention de la poudre atomisée à utiliser dans le façonnage des supports.

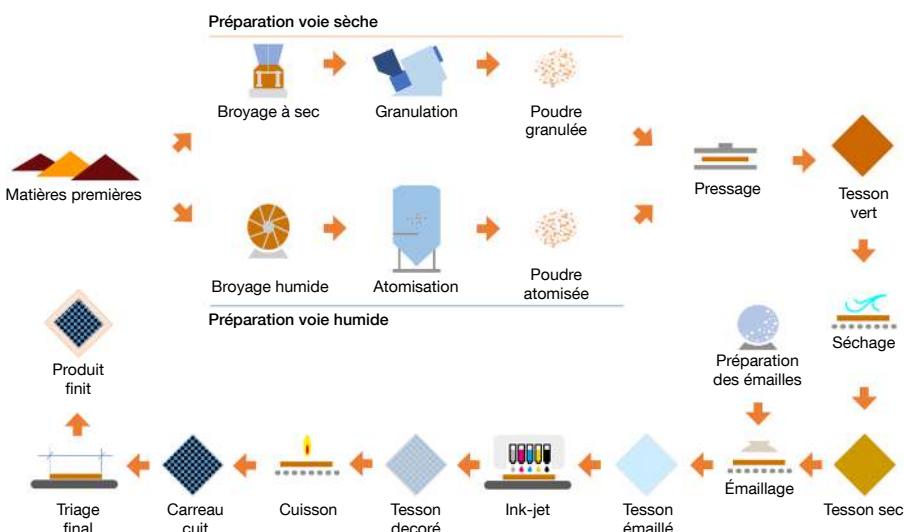


Figure 3.2. Étapes du processus de fabrication de carreaux céramiques par voie humide.

### **3.2.1.1 Gestion des informations dans la section de préparation de compositions**

Le degré d'automatisation des opérations de production de cette section est habituellement très élevé, avec une très faible intervention des opérateurs au niveau du réglage. Cependant, en général, il apparaît que les systèmes de recueil de données critiques de traitement et leur envoi vers un système d'information supérieur sont peu élaborés. Ainsi par exemple, bien que, dans les fabriques, les broyeurs en continu soient généralement dotés de différentes boucles de contrôle automatique, comme celles qui seront décrites par la suite, les données générées par celles-ci restent dans le propre système de gestion de l'équipement, sans être exploitées à un niveau supérieur. Par conséquent, il est intéressant de pouvoir développer des interfaces de visualisation particulièrement adaptées aux besoins de la section pour pouvoir faire ressortir rapidement des états anormaux de fonctionnement des équipements ou des variables d'opération.

En général, dans les usines d'atomisation, il existe un manque d'informations par rapport aux rendements de production des installations, même s'il est vrai qu'il existe des éléments comme les convoyeurs peseurs installés à la sortie de certains atomiseurs, qui permettent d'atteindre un niveau de contrôle suffisant. En ce sens, il est jugé opportun de pouvoir habiller des outils de collecte de données pour contrôler en temps réel les rendements de production des installations, lesquels outils stockent en même temps les informations pour pouvoir les analyser a posteriori, rapidement et dans le détail. Ainsi, cela permettrait de disposer d'informations d'une plus grande valeur que celles obtenues sur la base d'un contrôle routinier des rendements, habituellement réalisé manuellement à partir des données moyennes communiquées par les différents systèmes de contrôle. Un grand nombre des variables qui permettraient cette gestion intégrée des rendements se trouve dans les propres systèmes de contrôle des broyeurs et atomiseurs. Dans le cas du broyeur, souvent, l'outil de visualisation fourni par le propre système de gestion ou SCADA des équipements, donne des informations sur les temps de marche et d'arrêt, les alarmes de fonctionnement et les quantités de produit traitées. Ces données, dûment intégrées, peuvent être utilisées pour calculer les rendements de production et générer des indicateurs qui seront utiles à l'optimisation des processus de fabrication.

Par rapport aux variables relatives à la qualité ou aux caractéristiques des produits traités, en général, un défaut d'élaboration est également détecté, aussi bien dans la mesure ou la collecte des données que dans le traitement ultérieur de ces données pour générer des informations qui faciliteront la prise de décision. Même si une automatisation de l'introduction de données peut être un premier pas pour garantir le flux d'informations vers des systèmes intégrés de gestion de données, il est indispensable de commencer à valoriser l'utilisation de systèmes de mesure en continu des variables de processus, comme ce qui est exposé dans le paragraphe suivant. Pour certaines d'entre elles comme, par exemple, la taille de particule des suspensions suite au broyage ou la taille du grain d'atomisation, nous ne disposons pas encore de techniques validées au niveau industriel et à des coûts contenus qui permettront d'effectuer la mesure. Cependant, pour d'autres variables comme la densité et la viscosité de la barbotine ou l'humidité de la poudre ato-



misée, il existe des transducteurs suffisamment solides et éprouvés pour pouvoir les intégrer aux systèmes de production. En tout cas, il faut tenir compte que l'intégration de ces éléments de mesure doit aussi être accompagnée de l'implantation d'un système adéquat de gestion de l'information, pour que les données générées soient présentées d'une façon appropriée et adaptée à ses utilisateurs.

Aux observations ci-dessus, il faut ajouter qu'il existe rarement un système souple permettant de réaliser un suivi en temps réel de l'évolution des ordres de production ou de fabrication par rapport à la planification établie. L'existence d'un système qui se chargera de réaliser ce suivi et cette gestion est indispensable pour assurer une bonne traçabilité de la production afin d'analyser ensuite les opérations de production pour générer des informations de valeur qui permettront d'optimiser son développement. Dans un état avancé d'implantation des standards de l'Industrie 4.0, les ordres de fabrication ou les lots de production à exécuter devraient être numérisés pour que les opérateurs ou les responsables de département puissent indiquer le moment du début de la fabrication et associer toutes les informations de traitement générées à l'ordre de fabrication. Cet ordre de fabrication pourrait même être utilisé pour que l'équipement charge automatiquement les paramètres de fonctionnement et, si les informations sont transférées numériquement au reste des étapes du processus, il permettrait aux travailleurs d'autres postes de connaître les informations de traitement qui pourraient leur être utiles dans l'exercice de leur travail. À titre d'exemple, si les informations critiques de traitement de la section préparation de compositions sont correctement associées et disponibles, au moment où la poudre fabriquée arrive au poste de pressage, il sera possible de connaître à l'avance les anomalies détectées dans des variables comme l'humidité de la poudre atomisée.

### **3.2.1.2 Systèmes de contrôle automatique de variables critiques dans la préparation de compositions**

#### **3.2.1.2.1 Broyage par voie humide**

L'objectif du broyage est d'obtenir une suspension homogène de solide dans l'eau avec une distribution de taille de particule (DTP) adéquate pour l'exécution des étapes postérieures (pressage, séchage, etc.), compatible avec une quantité de solides élevée et une viscosité adéquate pour que le déroulement de l'opération de séchage par atomisation soit optimum <sup>45</sup>.

La distribution de la taille des particules du solide qu'intègre la suspension conditionne le comportement de la pièce pendant son traitement (compactage, diffusion, etc.) et détermine certains paramètres de la pièce achevée (dimensions finales, porosité, etc.). La mesure de la distribution de la taille des particules est complexe et coûteuse, raison pour laquelle, au niveau industriel, exploitation est faite du lien étroit existant, pour un matériau déterminé et un type de broyeur, entre la DTP et la quantité de grosses particules du solide pour différents temps de broyage. En effet, le broyage par voie humide réduit majoritairement la taille des grosses particules, en resserrant la DTP, ce qui fait que la mesure

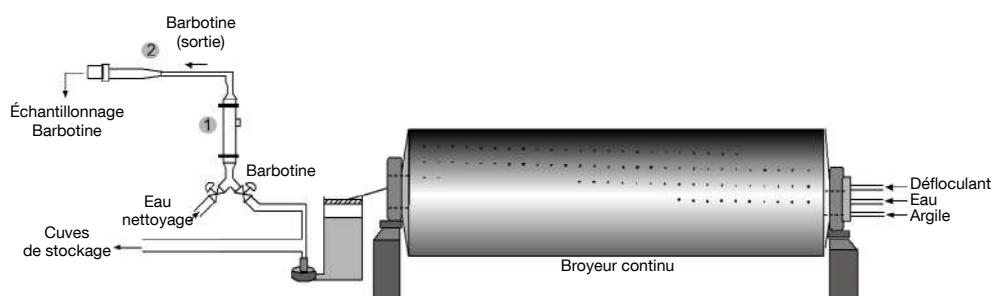
du rejet (communément appelée le criblage sur un tamis) permet, par un simple essai, de contrôler l'opération de broyage.

La densité détermine dans une grande mesure le rendement énergétique de l'étape d'atomisation et, par conséquent, elle doit avoir la valeur la plus élevée possible. Cependant, pour une composition donnée, lorsque la densité augmente, la viscosité aussi, et des viscosités élevées rendent difficile la vidange du broyeur, peuvent conduire à l'apparition d'anomalies dans le broyeur (formation de croûtes ou agglomérats de billes), diminuent la vitesse de tamisage et influent négativement sur l'atomisation. Pour toutes ces raisons, lors de l'étape de broyage, on essaie d'obtenir une densité de la suspension la plus élevée possible, en maintenant une viscosité constante qui permettra le traitement de la suspension.

Actuellement, ces variables sont mesurées manuellement par un opérateur. Dans le broyage, il faut distinguer le broyage effectué dans des broyeurs en continu du broyage effectué dans des broyeur en discontinu type Alsing. L'automatisation est beaucoup plus facile à réaliser dans les premiers que dans les seconds. Par conséquent, dans ce paragraphe, la discussion sera axée sur les broyeurs en continu.

Les variables machine (débits d'argile, d'eau et de défloculant) sont mesurées automatiquement. Selon la différenciation dans les niveaux, comme présentée dans le paragraphe 1, on pourrait considérer que le broyage en continu se trouve au niveau 2.

Au cours des dernières années, un effort important a été porté sur la mise en place du contrôle automatique de la densité et de la viscosité, en laissant de côté le contrôle du résidu [46,47](#). L'idée du contrôle automatique sur les broyeurs en continu consiste à mesurer en continu la densité et la viscosité de la suspension et à agir sur les débits d'eau et de défloculant ([figure 3.3](#)).



**Figure 3.3.** Schéma pour la mesure industrielle et en continu de la densité et de la viscosité de la suspension à la sortie d'un broyeur en continu. (1) densimètre/débitmètre massique; (2) viscosimètre.



La principale difficulté du contrôle automatique de cette opération réside dans la mesure fiable de la densité et de la viscosité et, par conséquent, dans l'utilisation de capteurs appropriés. À l'heure actuelle, la mesure de la densité industrielle de suspensions peut dès lors être considérée comme un problème résolu avec l'utilisation de densimètres à effet de Coriolis ([figure 3.4](#)).

La tendance à venir du contrôle de cette étape passerait par la conception d'un système de contrôle avancé qui mesurerait la densité, la viscosité et même la DTP. Les difficultés sont multiples : interaction entre les boucles de contrôles de densité et viscosité, mise au point d'un capteur de viscosité, etc. L'incorporation de la taille, bien que techniquement possible, pose des difficultés dont la résolution n'est pas prévue à court terme. Le système de contrôle devrait nécessairement être suffisamment intelligent pour gérer l'interaction entre toutes les variables, ce qui n'est pas possible en utilisant des contrôleurs PID exclusivement.

### 3.2.1.2.2 Séchage par atomisation

Le séchage par atomisation de la suspension préparée après le broyage est le procédé de granulation le plus répandu dans le secteur des carreaux céramiques en Espagne et en Italie pour obtenir la poudre de presses. Les variables les plus importantes de la poudre de presses sont au nombre de deux : sa teneur en humidité et la distribution de la taille des agglomérats obtenus ou granulométries (DTG).

L'humidité détermine, avec la pression maximale de compactage, la densité apparente de la pièce pressée qui, comme nous le verrons par la suite, est une des variables les plus importantes de l'ensemble du processus de production. Le rapport quantitatif entre densité, pression de pressage et humidité est le fameux diagramme de compactage <sup>48</sup>.



**Figure 3.4.** Densimètre/débitmètre massique à effet de Coriolis (à gauche) et viscosimètre (à droite) utilisés dans le contrôle du broyage de suspensions céramiques.

La distribution de taille des granules (DTG) détermine la fluidité de la poudre, laquelle fluidité influe sur leur comportement, principalement pendant le remplissage de l'alvéole de la presse <sup>49,50</sup>. Une fluidité adéquate de la poudre conduit à un remplissage homogène de l'alvéole de la presse et à une distribution uniforme de la densité apparente du support compacté. Si la densité apparente n'est pas uniforme, le comportement du support pendant son traitement le sera également et, ce qui est le plus important, la géométrie du produit final sera la géométrie appropriée. Qui plus est, une DTG inadéquate peut produire des variations dans la distribution d'humidité (les gros granules sont aussi les plus humides) et la ségrégation des granules pendant le transport et le stockage dans les silos. En cas de mélange de granules de différentes couleurs, la présence de ségrégation peut conduire à l'apparition de tonalités sur les pièces.

Au cours des dernières années <sup>51,52</sup>, d'importantes avancées ont eu lieu dans le contrôle des variables température de consigne de gaz / humidité de la poudre atomisée. Actuellement, nombreuses sont les entreprises qui disposent de mesureurs à infrarouge, avec un échantillonneur de poudre atomisée pour le suivi de l'humidité, bien que soient moins nombreuses celles qui utilisent ce signal pour fermer la boucle de contrôle, et non seulement pour mesurer mais aussi contrôler l'humidité. Le contrôle de l'opération d'atomisation peut s'effectuer soit en modifiant la température des gaz de séchage, sur la base des changements d'humidité détectés sur la poudre fabriquée, soit en agissant sur le débit de la suspension injectée dans la chambre de séchage. L'action de contrôle réalisée

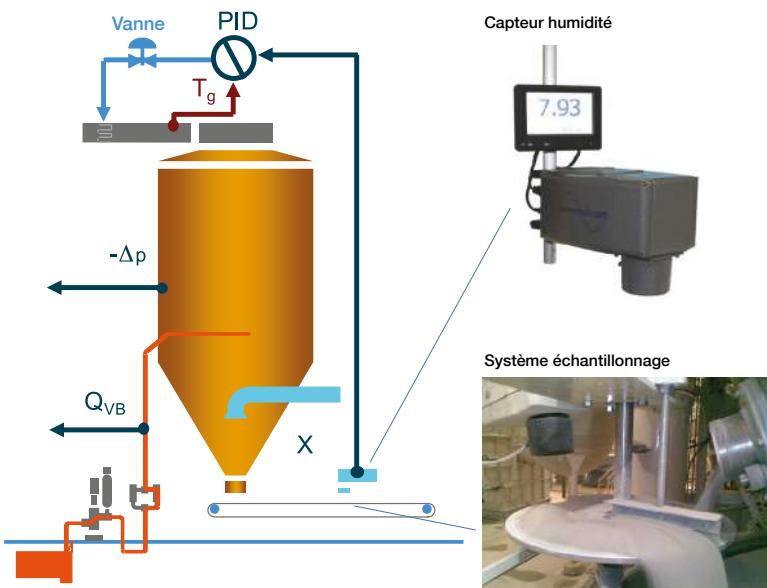


Figure 3.5. Contrôle automatique de l'humidité de la poudre à la sortie de l'atomiseur.



sur le débit de la suspension a l'avantage d'être plus rapide que celle correspondant au changement de température des gaz de séchage. En effet, les grandes dimensions des atomiseurs impliquent une inertie thermique très élevée qui génère de longs temps de réponse quand le système de contrôle repose sur la modification de la température des gaz. Cela ne se produit pas quand le contrôle s'aborde par la modification du débit de la suspension, ce qui suppose un changement quasiment immédiat de l'humidité de la poudre fabriquée. L'inconvénient de l'utilisation du débit de barbotine comme variable de contrôle est le léger changement de capacité de production de l'atomiseur que peut supposer la modification de la quantité de suspension introduite dans la chambre de séchage. Récemment, des expériences ont également démontré la possibilité de contrôler l'atomiseur en modifiant le débit de gaz chauds, alimenté par l'action sur la vitesse de rotation du ventilateur de colle du système.

La distribution granulométrique pourrait être mesurée automatiquement. Cependant, deux facteurs rendent difficile le contrôle de cette variable : d'une part, le coût élevé des capteurs et, d'autre part, le fait que, avec la conception actuelle des atomiseurs, et notamment des buses, il n'est pas possible de modifier facilement la distribution granulométrique.

### 3.2.1.3 Données minimales à intégrer dans la section de préparation de compositions

Enfin, pour conclure avec la révision des aspects relatifs à la section de préparation de compositions, le **tableau 3.1** reprend les informations minimales jugées nécessaires à une gestion correcte des opérations de cette section. Ces informations sont regroupées sur la base de quatre domaines : rendements et gestion de production, variables de processus, consommation de ressources et coûts variables. Disposer de ces informations permettrait de jeter les fondements de la définition d'un "jumeau numérique" de cette première phase du processus, qui pourrait être intégré à un "jumeau numérique" du processus de fabrication complet.

**Tableau 3.1.** Informations minimales requises dans la section de préparation de compositions pour jeter les fondements du "jumeau numérique" du processus de fabrication.

Tableau 3.1.1	Dosage, broyage en continu et cuves de brassage
Niveau d'information	Données/description
<b>RENDEMENTS ET GESTION DE PRODUCTION</b>	Ordre de production, référence de lot ou trace de production
	Avancée ordre de fabrication par rapport à planification (%)
	Disponibilité (D) = Temps de production / Temps disponible (%)
	Rendement (R) = Production réelle / Production théorique (%)
	Qualité (C) = Quantité suspension écartée / Suspension produite (%)
	Distribution motifs d'arrêt
<b>VARIABLES DE PROCESSUS</b>	OEE = D x R x C (%)
	Humidité matières premières (%)
	Densité des eaux de broyage et de la suspension résultante (kg/m <sup>3</sup> )
	Débit massique des eaux de broyage alimentées dans le broyeur (kg/s)
	Débit massique des solides alimentés dans le broyeur (kg/s)
	Débit massique de défloculant (kg/s)
	Débit massique des courants de solide dosés depuis des silos primaires (kg/s)
	Viscosité de la suspension résultante (cp)
	Teneur en solides de la suspension fabriquée (%)
	Température de la suspension fabriquée (°C)
	Débit massique de suspension fabriquée (kg/s)
	Rejet taille particule (%)
	État marche/arrêt broyeur (Booléen)
	Vitesse de rotation du broyeur (tr/min.)
	Mode de vibration du broyeur (m/s <sup>2</sup> )
	État marche/arrêt agitateurs cuve (Booléen)
	Temps repos suspensions dans cuves (h)
<b>CONSOMMATION DE RESSOURCES</b>	Vitesse de rotation agitateurs (tr/min)
	Température barbotine dans cuves (°C)
	Consommation d'eaux de broyage (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> de suspension ou m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> de produit fini)
	Consommation de matières premières (kg/m <sup>3</sup> de suspension ou m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> de produit fini)
	Consommation de défloculant (kg/m <sup>3</sup> de suspension ou m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> de produit fini)
<b>COÛTS VARIABLES</b>	Consommation électrique du broyage et systèmes auxiliaires (kW h/kg de suspension ou KW h/m <sup>2</sup> de produit fini)
	Consommation RH (personnes/équipe ou personnes/ m <sup>2</sup> de produit fini)
	Coût matières premières (€/m <sup>3</sup> de suspension ou €/m <sup>2</sup> de produit fini)
	Coût électricité (€/m <sup>3</sup> de suspension ou €/m <sup>2</sup> de produit fini)
	Coût RH (€/m <sup>3</sup> de suspension ou €/m <sup>2</sup> de produit fini)



Tableau 3.1.2	Atomisation et stockage en silos
Niveau d'information	Données/description
RENDEMENTS ET GESTION DE PRODUCTION	Ordre de production, référence de lot ou trace de production
	Avancée ordre de fabrication par rapport à planification (%)
	Disponibilité (D) = Temps de production / Temps disponible (%)
	Rendement (R) = Production réelle / Production théorique (%)
	Qualité (C) = Quantité poudre atomisée écartée / Poudre atomisée produite (%)
	Distribution motifs d'arrêt
	OEE = D x R x C (%)
VARIABLES DE PROCESSUS	Humidité poudre atomisée (kg eau/kg poudre (%))
	Température de la poudre atomisée produite (°C)
	Distribution de la taille de granule (%)
	Débit massique de la poudre atomisée produite (kg/s)
	Débit massique de suspension alimentée (kg/s)
	Densité de la suspension alimentée (kg/m³)
	Viscosité de la suspension alimentée (cp)
	Pression de pompage de la suspension (bar)
	État marche/arrêt des pompes (Booléen)
	Teneur en solides de la suspension alimentée (%)
	Température de la suspension alimentée (°C)
	Température des gaz de séchage (°C)
	Débit des gaz de séchage (Nm³/s)
	Température entrée air dans refroidisseur de bouche (°C)
	Pression statique dans la chambre de séchage (Pa)
	Pression différentielle entre chambre de séchage et entrée ventilateur de colle (Pa)
	Vitesse de rotation du ventilateur de colle (tr/min.)
	Température sortie gaz avant refroidisseur ou filtre (°C)
	État marche/arrêt atomiseur (Booléen)
	Teneur poudre atomisée dans silo (%/silo ou kg/silo)
CONSOMMATION DE RESSOURCES	Consommation de suspension (m³/kg poudre atomisée ou m³/m² de produit fini)
	Consommation de gaz naturel (Nm³/kg poudre atomisée ou Nm³/m² de produit fini)
	Consommation électrique dans atomisation et systèmes auxiliaires (kW h/kg poudre atomisée ou kW h/m² de produit fini)
	Consommation RH (personnes/équipe ou personnes/m² de produit fini)
COÛTS VARIABLES	Coût matières premières (€/kg poudre atomisée ou €/m² de produit fini)
	Coût électricité (€/kg poudre atomisée ou €/m² de produit fini)
	Coût gaz naturel (€/kg poudre atomisée ou €/m² de produit fini)
	Coût RH (€/kg poudre atomisée ou €/m² de produit fini)

Une partie des informations du **tableau 3.1** peut être obtenue à partir des variables mêmes de traitement indiquées dans le tableau. Cependant, il est indispensable de disposer des données additionnelles indiquées dans le **tableau 3.2** pour élaborer correctement toutes les informations indiquées. Ce tableau présente, avec la donnée additionnelle en question, l'origine ou la source de données à partir de laquelle elle pourrait être obtenue.

**Tableau 3.2.** Données additionnelles requises pour l'obtention des informations minimales nécessaires à la définition du "jumeau numérique" dans la section de préparation de compositions.

Niveau d'information	Données	Origine des données
<b>RENDEMENTS ET GESTION DE PRODUCTION</b>	Temps de marche équipements (h)	Automate de gestion et automatisation ou système externe de comptage
	Production planifiée (m <sup>3</sup> ou kg)	Information ERP ou système gestion
	Production théorique équipements (kg ou m <sup>3</sup> /s)	Information ERP ou système gestion
	Production théorique cumulée (kg ou m <sup>3</sup> )	Automate de gestion et automatisation ou système externe de comptage
	Pertes de production (kg ou m <sup>3</sup> )	Imputées manuellement ou enregistrées automatiquement par des compteurs
	Motifs d'arrêt	Imputés par les opérateurs ou directement obtenus d'automates
	Motifs de perte	Imputés par les opérateurs ou directement obtenus d'automates
<b>CONSOMMATION DE RESSOURCES</b>	Proportion théorique m <sup>3</sup> suspension/ m <sup>2</sup> de produit fini	ERP, fiche de produit ou système de gestion
	Proportion théorique kg poudre atomisée / m <sup>2</sup> de produit fini	ERP, fiche de produit ou système de gestion
	Répartition de personnel	ERP ou système de gestion de RH
	Équipe de travail ou équipe postée active	ERP ou système de gestion de RH
	Consommation gaz naturel atomiseur (m <sup>3</sup> )	Compteur de gaz numérisé
	Température gaz naturel (°C)	Pt-100 compteur de gaz numérisé
	Pression alimentation gaz naturel (Pa)	Transducteur pression compteur de gaz numérisé
<b>COÛTS VARIABLES</b>	Consommation électrique équipements (kW h)	Analyseurs de réseau numérisés
	Prix matières premières et additifs (€/kg)	ERP ou système de gestion
	Prix électricité (€/kW h)	ERP, contrat fournisseur ou "scraping" web
	Prix gaz naturel (€/kW h)	ERP, contrat fournisseur ou "scraping" web
	Prix moyen RH assignées (€/per)	ERP ou système de gestion
	Pouvoir calorifique gaz naturel (kW h/ Nm <sup>3</sup> )	ERP, contrat fournisseur ou "scraping" web



En alliant ces variables à, d'une part, la connaissance en temps réel des états de marche/arrêt et/ou alarme de l'équipement et, d'autre part, à l'information relative à la traçabilité des ordres de fabrication, il serait possible de connaître précisément et en temps réel les informations de gestion indiquées dans le **tableau 3.1** pour chaque lot de production.

Le bon stockage dans un système structuré de bases de données de toutes les informations collectées dans les tableaux précédents permettra, a posteriori, d'analyser des lots de production précis, pourvu que leur traçabilité puisse être assurée.

### 3.2.2 Façonnage

Le façonnage des supports pour carreaux céramiques s'effectue dans des presses hydrauliques de différentes capacités en fonction de la dimension des pièces à traiter. Ces presses sont alimentées en poudre atomisée issue de la section de préparation de compositions ou des installations d'un fournisseur auquel est directement achetée la poudre atomisée sous forme de matière première semi-finie afin d'externaliser la préparation de la pâte. Préalablement à son traitement dans la section de façonnage, la poudre atomisée est soumise à un temps de repos dans une batterie de silos, afin d'homogénéiser, dans la mesure des possibilités, sa teneur en humidité. Dans chaque presse, la poudre atomisée est introduite, à l'aide d'un système d'alimentation, dans les alvéoles d'un moule métallique dont la forme et le mode de fonctionnement dépendent des caractéristiques du produit et de la presse utilisée. Sous l'action de la force transmise par le circuit hydraulique de la presse aux poinçons du moule, la densité de la poudre augmente progressivement et donne la forme désirée. Les pièces résultantes sont extraites du moule et introduites dans une série de séchoirs, généralement un par presse, dans lesquels la teneur en humidité est réduite et la résistance mécanique est améliorée afin que les pièces puissent être ensuite transférées vers les lignes d'émaillage et de décoration.

En règle générale, les moules et poinçons utilisés dans les sections de façonnage des entreprises de carreaux céramiques sont fabriqués, fournis et réparés par des fournisseurs externes. Dans certains cas, le fournisseur des presses peut être également celui des moules et de l'outillage associé aux poinçons.

#### 3.2.2.1 Gestion de l'information dans la section de façonnage

Le niveau d'automatisation des opérations de production dans la section de façonnage, comme dans l'étape de préparation de compositions, est très élevé, avec une très faible intervention des opérateurs pour le réglage des opérations. Cependant, en général, on observe un manque d'élaboration au niveau des systèmes de collecte de données critiques de traitement et de leur envoi vers un système d'information supérieur. Ainsi, par exemple, bien que les presses puissent être habilitées par le fabricant pour exposer, via un protocole standard de communication, une grande quantité de données relatives à leur fonctionnement, ces données restent généralement dans le système même de gestion de l'équipement, sans être exploitées à un niveau supérieur.

Actuellement, les presses les plus avancées disposent de systèmes d'information permettant de visualiser l'évolution de certains paramètres de fonctionnement jusqu'à un niveau de détails relativement élevé. Or, il n'est pas habituel que ces outils soient utilisés de façon générale pour améliorer la gestion des opérations du fait qu'il ne sont pas intégrés à un niveau supérieur de contrôle et que leur utilisation n'est pas très conviviale. C'est pourquoi, il paraît très intéressant de pouvoir développer des interfaces d'affichage spécialement adaptées aux besoins de la section afin de pouvoir mettre rapidement en évidence des états anormaux de fonctionnement des équipements ou des variables d'opération, en évitant d'avoir à réaliser des suivis sur la base d'informations collectées manuellement et gérées avec des applications informatiques basées sur des feuilles de calcul ou moyens similaires. Ainsi, à titre d'exemple, la planification d'opérations de maintenance, au lieu de reposer sur des informations collectées de façon routinière à partir des rapports de travail sur papier, pourrait être effectuée directement par la capture de données transmises par la presse même, ce qui permettrait de digitaliser et automatiser très simplement ces tâches.

Quant au contrôle de variables critiques du processus, comme nous le verrons dans le paragraphe suivant, à ce jour, nous disposons d'une instrumentation avancée pour procéder aux contrôles de fabrication et de qualité qui s'imposent. Ainsi, par exemple, il est possible de mesurer de façon non destructive le degré de compactage des supports fabriqués, en utilisant une méthode rapide et flexible basée sur la mesure par absorption de rayons X de la distribution de densité, d'épaisseur et de charge des supports pour réaliser les réglages de presse et les mises en œuvre de nouvelles dimensions et/ou modèles. Il est également possible d'effectuer une mesure automatisée de l'humidité de la poudre atomisée alimentée dans les presses, laquelle mesure constitue un paramètre très important dans le processus de façonnage.

Concernant le reste de paramètres d'opération dans les sections de façonnage, il est important de s'arrêter sur la mesure des dimensions des produits crus et cuits, ces dimensions étant utilisées pour vérifier le bon réglage des conditions de façonnage. Pour les produits de revêtement de sol, la mesure dimensionnelle des supports cuits, obtenue à partir de tests ponctuels effectués par les opérateurs des sections de façonnage, est utilisée pour évaluer l'éventuelle présence de défauts d'équerrage et jauges entre les pièces obtenues dans un même cycle de pressage. Bien que des systèmes automatisés de mesure sans contact des dimensions des pièces aient commencé à être implantés, on utilise généralement des tables de mesure basées sur le positionnement de palpeurs mécaniques actionnés manuellement par les opérateurs, pouvant introduire des incertitudes significatives dans les mesures effectuées.

En tout cas, indépendamment du système de mesure utilisé pour contrôler les variables critiques de processus, on observe une absence de traitement des données obtenues, lesquelles sont collectées sur des rapports papier et ponctuellement introduites dans des outils de gestion de qualité ou l'ERP. Il serait nécessaire que les flux de données associées aux contrôles des variables de processus soient dûment automatisés et tracés pour pouvoir commencer à mettre en place des outils d'analyse qui permettront de générer des informations de valeur à partir de ces flux.



Par rapport au séchage des supports, on note un faible niveau de développement dans des systèmes de contrôle et surveillance de paramètres et variables liés à cette opération. Bien que disposant des mesures des variables de processus importantes pour le bon déroulement de la étape suivante de décoration, comme la température des supports, celle-ci est utilisée à titre indicatif et de façon ponctuelle, sans qu'il existe un enregistrement permettant de les exploiter, que ce soit pour améliorer le fonctionnement du séchoir ou pour obtenir des informations permettant d'expliquer les déficiences observées dans le processus de décoration. Le paragraphe suivant montre qu'il existe actuellement des moyens technologiques suffisamment développés pour aborder cette problématique.

Du point de vue de la détermination et gestion des rendements de production, il y a de toute évidence un manque de données significatif puisque, de manière générale, seuls sont déterminés ponctuellement les rendements des presses à partir de relevés manuels du nombre de cycles réalisés quotidiennement par la presse ou même parfois hebdomadairement, mais sans prendre en considération les disponibilités de machine et les qualités de produit. Nous pensons que, de façon relativement simple, il serait possible d'améliorer ce point afin d'avoir un registre des motifs d'arrêt machine et de pouvoir générer des informations de valeur pour optimiser les opérations de productions. Pour ce faire, il est nécessaire de disposer d'une gestion numérisée des ordres de fabrication à travers des outils propres à l'entreprise ou des systèmes ERP, gestion qui servira de base à l'intégration des informations de production à des niveaux supérieurs de contrôle. Bien évidemment, cette intégration devra être exploitée pour permettre un bon suivi des paramètres et des variables de processus afin de pouvoir établir des relations entre celle-ci, pour générer de la connaissance et de la transparence sur les événements survenus au cours du déroulement des opérations.

Le processus de fabrication de carreaux céramiques ne permet pas actuellement la traçabilité du produit fabriqué dans les processus internes des entreprises. Cela est essentiellement dû au fait que, bien que ce ne soit pas criant, le processus n'est pas un processus de fabrication continue à l'usage. En effet, l'existence, dans la plupart des usines, d'une zone tampon ou parc intermédiaire où sont stockés le produit cru avant cuisson et le produit cuit avant sa classification finale, rend difficile un bon suivi de la production. Cependant, il existe actuellement des expériences industrielles qui ont permis de développer des systèmes spécifiques pour garantir la traçabilité du produit fabriqué. Parmi les différentes possibilités pour tracer la production, l'option la plus adaptée aux besoins du processus céramique a été le marquage à l'aide de codes bidimensionnels DataMatrix (DM) au dos des pièces fabriquées.

Comme l'illustre le schéma de la **figure 3.6**, le système dans son ensemble compte, d'une part, une tête d'impression (1) placée à la sortie de la presse et marquant les pièces traitées d'un identifiant unique (2) et, d'autre part, une série de caméras de détection (3) positionnées sur les lignes de fabrication, aux points où l'entreprise souhaite contrôler les pièces.

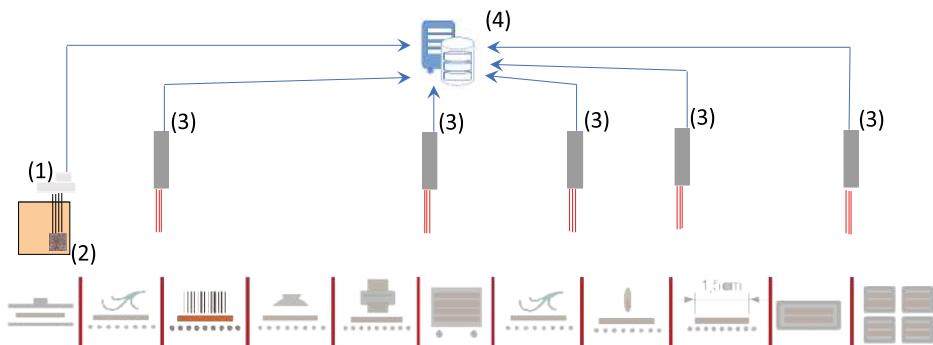


Figure 3.6. Schéma du fonctionnement du système de traçabilité développé.

Le système enregistre, dans un ensemble de bases de données (4), le moment exact où chaque pièce passe par un point déterminé de la ligne de fabrication. Ainsi, il est ensuite possible de connaître les conditions de traitement et le reste des événements qui se produisent au moment même où la pièce concernée est traitée. Pour garantir l'intégrité des codifications pendant les traitements thermiques auxquels sont soumis les carreaux, le système de marquage doit utiliser des encres à base de pigments céramiques et qui restent fixées au support pendant la cuisson. La potentialité du système est très élevée. Ainsi par exemple, il est possible de mettre en rapport, en temps réel et pièce par pièce, des variables comme la taille de la pièce en sortie de four et les conditions de cuisson et/ou pressage, ou les défauts d'une pièce, enregistrés par les systèmes d'inspection automatique, et les conditions de fonctionnement ou les événements de la ligne.

Comme nous pouvons l'observer sur les photos de la [figure 3.7](#), à la sortie du dispositif de marquage se trouve une première caméra de détection qui non seulement enregistre le passage des pièces entre les étapes de pressage et de séchage mais permet également d'évaluer l'intégrité des codes imprimés. Le système d'impression dispose d'un mécanisme rétractable permettant un nettoyage automatique de la tête à intervalle de temps régulier ou en cas de détection de codes présentant un certain degré de détérioration. Les caméras de détection sont placées sous les lignes de fabrication, avec, dans les zones particulièrement exposées aux salissures, la mise en place d'un système de nettoyage à air comprimé.



Figure 3.7. De gauche à droite : tête d'impression pour le marquage des pièces, pièce codifiée et caméra de détection.



Enfin, il faut noter que, comme indiqué pour la section de préparation de compositions, il est intéressant que les outils de gestion de production dans la section de façonnage puissent afficher, de manière anticipée, des informations relatives aux variables critiques du pressage pour les autres sections de l'usine. Ainsi, par exemple, préalablement à la cuisson du produit, les responsables de la section de cuisson pourraient connaître la densité apparente moyenne ou la dispersion de celle-ci au sein d'un ordre de fabrication, ce qui pourrait constituer une grande aide pour prévenir des problèmes associés à la variation de la stabilité dimensionnelle du produit.

### 3.2.2.2 Systèmes de contrôle automatique dans la section de façonnage

#### 3.2.2.2.1 Pressage

La variable de processus la plus importante par rapport aux caractéristiques du support pressé est sa densité apparente, qu'il s'agisse de sa valeur moyenne ou de sa distribution dans celle-ci.

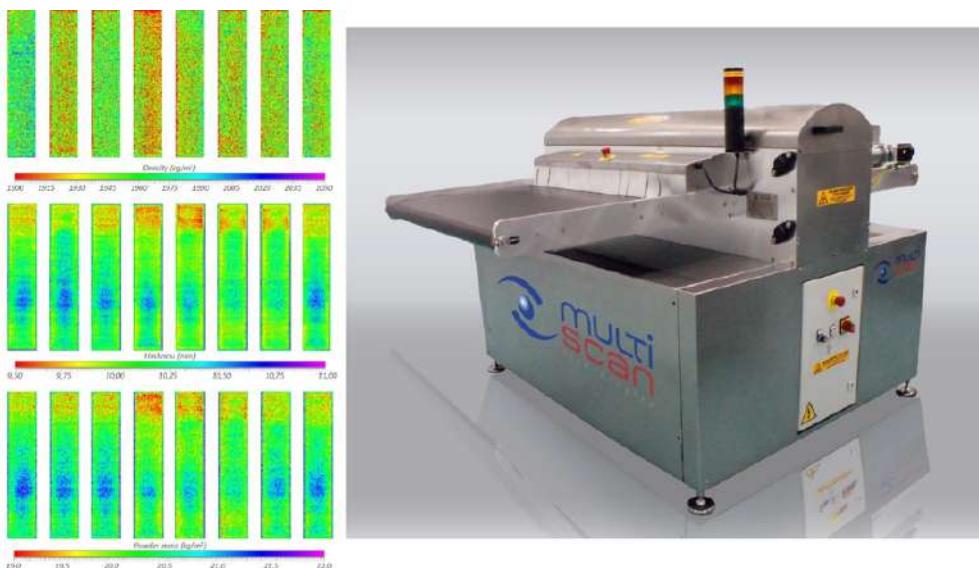
La densité apparente influe sur le comportement de la pièce pendant les étapes postérieures au pressage et conditionne quelques-unes des caractéristiques les plus importantes du produit final. La densité apparente est la variable macroscopique qui reflète la structure poreuse de la pièce, raison pour laquelle elle détermine sa perméabilité aux gaz, sa résistance mécanique, le processus de frittage, son module d'élasticité, etc. Une valeur inadaptée de la densité apparente peut conduire à la formation de craquelures pendant le séchage, ruptures dans la ligne d'émaillage, cœur noir, défaut de stabilité dimensionnelle (calibre et/ou défauts d'équerrage) ou de planéité du produit final ou encore une porosité finale inappropriée<sup>53</sup>.

L'homogénéité dans la distribution de la densité a été sensiblement améliorée au cours de ces dernières années grâce à l'utilisation, dans les presses, des poinçons hydrauliques et des plaques isostatiques. Même si le défaut d'uniformité n'a pas complètement disparu, la préoccupation principale est actuellement axée sur la différence de densité entre les pièces.

Il y a quelques années encore, la mesure de la densité apparente était réalisée manuellement ou de façon semi-automatique, essentiellement avec la procédure d'immersion dans du mercure. Des travaux<sup>54,55</sup> ont été menés pour essayer de remplacer ce test, lequel était discontinu, manuel, destructif et nocif. Une des techniques les plus avancées en ce sens est l'inspection radiologique. ITC-AICE a développé, breveté et prototypé une technique révolutionnaire pour l'inspection non destructive de carreaux céramiques. Cette nouvelle technique, basée sur l'absorption de rayons X et sur la télémétrie laser, a permis d'obtenir des cartes de distribution de densité, épaisseur et charge de pièces complètes, avec une plus grande précision que celles obtenues avec les méthodes destructives traditionnelles. Actuellement, le prototype préliminaire est complètement industrialisé. Il s'agit d'une technologie de rupture utilisée par plus de 30 entreprises dans le monde entier pour contrôler la qualité de leurs produits depuis l'étape de façonnage.

Pour mesurer la densité apparente avec les méthodes traditionnelles, il est nécessaire de détruire la pièce, en la découpant en petits morceaux, ce qui suppose une consommation de temps et de ressources associées. De plus, les informations communiquées par ces méthodes ne sont pas complètes dans la mesure la surface des pièces n'est pas analysée dans sa totalité et que seules sont fournies les valeurs moyennes de la densité apparente des morceaux testés. DENSEXPLORER®, dénomination commerciale de l'équipement, surpassé tous ces inconvénients en réalisant une inspection complète et non destructive des supports.

Avec DENSEXPLORER®, tous les supports céramiques obtenus dans un même cycle de pressage sont analysés simultanément. Après l'analyse, les techniciens obtiennent des cartes de couleurs avec la distribution de densité, d'épaisseur et de masse de toutes les pièces analysées (**voir figure 3.8**) ; cartes qui sont complétées par les informations numériques à l'aide de différents outils d'analyse implantés dans le logiciel d'interprétation de résultats. Cette information graphique est beaucoup plus conviviale que la simple information numérique communiquée par les méthodologies destructives classiques, ce qui suppose un changement de paradigme pour les entreprises utilisant la nouvelle technologie. En effet, grâce à l'information visuelle complète apportée par l'équipement, il est possible de mieux comprendre les phénomènes physiques qui se produisent au cours du compactage de la poudre et d'apporter une réponse plus rapide aux défauts détectés.



**Figure 3.8.** À gauche : cartes de distribution de densité, d'épaisseur et de masse obtenues suite à un essai typique réalisé avec DENSEXPLORER® sur 8 supports céramiques de 800 mm x 150 mm façonnés au cours du même cycle de pressage. À droite : vue de l'équipement DENSEXPLORER®.



Quant à la mesure en continu de la densité apparente, elle a été effectuée en utilisant des capteurs à ultrasons<sup>56</sup> sans atteindre, au cours des expériences réalisées, la précision requise pour aborder un contrôle automatique. L'installation de capteurs extensométriques sur le poinçon de la presse pour mesurer la répartition de la pression sur la pièce a été également essayée pour obtenir une mesure en continu de la distribution de la densité apparente<sup>57</sup>. Cependant, la complexité mécanique du système a fait que celui-ci n'a pas eu d'application industrielle comme système de contrôle.

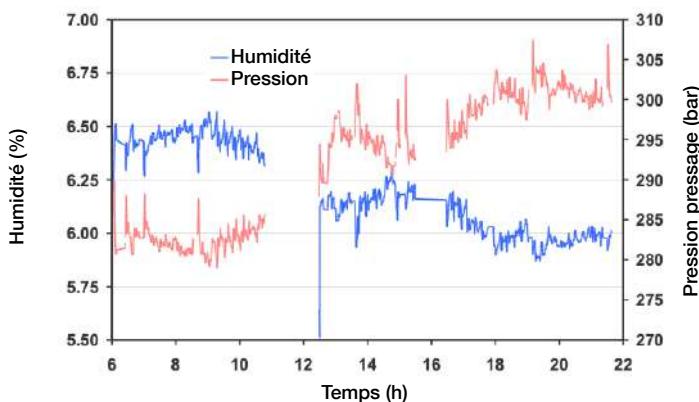
Une alternative pour aborder le problème consiste à utiliser une stratégie de contrôle anticipatif. Le contrôle anticipatif repose sur la mesure de la variable causant la perturbation, et non de la variable de processus à contrôler, comme en cas de contrôle par rétroalimentation. La principale variable de perturbation du processus de pressage est l'humidité de la poudre atomisée qui est alimentée dans les presses. Par conséquent, en mesurant l'humidité, il devrait être possible de contrôler la densité. L'humidité peut être mesurée avec un capteur à infrarouge, identique à celui utilisé dans le contrôle de l'atomisation, placé en sortie de presse, et de modifier la pression maximale du pressage conformément aux variations d'humidité pour maintenir la densité apparente constante. Avec ce type de système de contrôle, il est possible, par exemple, de réduire sensiblement le pourcentage de calibres, comme cela sera exposé par la suite.

À l'heure actuelle, le contrôle automatique de l'opération de pressage sur la base de la mesure de l'humidité des supports récemment pressés et de la modification de la pression maximale de pressage est une technologie mature surtout implantée sur les presses destinées à la fabrication de supports en grès cérame.

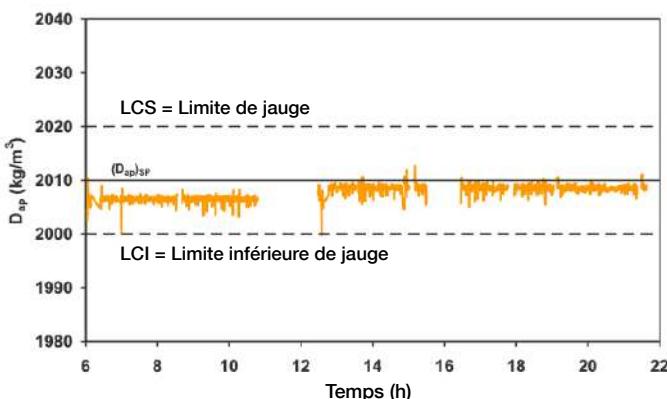
Comme expliqué précédemment, la principale cause de la variabilité de la densité apparente moyenne des supports récemment pressés réside dans les changements d'humidité de la poudre atomisée. La [figure 3.9](#) est un exemple de l'évolution de l'humidité des pièces et de la pression de pressage dans une presse sur laquelle a été implantée une boucle de contrôle automatique de la densité apparente.

Les variations d'humidité peuvent être compensées par des variations de pression de pressage, de manière à ce que la densité apparente demeure constante. L'évolution de la pression de pressage affichée a été calculée à partir de l'humidité et du diagramme de compactage de la composition utilisée pour le façonnage des supports. Nous pouvons observer, à mesure que l'humidité diminue, qu'il est nécessaire d'augmenter la pression de pressage.

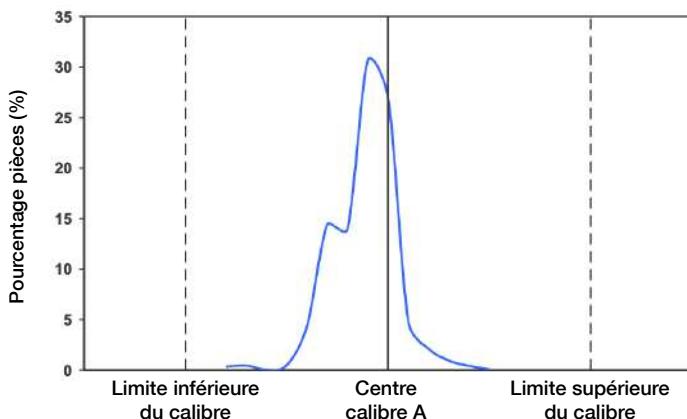
Enfin, la [figure 3.10](#) montre les valeurs de la densité apparente calculée. Comme nous pouvons l'observer, cette valeur demeure dans les limites de spécification établies. La [figure 3.11](#) montre la classification finale de dimensions correspondant à la même période de temps dans laquelle avaient été recueillies les données de la [figure 3.10](#). Cette classification est en accord avec l'évolution de la densité apparente des supports estimée par le système de contrôle. En effet, un calibre unique est obtenu et la classification est centrée sur la taille moyenne du calibre recherché.



**Figure 3.9.** Évolution de l'humidité de la poudre atomisée et de la pression de pressage pour une journée complète de production avec le système de contrôle automatique activé.



**Figure 3.10.** Évolution de la densité apparente estimée pour une journée complète de production avec le système de contrôle automatique activé.



**Figure 3.11.** Classification de dimensions de pièce avec le système de contrôle automatique activé (Production : 2700 m<sup>2</sup>, dimensions 45 cm x 67,5 cm, grès cérame).



Les limites de spécification ont été fixées à partir de la valeur moyenne de densité enregistrée au cours de toute la période analysée. Ces limites (+/- 10 kg/m<sup>3</sup>) représentent la variation maximale de densité qui aurait pu se produire sans qu'au terme du processus il y ait des pièces avec une différence de dimensions supérieure à la tolérance dans le calibre fixé (+/- 1 mm) pour une pièce de 45 cm x 67,5 cm.

### 3.2.2.2 Séchage

Le séchage des supports récemment pressés permet de diminuer leur teneur en humidité et de parvenir à ce que les supports atteignent une température adéquate pour que l'étape de décoration puisse être effectuée correctement.

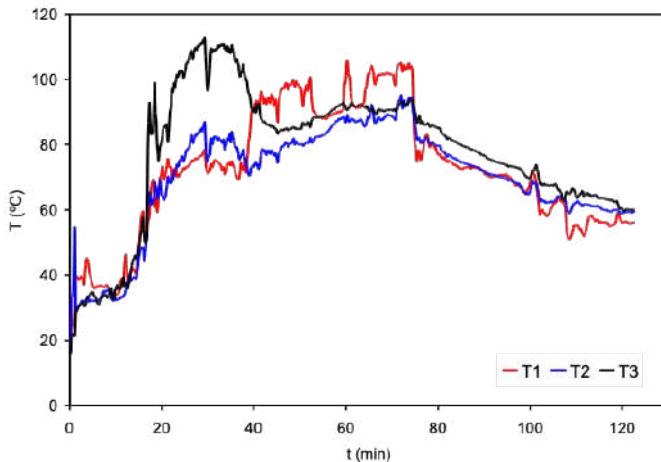
Les variables de processus à contrôler et en rapport avec les supports après le séchage sont la température et l'humidité résiduelle. Une humidité élevée des supports réduit leur résistance mécanique et rend difficile l'opération de décoration. La température influe sur l'étape d'émaillage : des valeurs inappropriées peuvent produire des défauts (piquages, etc.) ou un manque d'homogénéité dans la répartition de l'email sur la surface des pièces.

La température et l'humidité des carreaux à la sortie du séchoir dépendent de la distribution de la température et, dans une moindre mesure, de l'humidité relative des gaz à l'intérieur du séchoir. L'information donnée par la courbe de température à l'intérieur des séchoirs est très fragmentaire, particulièrement dans les séchoirs verticaux (températures d'entrée des gaz dans le séchoir, des gaz de recirculation, de cheminée et de stabilisation).

Il existe des sondes de température consistant en un dispositif d'acquisition de données avec une série de thermocouples. Ces sondes sont introduites dans le séchoir et donnent des informations sur la courbe de température des gaz ou de la surface de la pièce <sup>42</sup>. Elles sont sporadiquement utilisées pour le diagnostic de séchoirs. La **figure 3.12** représente le profil de température des gaz obtenue avec une de ces sondes, à l'intérieur du séchoir vertical, et en trois positions (T1, T2 et T3) sur le plan du panier.

L'information de la courbe de température à l'intérieur d'un séchoir permet de détecter les zones où le séchage est trop lent (avec la perte de rendement qui s'ensuit) ou trop rapide (avec des problèmes de casse possibles), ce qui conduirait à une conception plus rationnelle des courbes de séchage.

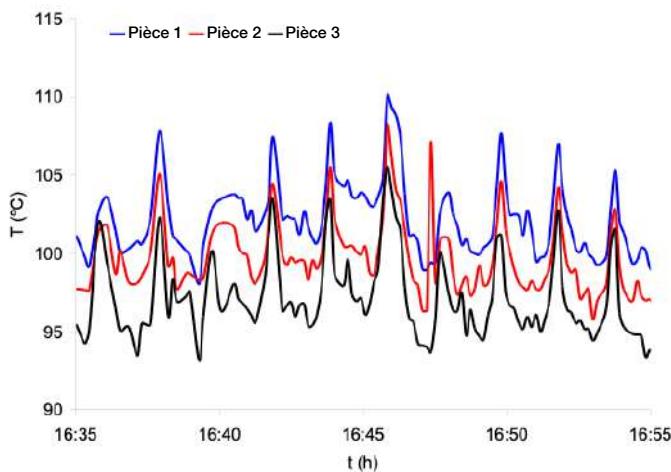
La température à la sortie du séchoir est généralement mesurée à l'aide de pyromètres optiques avec un indicateur sur lequel l'opérateur peut lire la valeur instantanée de la température. Par conséquent, on obtient une lecture ponctuelle de la température de la pièce au fur et à mesure qu'elle passe sous le pyromètre. Dans ces conditions, il est impossible de connaître la température d'une pièce et sa position sur le plan du panier du séchoir. Des travaux dans lesquels ont été combinées l'information de température



**Figure 3.12.** Température des gaz à l'intérieur d'un séchoir vertical, en différentes positions d'un plan, pendant un cycle de séchage.

de la pièce à la sortie du séchoir et la position de la pièce à l'intérieur du séchoir ont été réalisés<sup>58</sup>. La **figure 3.13** montre la distribution de température des pièces à la sortie du séchoir, en fonction de la position qu'elles occupent au niveau du panier.

L'implantation de ces équipements d'instrumentation n'est pas compliquée à réaliser, notamment sur les séchoirs verticaux, et apporte des informations très précieuses sur le fonctionnement du séchoir et sa stabilité thermique, que ce soit en état stationnaire ou non.



**Figure 3.13.** Évolution de la température de trois pièces, situées en différentes positions, à la sortie du séchoir.



La seconde variable d'importance dans le séchage industriel est l'humidité résiduelle. Cette humidité résiduelle influe sur la résistance mécanique<sup>59</sup> des pièces : plus l'humidité est importante, plus la résistance mécanique est faible et, par conséquent, plus est élevée la probabilité que la pièce subisse une casse.

L'humidité résiduelle est généralement mesurée manuellement, à partir d'éprouvettes obtenues des pièces industrielles, sur une balance avec des résistances électriques ou dans une étuve. Les capteurs d'humidité à infrarouge, utilisés pour le contrôle de l'humidité de la poudre atomisée et des pièces en sortie de presse (pour le contrôle anticipatif de la densité), ne peuvent être exploités dans ce cas, puisqu'ils permettent uniquement de connaître l'humidité à la surface de la pièce et non l'humidité moyenne. Pour connaître l'humidité moyenne, il faut se servir de capteurs à micro-ondes ou radiofréquence. L'expérience dans le domaine des carreaux céramiques est bien meilleure avec ces derniers capteurs. Les essais réalisés ont mis en évidence qu'il est possible d'utiliser ces dispositifs pour obtenir des mesures précises de l'humidité résiduelle.

Les valeurs d'humidité résiduelle, à l'échelle industrielle, permettent d'estimer la résistance mécanique des pièces à la sortie du séchoir en exploitant le rapport entre les deux variables obtenues en laboratoire.

### 3.2.2.3 Données minimales à intégrer dans la section de façonnage

Enfin, pour conclure avec la révision des points portant sur la section de façonnage, le **tableau 3.3** reprend les informations minimales jugées nécessaires pour une bonne gestion des opérations dans cette section et jeter les fondements de la définition d'un "jumeau numérique" du processus.

**Tableau 3.3.** Informations minimales requises dans la section de façonnage pour jeter les fondements du "jumeau numérique" du processus de fabrication (par mesure de simplicité, la technologie de séchage utilisée est le séchage dans un séchoir vertical)

Tableau 3.3.1	Presse
Niveau d'information	Données/description
<b>RENDEMENTS ET GESTION DE PRODUCTION</b>	Ordre de production, référence de lot ou trace de production
	Référence article
	Avancée ordre de fabrication par rapport à planification (%)
	Disponibilité (D) = Temps de production / Temps disponible (%)
	Rendement (R) = Production réelle / Production théorique (%)
	Qualité (C) = Quantité pièces considérées comme perte / Quantité de pièces pressées (%)
	Distribution motifs d'arrêt
	Distribution motifs de perte
	OEE = D x R x C (%)
<b>VARIABLES DE PROCESSUS</b>	Humidité de la poudre atomisée (kg eau/kg poudre (%))
	Densité apparente moyenne des supports pressés (kg/m <sup>3</sup> )
	*Variation maximale de la densité apparente moyenne entre sorties de la presse (kg/m <sup>3</sup> )
	Variation maximale de la densité apparente à l'intérieur pour chaque sortie de la presse (kg/m <sup>3</sup> )
	*Moment de première chute par rapport à avancée système alimentation (%) par rapport à la longueur pièce)
	*Vitesse moyenne avancée système alimentation de poudre (mm/s)
	*Vitesse moyenne recul système alimentation de poudre (mm/s)
	*Temps de désaération (s)
	*Vitesse d'avancée de la traverse mobile dans la descente (mm/s)
	*Pression maximale du circuit hydraulique de la presse (bar)
	*Pression maximale de consigne dans circuit hydraulique (bar)
	Pression spécifique maximale sur la poudre atomisée (kg/cm <sup>2</sup> )
	*Pression de premier pressage (bar)
	*Vitesse d'application de la pression lors du second pressage (bar/s)
	*Temps de maintien à la pression maximale (bar)
	*Vitesse d'avancée de la traverse mobile en montée (mm/s)
	*Vitesse d'extraction de la pièce (mm/s)
	*Pression d'extraction (bar)
	Vitesse de la presse (coups/min)
	*Température de l'huile dans le circuit hydraulique (°C)
	*Température du moule (°C)
	Épaisseur moyenne des supports façonnés (mm)
	*Épaisseur moyenne du lit de poudre déposée dans l'alvéole (mm)
	*Variation maximale de l'épaisseur moyenne du support entre sorties de la presse (mm)
	*Variation maximale de l'épaisseur du support pour chaque sortie de la presse (mm)
<b>CONSOMMATION DE RESSOURCES</b>	Identification cavité moule par pièce
	Contrôles dimensionnels calibre par cavité du moule (mm)
	Contrôles dimensionnels défaut d'équerrage par cavité du moule (mm)
	État marche/arrêt presse (Booléen)
	Consommation de poudre atomisée (kg/s ou kg/m <sup>2</sup> de produit fini)
<b>COÛTS VARIABLES</b>	Consommation électrique du pressage et systèmes auxiliaires (kW h/m <sup>2</sup> de produit fini)
	Consommation RH (personnes/équipe ou personnes/ m <sup>2</sup> de produit fini)
	Coût poudre atomisée (€/m <sup>2</sup> de produit fini)
	Coût électricité (€/m <sup>2</sup> de produit fini)
	Coût RH (€/m <sup>2</sup> de produit fini)



Tableau 3.3.2	Séchoir
Niveau d'information	Données/description
<b>RENDEMENTS ET GESTION DE PRODUCTION</b>	Du fait qu'il s'agit d'un "flux tendu" entre presse et séchoir, les données sont les mêmes que celles pour le pressage
<b>VARIABLES DE PROCESSUS</b>	Température consigne brûleur 1 (°C)
	Température réelle brûleur 1 (°C)
	Température consigne brûleur 2 (°C)
	Température réelle brûleur 2 (°C)
	Température cheminée (°C)
	Humidité relative dans cheminée (%)
	Débit gaz de cheminée (Nm <sup>3</sup> /s)
	Temps de séchage (min)
	Température consigne zone stabilisation (°C)
	Température réelle zone stabilisation (°C)
	Vitesse de rotation ventilateur 1 (tr/min)
	Vitesse de rotation ventilateur 2 (tr/min)
	Pourcentage ouverture vanne cheminée (%)
	Température sortie de pièces indexée par position (°C)
	Variation maximale de température entre pièces d'un plan (°C)
	Variation maximale de température entre pièces dans un panier (°C)
	Humidité résiduelle pièces à la sortie (kg eau/kg pièce (%))
	État marche/arrêt séchoir (Booléen)
<b>CONSOMMATION DE RESSOURCES</b>	Consommation de gaz naturel dans séchoir (Nm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> de produit fini)
	Consommation électrique du séchoir et systèmes auxiliaires (kW h/m <sup>2</sup> de produit fini)
	Consommation RH (personnes/équipe ou personnes/ m <sup>2</sup> de produit fini)
<b>COÛTS VARIABLES</b>	Coût gaz naturel (€/m <sup>2</sup> de produit fini)
	Coût électricité (€/m <sup>2</sup> de produit fini)
	Coût RH (€/m <sup>2</sup> de produit fini)

Une partie des informations indiquées dans le **tableau 3.3** peut être obtenue à partir de la mesure des variables de processus indiqués dans celui-ci. Cependant, il est indispensable de disposer des données additionnelles du **tableau 3.4**, afin de pouvoir élaborer correctement l'ensemble des informations indiquées. Ce tableau présente, avec la donnée additionnelle en question, l'origine ou la source de données à partir de laquelle elle pourrait être obtenue

**Tableau 3.4.** Données additionnelles requises pour l'obtention des informations minimales nécessaires à la définition du "jumeau numérique" dans la section de façonnage.

Niveau d'information	Données	Origine des données
<b>RENDEMENTS ET GESTION DE PRODUCTION</b>	Temps de marche équipements (h)	Automate de gestion et automatisation ou système externe de comptage
	Production planifiée (m <sup>3</sup> )	Information ERP ou système gestion
	Production théorique équipements (pièces ou m <sup>2</sup> /s)	Information ERP ou système gestion
	Production théorique cumulée (m <sup>3</sup> )	Automate de gestion et automatisation ou système externe de comptage
	Surface par pièce (m <sup>2</sup> /pièce)	ERP, fiche de produit ou système de gestion
	Production réelle cumulée (m <sup>3</sup> )	Automate de gestion et automatisation ou système externe de comptage
	Pièces en sortie de presse (unités)	Automate de gestion et automatisation ou système externe de comptage
	Pièces entrée de séchoir (unités)	Automate de gestion et automatisation ou système externe de comptage
	Pièces en sortie de séchoir (unités)	Automate de gestion et automatisation ou système externe de comptage
	Pertes de production (pièces ou m <sup>3</sup> )	Imputées manuellement ou enregistrées automatiquement par des compteurs
	Motifs d'arrêt	Imputés par les opérateurs ou directement obtenus d'automates
	Motifs de perte	Imputés par les opérateurs ou directement obtenus d'automates
<b>VARIABLES DE PROCESSUS</b>	Cycle complet de pressage pour l'obtention de paramètres critiques	Automate de la presse
	Cycle complet d'alimentation poudre pour l'obtention de paramètres critiques	Automate de la presse
	Nombre de sorties du moule	Automate de la presse, ERP ou fiche produit
	Largeur pièce (mm)	Automate de la presse, ERP ou fiche produit
	Longueur pièce (mm)	Automate de la presse, ERP ou fiche produit
	Épaisseur nominale du produit (mm)	ERP ou fiche produit
	Nombre de cycles	Automate de la presse
	Nombre pièces par rang séchoir	Automate du séchoir
	Nombre pièces par plan séchoir	Automate du séchoir
	Nombre paniers séchoir (unités)	Spécifications séchoir
<b>CONSOMMATION DE RESSOURCES</b>	Nombre plans par panier (unités)	Spécifications séchoir
	Proportion théorique kg poudre atomisée/m <sup>2</sup> de produit fini	ERP, fiche de produit ou système de gestion
	Niveau poudre atomisée dans trémie (% ou kg)	Mesureur distance ou pesée avec cellules de charge
	Répartition de personnel	ERP ou système de gestion de RH
	Équipe de travail ou équipe postée active	ERP ou système de gestion de RH
	Consommation gaz naturel atomiseur (m <sup>3</sup> )	Compteur gaz numérisé
	Température gaz naturel (°C)	Pt-100 compteur de gaz numérisé
	Pression fourniture gaz naturel (Pa)	Transducteur pression compteur de gaz numérisé
<b>COÛTS VARIABLES</b>	Consommation électrique équipements (kW h)	Analyseurs de réseau numérisés
	Prix poudre atomisée (€/kg)	ERP ou système de gestion
	Prix électricité (€/kW h)	ERP, contrat fournisseur ou "scraping" web
	Prix gaz naturel (€/kW h)	ERP, contrat fournisseur ou "scraping" web
	Prix moyen RH assignées (€/per)	ERP ou système de gestion
	Pouvoir calorifique gaz naturel (kW h/Nm <sup>3</sup> )	ERP, contrat fournisseur ou "scraping" web



À l'égal de ce qui a été indiqué dans la section de préparation de compositions, le bon stockage dans un système structuré de bases de données de l'ensemble des informations collectées dans les tableaux ci-dessus permettra, a posteriori, d'analyser des lots de production précis, pourvu que leur traçabilité puisse être assurée. En effet, dès le premier instant où sont fabriquées des pièces affectées à un certain ordre de fabrication, si une imputation ou capture correcte du début et de la fin du lot de production est assurée, les informations générées seront indexées et relatives à chaque ordre de fabrication. Cela permettrait d'avoir un parfait suivi en temps réel du processus de production et de faciliter la segmentation des informations pour les exploiter par la suite en utilisant des outils d'analyse avancée.

Dans la section de préparation de compositions, compte tenu de la nature en vrac des produits traités (matières premières solides, suspensions et poudre atomisée), le suivi de la production peut être effectué simplement à partir des volumes fabriqués et des durées de fonctionnement des équipements. Cependant, à partir du façonnage des supports, les pièces commencent à être façonnées, le processus de fabrication revêtant la forme d'une succession d'événements individualisés.

À partir de ce point, pour garantir une bonne traçabilité de la production, il serait utile d'identifier clairement toutes les pièces fabriquées de manière à pouvoir avoir une trace du passage des pièces par les différentes étapes du processus et connaître avec précision les conditions d'exploitation dans lesquelles elles sont produites. Comme indiqué précédemment, parmi les options de suivi les plus appropriées, il existe notamment le marquage à l'encre céramique au dos des pièces à codes type DM (DataMatrix), ou similaires, pour un suivi tout au long du processus à l'aide de caméras de vision. Le marquage doit être effectué de préférence à l'intérieur d'un bas-relief créé avec le poinçon du moule afin d'éviter que le frottement avec les différents systèmes de transport détériore le code pendant le processus et compromette la détection de ce même code.

### 3.2.3 Émaillage et décoration

Dans la section d'émaillage, les supports, après séchage, sont recouverts de plusieurs couches de matières de nature généralement vitreuse, qui confèrent au produit, après la cuisson, sa finition esthétique et quelques-unes de ses propriétés physico-chimiques. Sur les lignes d'émaillage actuelles, il existe essentiellement trois types d'applications. Les applications de base, réalisées avec des engobes et émaux céramiques appliqués, habituellement, avec une vernisseuse à rideau à l'aide de cloches et voiles, ou par pulvérisation. Les applications d'impression à jet d'encre, dans lesquelles est habituellement défini le motif graphique. Et enfin, les applications de protection, utilisées pour doter la surface du produit de propriétés techniques déterminées, comme la résistance à l'usure ou la qualité antidérapante.

La préparation des bases d'email utilisées pour procéder aux différentes applications décoratives sur les lignes d'émaillage a lieu, dans la majorité des entreprises, dans une

section comptant une série de broyeurs à billes en discontinu. Sauf occasions ponctuelles, le mélange de matières premières pour la préparation des émaux est directement fourni par des entreprises de fourniture en big-bags d'environ 700 kg, auxquels il faut ajouter une série d'additifs et la quantité adéquate d'eau pour broyer le produit en un temps spécifié, jusqu'à obtention d'une certaine taille de particule.

### 3.2.3.1 Gestion des informations dans la section d'émaillage

Le niveau d'automatisation des opérations de production dans la section de préparation des émaux n'est généralement pas très élevé, comme celui observé, par exemple, dans la préparation de compostions ou façonnage, les opérateurs intervenant surtout dans les opérations constantes de nettoyage et transvasement des suspensions. Comme dans d'autres sections, de manière générale, on décèle un manque d'élaboration dans le système pour la collecte de données critiques de traitement et leur envoi vers un système d'information supérieur. En ce sens, dans la majorité des cas, les matières premières reçues ne sont pas contrôlées. Ce n'est que ponctuellement que les fournisseurs transmettent des informations sur certaines propriétés de matières premières. Les contrôles sont essentiellement effectués sur le produit après préparation de celui-ci et avant son entrée dans le processus. Les variables critiques mesurées sont la densité de la suspension, la viscosité en secondes de chute par la coupe de Ford et le résidu de la suspension sur un tamis à taille définie. Ces variables sont ajustées conformément aux spécifications de l'ordre de production et sont postérieurement adaptées en ligne en fonction des besoins de chaque application.

Par rapport aux lignes de décoration et aux opérations de production sur celles-ci, le niveau d'automatisation est bon, même s'il existe encore une forte intervention des opérateurs dans les opérations de nettoyage, dans le réglage des conditions d'application et dans la reconfiguration des lignes lors de changements de lot. De plus, de manière générale, on observe une faible élaboration des systèmes de collecte d'informations critiques de traitement. Ainsi, par exemple, bien que des paramètres critiques pour le processus de décoration, comme la densité, la viscosité ou la quantité d'email appliquée sur le produit, soient mesurés toutes les demi-heures, les données sont généralement collectées manuellement et ne sont pas disponibles dans des systèmes de gestion intégrée.

Pour toutes ces raisons, il est jugé intéressant de développer des interfaces d'affichage particulièrement adaptées aux besoins de la section d'émaillage afin de pouvoir afficher rapidement le fonctionnement des différents systèmes d'application impliqués dans la fabrication d'un produit et l'évolution des variables de fonctionnement. À titre d'exemple, on peut citer la température de sortie des supports du séchoir, laquelle, comme indiqué dans le [paragraphe 3.3.2.2.2](#), est surveillée mais seule la valeur de la dernière lecture réalisée s'affiche sur un écran situé à la sortie du séchoir. Étant donné la criticité de cette variable pour une correcte application des différentes couches de décoration à la surface du produit, il pourrait être envisagé de procéder à une simple élaboration des données générées par cette mesure pour l'associer à la position des pièces sur les différents plans



du séchoir. Ce serait une première étape pour, après stockage de cette information et, en ayant suivi la production comme il se doit, pouvoir faire en sorte que cette variable ait un impact direct sur les caractéristiques finales de chaque pièce fabriquée.

Comme dans les autres sections, on relève un manque général d'informations par rapport aux rendements de production de l'installation. C'est pourquoi, il est estimé qu'il est très important de commencer à habiliter des systèmes de contrôle en temps réel des rendements de production, la disponibilité et les OEE des lignes, qui permettront de stocker les informations pour pouvoir les traiter a posteriori, rapidement et dans le détail. De nombreuses variables qui permettraient de procéder à cette gestion intégrée des rendements peuvent être générées à partir de comptages de pièces et temps d'arrêt de l'équipement. Ces données, dûment intégrées avec des données issues des systèmes ERP et des systèmes de planification des ordres de fabrication, peuvent être exploitées pour automatiser la gestion des rendements de production et générer des indicateurs qui seront utiles à l'optimisation des processus de fabrication.

Par rapport aux variables relatives à la qualité ou aux caractéristiques des produits traités, on observe en général un manque d'élaboration, aussi bien dans la propre mesure ou collecte des données que dans le traitement de ces dernières pour générer des informations qui faciliteront la prise de décisions. Même si une automatisation de la saisie de données, tel que cela est réalisé en certains points des lignes d'émaillage dans certaines entreprises, est un premier pas pour garantir le flux d'informations vers des systèmes intégrés de gestion de données, il est indispensable de commencer à valoriser l'utilisation de systèmes de mesure en continu des variables de processus. Un point remarquable est le fait que, à ce jour, sont utilisés des systèmes d'inspection automatique de la qualité de la surface des pièces décorées en fin de ligne, préalablement à l'application des couches de protection et leur chargement dans les chariots. En tout cas, la plupart du temps, ce qui fait défaut, c'est que cette information n'est pas stockée de façon structurée pour pouvoir postérieurement procéder à des analyses avancées dans lesquelles sont mis en rapport les défauts détectés par cet équipement avec les propres variables de production.

À ce qui précède, il faut ajouter que très peu d'entreprises sont équipées d'un système souple permettant d'effectuer un suivi en temps réel de l'évolution des ordres de production ou des ordres de fabrication par rapport à la planification établie, ce qui est commun au reste des sections précédemment analysées. L'existence d'un système de suivi et gestion est indispensable pour garantir une bonne traçabilité de la production afin d'analyser ensuite les opérations de production pour générer des informations de valeur qui permettront d'optimiser son développement. Qui plus est, étant donné que, généralement, la méthodologie de travail des usines implique d'exploiter les temps morts des lignes de fabrication pour réaliser des tests d'émail et de tonalité des ordres de fabrication planifiés sur chaque ligne, un système de ce type serait la base pour pouvoir aborder des séquencements de la production, lesquels prendraient en considération les besoins des essais en cours. De cette manière, les priorités de production pourraient être recalculées en temps réel, en tenant compte de toute la casuistique possible, afin de travailler à des niveaux de productivité optimaux.

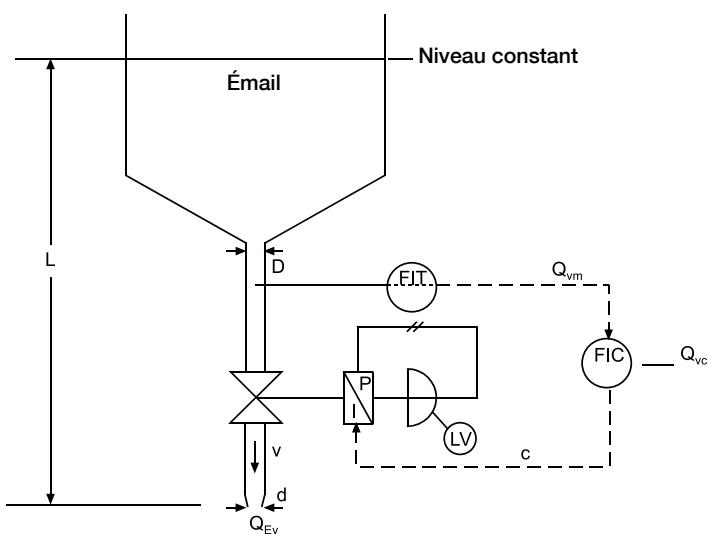
### 3.2.3.2 Systèmes de contrôle dans la section d'émaillage

Comme commenté précédemment, la décoration n'est pas une seule étape mais un ensemble de sous-étapes qui s'enchaînent. Chacune de ces sous-étapes possède ses propres variables indépendantes, bien qu'il existe bien évidemment une interaction entre les différentes sous-étapes. Ainsi par exemple, la quantité d'eau appliquée avec un aérographe influe sur la qualité de l'application de l'email de base.

Au cours des dernières années, des efforts ont été réalisés pour mettre en place un système de suivi et de contrôle de ces sous-étapes. De même, il y a eu des tentatives de contrôle de la quantité d'email appliquée en utilisant des cellules de charge. Les résultats obtenus ont mis en lumière la difficulté de faire des mesures suffisamment précises du poids des pièces avant et après chaque application.

Le contrôle de la quantité d'email appliquée au moyen d'une cloche<sup>60</sup> (**figure 3.14**) a eu plus de succès. Dans ce cas, il existe des dispositifs commerciaux dotés d'un débitmètre électromagnétique permettant d'enregistrer le débit d'email apporté par la cloche, afin de corriger les écarts en agissant sur une vanne motorisée.

Avec la vanne en position manuelle, il s'avère que les variations de débit sont significatives et puissent leur origine dans la variation de la viscosité de l'email qui est due, à son tour, à des changements dans la densité (par évaporation de l'eau) et dans la température (pour cause de changements environnementaux et en raison de l'échauffement provoqué par la pompe de refoulement).



**Figure 3.14.** Schéma d'un dispositif de contrôle automatique du débit d'email dans une cloche.



La **figure 3.15** représente la courbe de distribution de débits avec un contrôle manuel et un contrôle automatique, où est utilisé le signal du débitmètre électromagnétique pour faire en sorte que le débit d'émail reste constant.

La plus grande avancée que la section d'émaillage a connue au cours des dernières années, et qui a supposé un changement disruptif dans le processus de fabrication céramique, a été l'intégration des systèmes d'impression à jet d'encre pour la création de motifs graphiques à la surface des pièces. L'apparition de ces systèmes de décoration a été synonyme de début de la digitalisation de cette étape de la fabrication, en modifiant complètement les phases de conception, développement et fabrication des produits céramiques.

Avec l'introduction de l'impression à jet d'encre dans le processus, l'information relative au design peut être partagée entre les différentes sections concernées dans l'émaillage et le développement de produit de façon digitale. Cependant, aujourd'hui encore, nous rencontrons dans de nombreux cas des copies papier de l'information de travail, du fait de la faible utilisabilité des outils de gestion employés au niveau digital, et nous observons qu'il est nécessaire de réaliser de nombreux essais pour parvenir aux égalisations de tonalité et aspect des pièces à fabriquer dans un lot de production. C'est en ce sens que sont apparus sur le marché différents outils informatiques pour réaliser la gestion de la couleur, des outils particulièrement adaptés au processus de fabrication de carreaux. La combinaison de ces outils avec des technologies d'analyse spectrale d'images contribue considérablement à la digitalisation, à l'optimisation et à l'amélioration des procédures de mise en œuvre de nouveaux modèles et/ou produits.

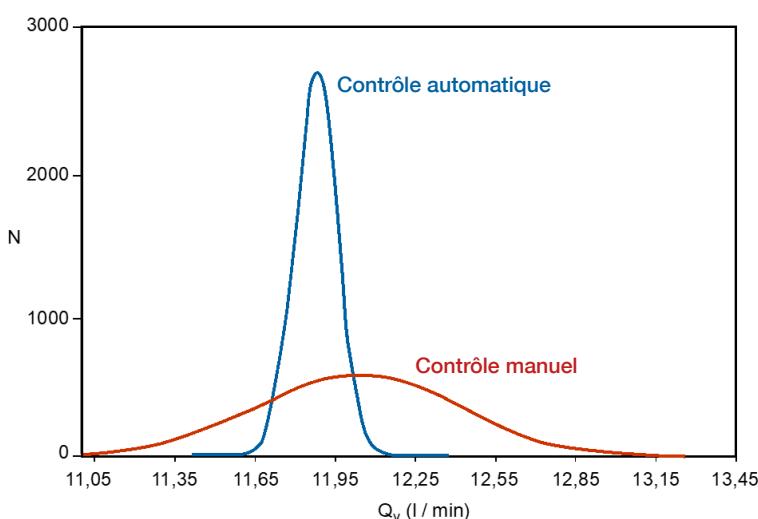


Figure 3.15. Distribución de caudales volumétricos de esmalte con control manual y automático.

Parmi les problèmes rencontrés sur la ligne d'émaillage, nombreux sont liés à une décoration incorrecte provoquant des défauts visibles sur la propre ligne d'émaillage. Cela a fait que plusieurs entreprises dédiées à l'inspection visuelle automatique se sont penchées sur l'utilisation de ces systèmes pour évaluer les caractéristiques des pièces avant cuisson<sup>61</sup>.

Les avantages de la détection de pièces présentant des défauts de décoration sur la ligne d'émaillage sont évidents : passage à l'étape suivante (cuisson) des pièces correctes uniquement, économies d'email et d'énergie, augmentation de la production et du pourcentage de première qualité, etc. Cependant, l'inspection visuelle à cette étape du processus doit faire face à de nombreuses difficultés. La première d'entre elles est la présence de poudre et d'eau, ce qui constraint à protéger tous les systèmes. La seconde est la difficulté à détecter les défauts sur des pièces crues. La technique est prometteuse mais elle ne présente pas encore un degré d'implantation aussi élevé qu'en fin de ligne pour l'inspection du produit cuit.

### 3.2.3.3 Données minimales à intégrer dans la section d'émaillage

Enfin, le **tableau 3.5** reprend les informations minimales jugées nécessaires à une gestion correcte des opérations dans la section d'émaillage et de décoration. Comme pour les sections précédentes, ces informations sont regroupées sur la base de quatre domaines : rendements et gestion de production, variables de processus et consommation de ressources.



**Tableau 3.5.** Variables et données minimales requises dans la section d'émaillage pour jeter les fondements du "jumeau numérique" du processus de fabrication.

Niveau d'information	Données/description
<b>RENDEMENTS ET GESTION DE PRODUCTION</b>	Ordre de production, référence de lot ou trace de production
	Référence article
	Avancée ordre de fabrication par rapport à planification (%)
	Disponibilité (D) = Temps de production / Temps disponible (%)
	Rendement (R) = Production réelle / Production théorique (%)
	Qualité (C) = Quantité pièces considérées comme perte / Quantité de pièces pressées (%)
	Distribution motifs d'arrêt
	Distribution motifs de perte
	OEE = D x R x C (%)
<b>VARIABLES DE PROCESSUS</b>	Température supports en sortie de séchoir indexée par position (°C)
	Densité applications (kg/m <sup>3</sup> )
	Viscosité applications (cp)
	Grammage applications par pièce (g/pièce)
	*Température émaux (°C)
	Niveau d'email dans récipients (%) ou kg)
	Température supports avant impression (°C)
	Humidité superficielle des supports avant impression (%)
	Température environnement lignes d'émaillage (°C)
	Humidité relative environnement lignes d'émaillage (%)
	Température application encres dans imprimante (°C)
	Vitesse progression pièces dans applications (m/min)
	Vitesse moyenne progression pièces dans ligne complète (m/min)
	*Position chargement pièces sur plan chariots
	*Plan chargement pièces dans chariot
	Référence chariot chargement de pièces
	Temps moyen de présence des pièces dans ligne (min)
<b>CONSOMMATION DE RESSOURCES</b>	Statistique défauts détectés par machine d'inspection pièces crues
	État marche/arrêt ligne (Booléen)
	Consommation d'émaux (kg ou kg/m <sup>2</sup> de produit fini)
	Consommation d'encre (kg ou kg/m <sup>2</sup> de produit fini)
<b>COÛTS VARIABLES</b>	Consommation électrique ligne d'émaillage et systèmes auxiliaires (kW h/m <sup>2</sup> de produit fini)
	Consommation RH (personnes/équipe ou personnes/ m <sup>2</sup> de produit fini)
	Coût des émaux (€/m <sup>2</sup> de produit fini)
	Coût des encres consommées (€/m <sup>2</sup> de produit fini)
	Coût électricité (€/m <sup>2</sup> de produit fini)
	Coût RH (€/m <sup>2</sup> de produit fini)

Comme dans les cas précédents, le **tableau 3.6** présente les données additionnelles qu'il est nécessaire de connaître afin de pouvoir obtenir de façon fiable une partie des informations indiquées dans le **tableau 3.5**.

**Tableau 3.6.** Données additionnelles requises pour l'obtention des informations minimales nécessaires à la définition du "jumeau numérique" dans la section d'émaillage.

Niveau d'information	Données	Origine des données
<b>RENDEMENTS ET GESTION DE PRODUCTION</b>	Temps de marche ligne (h)	Automate de gestion et automatisation ou système externe de comptage
	Production planifiée (m <sup>2</sup> )	Information ERP ou système gestion
	Production théorique ligne (pièces ou m <sup>2</sup> /s)	Information ERP ou système gestion
	Production théorique cumulée (m <sup>2</sup> )	Automate de gestion et automatisation ou système externe de comptage
	Surface par pièce (m <sup>2</sup> /pièce)	ERP, fiche de produit ou système de gestion
	Production réelle cumulée ligne (m <sup>2</sup> )	Automate de gestion et automatisation ou système externe de comptage
	Pièces en entrée de ligne (unités)	Automate de gestion et automatisation ou système externe de comptage
	Pièces sortie applications (unités)	Automate de gestion et automatisation ou système externe de comptage
	Pièces sortie imprimante (unités)	Automate de gestion et automatisation ou système externe de comptage
	Pièces chargées chariots (unités)	Automate de gestion et automatisation ou système externe de comptage
	Pertes de production (pièces ou m <sup>2</sup> )	Imputées manuellement ou enregistrées automatiquement par des compteurs
	Motifs d'arrêt	Imputés par les opérateurs ou directement obtenus d'automates
	Motifs de perte	Imputés par les opérateurs ou directement obtenus d'automates
<b>VARIABLES DE PROCESSUS</b>	Nombre de pièces par rang séchoir	Automate du séchoir, ERP ou fiche de produit
	Largeur pièce (mm)	Automate de la presse, ERP ou fiche de produit
	Longueur pièce (mm)	Automate de la presse, ERP ou fiche de produit
	Nombre pièces par rang chariot	Automate système chargement
	Nombre pièces par plan chariot	Automate système chargement
	Nombre plans chariot (unités)	Spécifications chariots
<b>CONSOMMATION DE RESSOURCES</b>	Niveau émail dans récipients (% ou kg)	Mesureur distance ou pesée avec cellules de charge
	Répartition de personnel	ERP ou système de gestion de RH
	Équipe de travail ou équipe postée active	ERP ou système de gestion de RH
	Consommation électrique équipements (kW h)	Analyseurs de réseau numérisés
<b>COÛTS VARIABLES</b>	Prix émaux (€/kg)	ERP ou système de gestion
	Prix encres (€/kg)	ERP ou système de gestion
	Prix électricité (€/kW h)	ERP, contrat fournisseur ou "scraping" web
	Prix moyen RH assignées (€/per)	ERP ou système de gestion



Enfin, il convient de souligner qu'il serait très intéressant de pouvoir enregistrer les informations relatives aux conditions de traitement dans lesquelles s'effectue l'égalisation des tons pour pouvoir commencer à mettre en place des outils pouvant anticiper les écarts chromatiques pendant le déroulement du lot de production. L'utilisation d'outils de ce type, alliée à la digitalisation complète du processus d'égalisation de tonalités, peut être d'une grande aide pour réduire les temps consacrés à la réalisation de tests de production et les temps de réponse face à des imprévus dans le déroulement des opérations.

Même si pour cette partie précise de la section d'émaillage, il n'a pas été considéré opportun de présenter sous forme de tableaux les données ou informations minimales requises pour leur intégration dans le "jumeau numérique" du processus, il est intéressant de refléter qu'une grande partie des informations de traitement collectées pour d'autres sections, comme celles de façonnage, émaillage et cuisson, est un point clé dans les processus d'égalisation de tons, lorsqu'il faut comprendre l'origine des instabilités qui peuvent être observées.

### 3.2.4 Cuisson

Après la décoration des pièces sur les lignes d'émaillage, il y a deux façons possibles de procéder : soit en déposant les pièces crues dans des chariots, lesquels sont guidés par des systèmes AGV (Autonomous Guided Vehicles), avant de les soumettre par la suite à un traitement thermique dans un four de cuisson, soit en les introduisant directement dans le four, juste à la sortie de la ligne d'émaillage. Dans les deux cas, les pièces crues sont soumises, pendant la cuisson, à un traitement thermique qui leur confère leurs propriétés techniques et esthétiques finales.

En général, la cuisson s'effectue dans des fours monocouche à rouleaux en suivant un cycle thermique adapté aux caractéristiques du produit fabriqué. L'apport de chaleur dans les fours s'effectue dans la majorité des cas par combustion de gaz naturel utilisant de l'air comme comburant. Cet air, préalablement à son introduction dans les brûleurs à gaz, est généralement préchauffé indirectement avec les gaz chauds du four jusqu'à des températures de 100 à 300°C, en fonction des caractéristiques du four. Après cuisson, à des températures maximales de 1100 à 1200°C en fonction de la typologie du produit, le matériau est à nouveau chargé dans des chariots en attendant d'être soumis à d'autres opérations de transformation comme la rectification ou le polissage, ou de passer au tri final.

#### 3.2.4.1 Gestion des informations dans la section de cuisson

Comme dans les sections de façonnage et émaillage, à cette étape du processus de fabrication, on dispose généralement de l'ordre de fabrication du produit à traiter, avec une planification de fabrication par chacun des fours de l'usine. En dépit de l'importance de connaître à tout moment, dans le cadre de la gestion des opérations d'usine, les courbes de cuisson pour mener à bien la planification générale des tests de produit et d'égalisation, ainsi que les vérifications réalisées depuis d'autres sections, en général, les

entreprises ne disposent pas d'applications signalant simplement l'état de cette planification, et dans de nombreux cas, ce sont des copies sur papier qui sont utilisées pour la gestion des opérations journalières.

Le degré d'automatisation de la section de cuisson, du point de vue du traitement des matériaux, est très élevé. En revanche, ce n'est pas le cas du contrôle des propriétés et de la qualité du matériau traité. En effet, ces contrôles sont la plupart du temps réalisés manuellement sur des échantillons ponctuels qui ne permettent pas d'inspecter toute la production. Parmi les paramètres critiques contrôlés, il faut notamment citer les suivants :

- Planéité, laquelle est contrôlée la plupart du temps manuellement, toutes les heures. Bien qu'il existe des systèmes de mesure automatique de la planéité des pièces à la sortie du four, leur utilisation est très peu répandue.
- Stabilité dimensionnelle (calibre et défauts d'équerrage), surtout sur les produits non rectifiés. Elle est généralement vérifiée manuellement à l'aide de tables munies de palpeurs mécaniques actionnés par l'opérateur. Les systèmes automatiques offrant une mesure en continu de la planéité à la sortie du four donnent généralement des informations sur les dimensions des pièces traitées et leur défaut d'équerrage. Cependant, comme signalé précédemment, leur utilisation reste minoritaire.
- Air de refroidissement par commande manuelle de vannes et réglage de la position des tuyaux de refroidissement direct.
- Air de combustion au moyen d'un manomètre manuel et remplissage de fiches de contrôle régulièrement. Les fours les plus avancés sont dotés de systèmes de réglage du pourcentage air-gaz à partir des propres consoles de commande, mais il s'agit là encore d'une fonctionnalité peu répandue dans le parc actuel de machines.

Bien que le contrôle de ces paramètres critiques soit effectué régulièrement et méthodiquement, il est ponctuel et tous les relevés sont généralement sur papier, ce qui pose d'énormes difficultés pour leur exploitation par des systèmes d'information supérieurs. Dans certaines usines nouvellement implantées, des systèmes d'acquisition de données sont mis en place pour que certains contrôles critiques puissent imputer automatiquement les résultats dans des applications informatiques, mais l'exploitation des informations générées n'est observée dans quasiment aucun cas. En ce sens, on considère qu'il est très important d'intégrer des systèmes d'inspection dimensionnelle en sortie de four, qui seront connectés à des systèmes de collecte de données afin de disposer d'informations en continu sur la qualité du produit à la sortie même des fours. Cela peut constituer une grande aide dès lors qu'il est nécessaire de procéder à des réglages des conditions de cuisson, pour avoir plus de détails sur le comportement du four dans des conditions anormales de fonctionnement, comme des changements de format ou la présence de vides à l'intérieur du matériau.



Dans l'étape de cuisson, il n'est détecté, à l'égal de ce qu'il se passe dans les autres sections du processus de fabrication, aucun outil pour la gestion détaillée des rendements de production des fours. Même si, de manière générale, il est important de disposer de ces données pour toutes les sections, cette nécessité est encore plus grande dans la section de cuisson puisque les fours constituent généralement le goulet d'étranglement du processus de fabrication céramique, quand on travaille avec une zone tampon intermédiaire. De même, il est considéré qu'il est intéressant de disposer, en plus des informations relatives aux spécifications de travail dans chaque ordre de fabrication, des données relatives aux contrôles de processus réalisés sur le produit lors de phases antérieures au processus. De cette façon, pendant la cuisson, il serait possible d'anticiper certaines situations associées à un écart de paramètres de fabrication dans les sections de fabrication précédentes.

Il est jugé indispensable, en travaillant sur la ligne, de posséder des applications qui fournit numériquement et de façon automatisée des informations sur les caractéristiques des pièces traitées par chaque canal du four. De même, il serait intéressant de pouvoir mettre en place des instruments pour la détection de gradients latéraux dans les conditions de cuisson (température et pression statique, essentiellement), lesquels, comme cela a été démontré dans de nombreux travaux de recherche, sont une source significative d'instabilités dans le processus de cuisson ([voir paragraphe 3.2.4.2](#)) et d'un manque de qualité du produit final. Une attention toute particulière devrait être portée aux phases de refroidissement des fours dans lesquels, avec des investissements relativement restreints, il est possible d'intégrer une instrumentation additionnelle qui fournira des informations précieuses pour améliorer les propriétés des produits fabriqués. Ainsi, par exemple, le refroidissement direct est généralement contrôlé par un seul thermocouple au niveau de la partie inférieure des rouleaux disposés sur le même plan. L'ajout de trois thermocouples de chaque côté du four dans les modules de refroidissement direct et le traitement des données fournies par ceux-ci permettraient d'obtenir facilement la carte thermique d'une zone, qui a une grande influence sur de multiples propriétés du produit fini. Avec les systèmes actuels de contrôle des fours, l'influence des vides à l'intérieur des matériaux sur la qualité des produits traités est considérable. Le fait de disposer d'une instrumentation additionnelle sur le four peut être d'une grande utilité pour comprendre les causes de la variabilité des propriétés du produit associées à la présence d'interruptions de l'alimentation du matériau dans le four et peut ouvrir les portes à une optimisation du processus à partir de ce point de vue.

### 3.2.4.2 Systèmes de contrôle dans la section de cuisson

Comme nous venons de l'indiquer, la cuisson est une des étapes les plus importantes du processus céramique puisque c'est lors de cette étape que sont conférées aux pièces leurs caractéristiques techniques et esthétiques finales. Qui plus est, il s'agit de l'étape thermique avec la plus grande consommation en énergie. Les variables du four sur lesquelles il est possible d'agir et qui déterminent aussi bien les caractéristiques des pièces que la consommation du four sont : la distribution de températures, la pression et la composition des gaz à l'intérieur du four, et essentiellement la quantité d'oxygène. En utilisant le langage de contrôle, il s'agit d'un système avec des paramètres distribués où il faut contrôler les courbes complètes et non pas uniquement une valeur de ces courbes.



Figure 3.16. Mesure des gradients transversaux de température avec un rouleau à captation.

En général, bien qu'il y ait eu des tentatives de contrôle de la courbe de pression et même du pourcentage en oxygène des gaz à l'intérieur du four<sup>62,63</sup> seule la température est mesurée et contrôlée en continu tout au long du four. En dépit de cela, cette mesure est souvent insuffisante et les différences de température sur la largeur du four (profils transversaux) sont importantes. Il existe des équipements permettant de mesurer la distribution transversale de température. Les équipements les plus connus sont le rouleau multi-thermocouple<sup>64</sup> et la sonde de température Datapaq.

Le rouleau multi-thermocouple a, extérieurement, l'apparence d'un rouleau métallique classique (figure 3.16) mais, à l'intérieur, il est équipé de thermocouples permettant de mesurer le profil transversal dans n'importe quelle zone du four, au niveau inférieur et en continu (Figure 3.17). Toute modification ou opération dans le four (modification de la température de consigne, de la pression d'air, du diamètre ou du type de buses des brûleurs, etc.) influe sur le profil de température et, grâce à ce système, il est possible de déterminer immédiatement cette influence. Pour analyser une autre zone, il faut changer le rouleau de position.

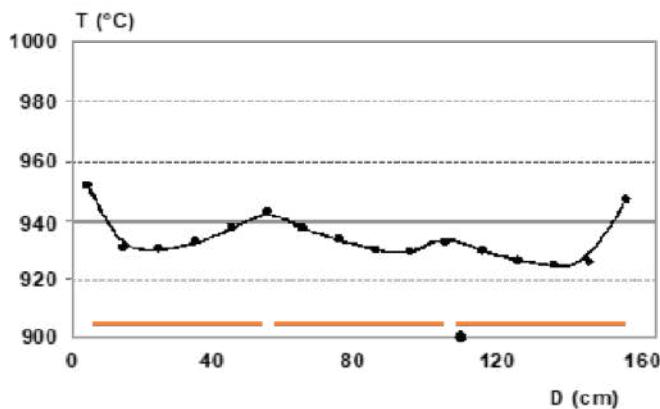


Figure 3.17. Gradients transversaux de température à l'intérieur d'un four monocouche à rouleaux.



La sonde Datapaq donne des informations sur la courbe de température complète. Il s'agit d'un dispositif électronique situé dans un boîtier faisant office de barrière thermique et auquel sont connectés des thermocouples placés sur la pièce. L'ensemble est introduit à l'intérieur du four et permet d'obtenir la distribution de température d'une façon analogue à ce qui est fait avec la sonde utilisée dans les séchoirs. Ce dispositif donne une instantanée de la distribution de température. En fonction de la position des thermocouples, il est possible d'enregistrer aussi bien la température de la surface supérieure que celle de la surface inférieure. Le principal inconvénient de l'équipement est la préparation de la mesure, qui est laborieuse, et la nécessité de garantir que l'introduction de la sonde ne perturbera pas le profil de température, et notamment qu'aucun «espace vide» ne se crée dans le four.

Malgré tout, les courbes de température, de pression et de pourcentage d'oxygène ne sont pas les variables du produit cuit. Les variables que l'on souhaiterait réellement contrôler sont les dimensions (calibres et absence d'orthogonalité : défauts d'équerrage), les courbures et l'aspect visuel (tons, défauts de surface et fissures). Souvent, le problème réside dans la mesure en continu de ces propriétés à la sortie du four, du fait des températures élevées des pièces à cet endroit et/ou du fait que certaines de ces propriétés peuvent s'altérer avec le temps (courbures différenciées).

Comme précisé précédemment, il existe actuellement des dispositifs de mesure en continu des dimensions et, en principe, il serait possible d'avoir des informations sur l'aspect visuel. Des travaux d'étude du rapport entre les variables thermiques et les courbures ont été également menés<sup>65</sup>. Cependant, bien que l'on dispose de moyens techniques de mesure pouvant fonctionner à chaud et que l'on connaisse souvent la zone du four influant sur la caractéristique finale du produit, le contrôle automatique du four n'est pas encore maîtrisé. Le plus gros problème réside dans la définition des variables sur lesquelles il faut agir ainsi que dans les «effets secondaires» de ces actions. Ainsi par exemple, la modification de la température dans une zone du four pour corriger des calibres pourrait avoir un impact sur la tonalité des pièces. Le contrôle des courbures, notamment des courbures irrégulières, est encore plus complexe<sup>66,67,68</sup>.

### 3.2.4.3 Données minimales à intégrer dans la section de cuisson

Enfin, pour conclure avec la révision de la section de cuisson, le tableau 3.7 reprend les informations minimales jugées nécessaires à une gestion correcte des opérations de cette section.

**Tableau 3.7.** Variables et données minimales requises dans la section de cuisson pour jeter les fondements du "jumeau numérique" du processus de fabrication.

Niveau d'information	Données/description
<b>RENDEMENTS ET GESTION DE PRODUCTION</b>	Ordre de production, référence de lot ou trace de production
	Référence article
	Avancée ordre de fabrication par rapport à planification (%)
	Disponibilité (D) = Temps de production / Temps disponible (%)
	Rendement (R) = Production réelle / Production théorique (%)
	Qualité (C) = Quantité pièces considérées comme perte / Quantité de pièces pressées (%)
	Distribution motifs d'arrêt
	Distribution motifs de perte
	OEE = D x R x C (%)
<b>VARIABLES DE PROCESSUS</b>	Référence chariot déchargement pièces
	Température supports à l'entrée (°C)
	Indexation position pièce dans rang four
	Température de consigne à chaque point de contrôle du four (sup-inf) (°C)
	Température réelle à chaque point de contrôle du four (sup-inf) (°C)
	*Température gaz cheminée fumées (°C)
	Vitesse de rotation ventilateur fumées (% ou tr/min)
	Pression set point réglage tirage (mm ca)
	Pression réelle réglage tirage (mm ca)
	Différence pression cuisson/refroidissement supérieur (mm ca)
	Différence pression cuisson/refroidissement inférieur (mm ca)
	*Température gaz cheminée refroidissement (°C)
	*Vitesse de rotation ventilateur refroidissement (% ou tr/min)
	Température air combustion (°C)
	*Température gaz naturel (°C)
	*Pourcentage ouverture vanne gaz anneau (%)
	*Pourcentage ouverture vanne air combustion (%)
	*Pression gaz naturel dans brûleurs (mm ca)
	*Pression air combustion dans brûleurs (mm ca)
	Gradient thermique dans refroidissement (°C)
	Gradient thermique dans zone de cuisson (°C)
	*Température air refroidissement direct (°C)
	*Position ouverture vannes réglage air refroidissement (°C)
	Durée cycle cuisson moyen (min)
	Plan chargement pièces dans chariot
	Référence chariot chargement de pièces
	Statistique défauts détectés par machine d'inspection pièces crues
<b>CONSOMMATION DE RESSOURCES</b>	Dimensions pièces sortie four indexées par canal (mm)
	Courbure pièces sortie four indexées par canal (mm)
	État marche/arrêt four (Booléen)
	Consommation de gaz naturel dans four (Nm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> de produit fini)
<b>COÛTS VARIABLES</b>	Consommation électrique du four et systèmes auxiliaires (kW h/m <sup>2</sup> de produit fini)
	Consommation RH (personnes/équipe ou personnes/ m <sup>2</sup> de produit fini)
	Coût du gaz naturel (€/m <sup>2</sup> de produit fini)
	Coût des rouleaux (€/m <sup>2</sup> de produit fini)
	Coût électricité (€/m <sup>2</sup> de produit fini)
	Coût RH (€/m <sup>2</sup> de produit fini)



Comme pour le reste des sections, des données additionnelles sont exigées pour l'obtention de l'ensemble des informations du **tableau 3.7**. Ces données additionnelles sont reprises dans le **tableau 3.8**.

**Tableau 3.8.** Données additionnelles requises pour l'obtention des informations minimales nécessaires à la définition du "jumeau numérique" dans la section de cuisson.

Niveau d'information	Données	Origines des données
RENDEMENTS ET GESTION DE PRODUCTION	Temps de marche four sans vides (h)	Automate de gestion et automatisation ou système externe de comptage
	Production planifiée (m <sup>2</sup> )	Information ERP ou système gestion
	Production théorique four (pièces ou m <sup>2</sup> /s)	Information ERP ou système gestion
	Production théorique four cumulée (m <sup>2</sup> )	Automate de gestion et automatisation ou système externe de comptage
	Surface par pièce (m <sup>2</sup> /pièce)	ERP, fiche de produit ou système de gestion
	Production réelle four cumulée (m <sup>2</sup> )	Automate de gestion et automatisation ou système externe de comptage
	Pièces en entrée de four (unités)	Automate de gestion et automatisation ou système externe de comptage
	Pièces sortie four (unités)	Automate de gestion et automatisation ou système externe de comptage
	Pièces déviation sortie (unités)	Automate de gestion et automatisation ou système externe de comptage
	Pièces chargées chariots (unités)	Automate de gestion et automatisation ou système externe de comptage
	Pertes de production (pièces ou m <sup>2</sup> )	Imputées manuellement ou enregistrées automatiquement par des compteurs
	Motifs d'arrêt	Imputés par les opérateurs ou directement obtenus d'automates
VARIABLES DE PROCESSUS	Motifs de perte	Imputés par les opérateurs ou directement obtenus d'automates
	Nombre de pièces par rang (unités)	Automate du four, ERP ou fiche de produit
	Largeur pièce (mm)	Automate du four, ERP ou fiche de produit
	Longueur pièce (mm)	Automate du four, ERP ou fiche de produit
	Position vides four (% ou m)	Automate du four
	Nombre pièces par rang chariot	Automate système chargement
	Nombre pièces par plan chariot	Automate système chargement
CONSOMMATION DE RESSOURCES	Nombre plans chariot (unités)	Spécifications chariots
	Répartition de personnel	ERP ou système de gestion de RH
	Équipe de travail ou équipe postée active	ERP ou système de gestion de RH
	Consommation gaz naturel (m <sup>3</sup> )	Compteur de gaz numérisé
	Température gaz naturel (°C)	Pt-100 compteur de gaz numérisé
	Pression alimentation gaz naturel (Pa)	Transducteur pression compteur de gaz numérisé
COÛTS VARIABLES	Consommation électrique équipements (kW h)	Analyseurs de réseau numérisés
	Prix électricité (€/kW h)	ERP, contrat fournisseur ou "scraping" web
	Prix gaz naturel (€/kW h)	ERP, contrat fournisseur ou "scraping" web
	Prix moyen RH assignées (€/per)	ERP ou système de gestion
	Pouvoir calorifique gaz naturel (kW h/Nm <sup>3</sup> )	ERP, contrat fournisseur ou "scraping" web

### 3.2.5 Classification

Le processus de fabrication se termine, dans la majorité des usines, dans la section de classification où le matériau est sélectionné en fonction de ses propriétés finales pour le classer dans des groupes ou références où toutes les pièces possèdent les mêmes caractéristiques, selon des tolérances prédéterminées.

La classification est une des étapes qui a dernièrement connu les changements les plus significatifs du point de vue du contrôle automatique. L'arrivée des premiers équipements de classification automatique (Surface Inspection et Massen <sup>69,70</sup>) a fait que de nombreux fabricants de machines ont proposé leurs propres équipements de classification. Plusieurs facteurs ont provoqué le récent succès de ce type d'équipements : développement d'ordinateurs rapides, programmes d'ordinateur complexes et caméra à haute résolution.

La classification de carreaux céramiques est un processus complexe parce que l'appréciation des caractéristiques esthétiques d'un carreau est difficile à quantifier en termes mathématiques, compréhensibles pour un ordinateur. Actuellement, pour certains types de modèles, les erreurs des systèmes de classification automatiques sont inférieures à celles commises par le personnel en charge de la classification.

Préalablement à l'entrée des pièces dans les machines de classification, et même pendant le développement de l'ordre de production, des échantillonnages continus sont habituellement effectués pour connaître par avance la tonalité du produit qui sera postérieurement classé. Ce contrôle exhaustif est réalisé visuellement dans des cabines de tonalités, mais il pourrait y avoir un plus haut niveau de digitalisation avec l'introduction de méthodologies de gestion de la couleur comme celles que commencent à proposer quelques sociétés spécialisées.

En général, quasiment tous les fabricants d'équipements de classification du produit proposent des outils permettant que toutes les informations collectées pièce par pièce, par les machines de classification, puissent être centralisées. Cependant, on relève un manque d'exploitation des informations, du fait de l'absence de corrélation des informations avec le reste des variables de production, ce à quoi il faut ajouter la difficulté à utiliser ces données pour déceler rapidement des informations précieuses. C'est pourquoi, il est considéré qu'il est indispensable de pouvoir développer, ici aussi, des interfaces d'affichage particulièrement adaptées aux besoins de la section et mettre en évidence rapidement la progression des paramètres de qualité de l'ordre de fabrication en cours.

La séquence de contrôles réalisés tout au long des lignes de sélection est, en général, la suivante :

- Contrôle de résistance mécanique par rouleau presseur.
- Contrôle de qualité des motifs graphiques par des systèmes à vision artificiel.



- Évaluation de la qualité de la surface du produit par un opérateur qualifié, y compris dans les cas dans lesquels l'entreprise dispose d'une machine à inspection automatique
- Mesure de la planéité et du calibre de façon automatisés.

Comme indiqué précédemment, si les informations collectées dans cette section sont dûment intégrées et exploitées, leur potentiel sera grand pour offrir des solutions d'optimisation du processus de fabrication et améliorer la prise de décision associée à la qualité du produit. De plus, en associant un système adéquat de suivi de la traçabilité du produit, qui reliera les informations obtenues dans la section de classification avec celles du reste du processus de fabrication, cela générerait une structure de données permettant de connaître, très précisément, les conditions de fabrication de la totalité du matériau transféré au département de logistique des entreprises. Atteindre ce niveau d'information serait important, non seulement pour l'amélioration des processus mais également pour la logistique à suivre et la commercialisation du produit, puisque cela jetterait les fondements pour suivre l'ensemble du cycle de vie du produit, de sa conception et fabrication jusqu'à son achat par le client final.

Comme dans les sections précédentes, dans la classification, il n'existe généralement pas d'outils pour la gestion de l'efficacité de production sur la base de la mesure de paramètres comme le rendement et la disponibilité des machines.

Pour conclure avec la révision de la section de classification, le **tableau 3.9** reprend les informations minimales jugées nécessaires à une gestion correcte des opérations de cette section.

**Tableau 3.9.** Variables et données minimales requises dans la section de classification pour jeter les fondements du "jumeau numérique" du processus de fabrication.

Niveau d'information	Données/description
<b>RENDEMENTS ET GESTION DE PRODUCTION</b>	Ordre de production, référence de lot ou trace de production
	Référence article
	Avancée ordre de fabrication par rapport à planification (%)
	Disponibilité (D) = Temps de production / Temps disponible (%)
	Rendement (R) = Production réelle / Production théorique (%)
	Qualité (C) = Quantité pièces considérées comme perte / Quantité de pièces pressées (%)
	Distribution motifs d'arrêt
	Distribution motifs de perte
	OEE = D x R x C (%)
<b>VARIABLES DE PROCESSUS</b>	Référence chariot déchargement pièces
	Dimensions côté X (mm)
	Dimensions côté Y (mm)
	Gauchissement côté X (mm)
	Gauchissement côté Y (mm)
	Calibre pièce
	Distribution calibres
	Statistique défauts détectés par machine d'inspection pièces crues
	Défauts détectés par opérateur d'inspection
	État marche/arrêt machine de classification (Booléen)
<b>CONSOMMATION DE RESSOURCES</b>	État marche/arrêt empaquetteuse (Booléen)
	Consommation en carton ( $m^2/m^2$ produit)
	Consommation en matériel fongible (plastique, feuillards, cornières, etc.) ( $m$ ou $m^2/m^2$ produit)
	Consommation électrique en classification et systèmes auxiliaires ( $kW h/m^2$ de produit fini)
<b>COÛTS VARIABLES</b>	Consommation RH (personnes/équipe ou personnes/ $m^2$ de produit fini)
	Coût en cartons ( $€/m^2$ de produit fini)
	Coût en fongible consommé ( $€/m^2$ de produit fini)
	Coût électricité ( $€/m^2$ de produit fini)
	Coût RH ( $€/m^2$ de produit fini)

Les données additionnelles collectées dans le **tableau 3.10** sont requises pour élaborer l'ensemble des informations précédemment exposées.



**Tableau 3.10.** Données additionnelles requises pour l'obtention des informations minimales nécessaires à la définition du "jumeau numérique" dans la section de classification.

Niveau d'information	Données	Origine des données
<b>RENDEMENTS ET GESTION DE PRODUCTION</b>	Temps de marche four machine classification (h)	Automate de gestion et automatisation ou système externe de comptage
	Production planifiée (m <sup>2</sup> )	Information ERP ou système gestion
	Production théorique machine classification (pièces ou m <sup>2</sup> /s)	Information ERP ou système gestion
	Production théorique machine classification cumulée (m <sup>2</sup> )	Automate de gestion et automatisation ou système externe de comptage
	Surface par pièce (m <sup>2</sup> /pièce)	ERP, fiche de produit ou système de gestion
	Production réelle machine classification cumulée (m <sup>2</sup> )	Automate de gestion et automatisation ou système externe de comptage
	Pièces entrée machine classification (unités)	Automate de gestion et automatisation ou système externe de comptage
	Pièces sortie machine classification (unités)	Automate de gestion et automatisation ou système externe de comptage
	Pièces déviation machine classification (unités)	Automate de gestion et automatisation ou système externe de comptage
	Pièces emballées dans cartons (unités)	Automate de gestion et automatisation ou système externe de comptage
	Pertes de production (pièces ou m <sup>2</sup> )	Imputées manuellement ou enregistrées automatiquement par des compteurs
	Motifs d'arrêt	Imputés par les opérateurs ou directement obtenus d'automates
	Motifs de perte	Imputés par les opérateurs ou directement obtenus d'automates
<b>VARIABLES DE PROCESSUS</b>	Nombre de pièces par carton (unités)	Automate de la machine de classification, ERP ou fiche de produit
	Largeur pièce (mm)	Automate de la machine de classification, ERP ou fiche de produit
	Longueur pièce (mm)	Automate de la machine de classification, ERP ou fiche de produit
	Nombre cartons par palette (unités)	Automate de l'empileur
<b>CONSOMMATION DE RESSOURCES</b>	Répartition de personnel	ERP ou système de gestion de RH
	Équipe de travail ou équipe postée active	ERP ou système de gestion de RH
	Consommation cartons (unités)	Automate de gestion et automatisation ou système externe de comptage
	Consommation fongible (unités)	Automate de gestion et automatisation ou système externe de comptage
	Consommation électrique équipements (kW h)	Analyseurs de réseau numérisés
<b>COÛTS VARIABLES</b>	Prix électricité (€/kW h)	ERP, contrat fournisseur ou "scraping" web
	Prix carton (€/m <sup>2</sup> )	ERP ou système de gestion
	Prix moyen RH assignées (€/per)	ERP ou système de gestion
	Prix fongible (€/unité)	ERP ou système de gestion

### 3.2.6 Situation générale

Le **tableau 3.11** résume la situation de l'automatisation lors des différentes étapes du processus de fabrication de carreaux céramiques, du point de vue des variables critiques de processus. Ce tableau révèle que le degré d'automatisation n'est pas le même dans toutes les étapes du processus de production, comme cela a été commenté précédemment.

Dans certaines de ces étapes, il n'est pas encore possible de mesurer en continu la variable à contrôler (par exemple, la taille pendant le broyage), passage préalable pour aborder l'automatisation. Dans ces cas, un effort supplémentaire de R&D est nécessaire pour trouver l'élément capteur adéquat pour mesurer et, postérieurement, aborder le contrôle automatique de l'opération.

Dans d'autres cas, il est possible de mesurer la variable en continu, mais sans parvenir à la maintenir dans les valeurs de consigne de façon automatique. C'est le cas, par exemple, de la température et de l'humidité des pièces à la sortie du séchoir. Dans ces deux cas, l'effort à réaliser est moindre que dans le précédent puisque la technologie de mesure est au point.

Enfin, dans certaines étapes, il y a un contrôle automatique d'une des variables les plus intéressantes. C'est le cas, par exemple, du séchage par atomisation où il est possible de contrôler automatiquement la valeur de l'humidité de la poudre des presses. Cependant, dans la majorité des cas, le degré d'implantation des systèmes de contrôle à l'échelle industrielle est très faible, comme le montre le tableau. Par conséquent, il existe une opportunité d'amélioration dans différents aspects du processus de production, opportunité qu'il ne faut pas laisser passer et qui, en plus d'apporter des informations sur le développement des différentes étapes, peut permettre, sans nul doute, de réduire les coûts de production et d'améliorer la qualité du produit final, pour une meilleure compétitivité des usines de production.



**Tableau 3.11.** État de l'art dans la mesure et le contrôle des variables de produit dans les différentes étapes de la fabrication de carreaux céramiques.

Étape	Variable mesure	Mesure*	Technologie de mesure en continu	Variable manipulée	Manipulation*	Degré d'implantation
BROYAGE	Densité suspension	A	Capteur à effet Coriolis	Débit eau	A	Faible
	Viscosité suspension	A	Capteur vibrant	Débit défloculant	M	-
	Résidu	M	-	Diverses	M	-
ATOMISATION	Débit suspension	A	Capteur électromagnétique	Pression Pompes	M	-
	Humidité atomisation	A	Capteur à infrarouge	Vanne brûleur / Température	A	Moyen
PRESSAGE	Humidité support	A	Capteur à infrarouge	Pression consigne	A	Faible
	Densité apparente	A/M	Rayons X	Pression consigne	M	Faible
SÉCHAGE	Température de pièce	A	Pyrométrie	Température consigne / Distribution gaz	M	Élevé
	Humidité	A	Capteur radiofréquence	Température consigne / Cycle séchage	M	-
DÉCORATION DANS CLOCHE	Débit émail	A	Capteur électromagnétique	Ouverture vanne	A	Moyen
	Densité	M	-	Quantité d'eau	M	-
	Viscosité	M	-	Quantité d'eau / Additifs	M	-
AUTRES APPLICATIONS DE DÉCORATION	Aspect visuel	A/M	Caméra CCD	Diverses	M	Faible
	Diverses	M	-	Diverses	M	-
CUISSON	Dimensions	A	CCD linéaire	Température / Autres	M	Moyen
	Courbure	A	Télémètres laser et à ultrasons	Température / Autres	M	Faible
	Aspect visuel	M	-	Température / Cycle Air brûleurs	M	-
CLASSIFICATION	Dimensions/ Courbure	A	CCD linéaire et télémètres	---	A	Élevé
	Aspect visuel	A/M**	Caméras CCD	---	A	Moyen

\* A : Automatique ; M : Manuel

\*\* Dans certains cas, la classification automatique n'est pas encore complètement fiable.



# Chapitre 4: Outils de visualisation. Jumeau numérique



Dans le chapitre 3 du Guide, nous avons passé en revue les niveaux d'automatisation des différentes étapes du processus de fabrication de carreaux céramiques, tout en mettant en avant les données minimales qui, de façon continue et automatisée, devraient être obtenues directement à partir du processus de fabrication ou d'autres systèmes d'information, afin de pouvoir mettre en place un "jumeau numérique" du processus céramique. Le présent chapitre décrit le reste des systèmes d'information typiques d'une usine et pouvant contenir des informations précieuses pour l'obtention du "jumeau numérique", que ce soit du processus de fabrication en particulier ou de l'ensemble des étapes opérationnelles de l'entreprise. Le chapitre est complété par une approche de ce qui pourrait être un "jumeau numérique", pour un fabricant de carreaux céramiques.

## 4.1 Outils de visualisation et gestion assistée par ordinateur

Dans le contexte de l'Industrie 4.0, il est souvent fait référence à une série d'outils de software destinés à la visualisation et gestion des processus propres aux affaires des entreprises. De la planification des ressources à la gestion logistique ou des entrepôts de produit fini, en passant par la gestion des relations avec les clients ou la réalisation de la production, tous ces processus d'affaires disposent aujourd'hui de multiples outils permettant de les gérer ou de les exécuter avec l'assistance d'un ordinateur. Ces outils, bien qu'ils soient d'une grande importance du point de vue de l'implantation de l'Industrie 4.0, sont propres à ce que serait la troisième révolution industrielle. En effet, son apparition dans les entreprises est associée à l'informatisation de ces dernières, ce qui, comme nous l'avons vu dans le chapitre d'introduction du Guide, bien que ce soit une condition essentielle à la mise en place de l'Industrie 4.0, s'inscrirait dans les étapes préalables de digitalisation. Les particularités des outils software de visualisation et gestion les plus largement utilisés dans le secteur céramique, dans le cadre de la production, sont décrites par la suite. D'autres outils relatifs à la logistique et au marketing, comme par exemple les systèmes de gestion d'entrepôts ou les CRM (Customer Relationships Management), ne seront pas traités dans ce document.

### 4.1.1 Systèmes ERP : Enterprise Resources Planning

Le concept de système de planification des ressources de l'entreprise (ERP) puise son origine au XXème siècle, dans les années 40. Pendant la Seconde Guerre Mondiale, l'armée américaine a développé une méthodologie de contrôle de la logistique dans ses approvisionnements, dénommée MRP (Material Requirement Planning). À partir des années 70, cette méthodologie a été progressivement transférée à l'industrie afin de gérer sa chaîne de fournitures pour l'adapter du mieux possible aux besoins de production. Initialement, le MRP était exclusivement utilisé pour la gestion des stocks, mais avec l'informatisation progressive des processus industriels, il a également été de plus en plus utilisé pour la gestion des horaires d'exploitation et des achats de matière première.

Dans les années 80, les systèmes MRP ont évolué vers une gestion complète de la chaîne de valeur et ont permis d'analyser l'état des inventaires et les processus de vente pour optimiser leur gestion. Enfin, en vue de couvrir les besoins des nouveaux modèles d'entreprise, dans les années 90, les MRP ont évolué vers les ERP actuels qui centralisent en une seule solution de gestion tous les départements de l'entreprise, comme représenté sur la **figure 4.1**.

D'après sa définition, un système ERP devrait intégrer les données relatives à la quasi-totalité des départements de gestion de l'entreprise afin qu'elles puissent être consommées par les différentes parties intégrantes de l'entreprise au moment où elles en auront besoin. En général, le fonctionnement d'un ERP est structuré sur la base de modules, processus, transactions et programmes, lesquels sont connectés entre eux à travers une base de données commune. Chaque module, comme ceux présentés par exemple sur la **figure 4.1**, fait référence à un domaine de gestion, qui à son tour dispose de processus spécifiques qui génèrent des transactions, ces dernières étant gérées par les programmes de l'ERP, et tout ce fonctionnant de façon conjointe et intégrée. Cette structure permet au software, avec un bon paramétrage, de s'adapter aux besoins spécifiques de chaque entreprise, après consultation de ses propres processus d'affaires. Cette structure de fonctionnement fait que les systèmes ERP offrent une série d'avantages par rapport à d'autres applications de comptabilité ou de gestion moins intégrées :

- L'adaptabilité du software.
- La réduction de duplicité de l'information.
- La gestion intégrale de l'entreprise.
- L'amélioration dans la prise de décisions.
- La réduction des coûts et de la complexité de la gestion de l'entreprise au niveau global.



**Figure 4.1.** Modules habituellement disponibles dans une solution ERP pour la gestion de ressources



En fonction de l'environnement dans lequel s'effectue la gestion des données, à ce jour, il est possible de distinguer trois types de systèmes ERP. Initialement, les systèmes ERP résidaient dans des serveurs ou systèmes informatiques situés dans les propres locaux de l'entreprise et constituaient les dénommés ERP en local ou "on-premise". Le développement progressif d'internet et des services "cloud" a fait apparaître de plus en plus de systèmes ERP travaillant directement dans le "nuage". Enfin, il existe également des applications hybrides combinant le stockage d'informations en local et dans le "nuage". Le choix du type de système ERP dépendra des besoins et exigences propres à chaque entreprise.

En utilisant un système ERP "on-premise", l'entreprise est responsable de la sécurité, de la disponibilité et de la gestion du software, raison pour laquelle elle doit posséder un département systèmes dédié à une partie de ses ressources à la gestion de l'infrastructure. Cependant, le fournisseur propose également, en général, des services d'intégration et de support après-vente. L'installation "on-premise" comporte des avantages comme un meilleur contrôle, mais l'investissement initial est plus risqué et de nombreuses solutions de ce type ne supportent pas des dispositifs mobiles ni "wearables".

Aujourd'hui, la gestion d'une entreprise céramique, sans que celle-ci ne dispose d'un système ERP implanté et adapté à ses besoins, est quasiment inconcevable. De manière générale, du point de vue du processus de fabrication, le système ERP typique d'une entreprise céramique devrait intégrer au minimum des modules relatifs aux achats, à l'inventaire et à la production. À travers ces modules, l'ERP doit contenir des informations portant sur les articles ou références de produit que l'entreprise peut fabriquer, en incluant leurs descriptions physiques et les paramètres les plus importants (dimensions, finition, nom de modèle, tonalité, calibre, etc.). Il s'agit d'informations clés pour structurer adéquatement les liens entre les différents processus de l'entreprise, des phases de développement jusqu'à celles de commercialisation, en passant, évidemment, par la production du produit. Ces informations, rattachées par le biais d'un module d'achats ou module similaire aux fournisseurs de matières premières, garantissent en plus la continuité de la chaîne de fourniture, ce qui donne de la flexibilité à l'approvisionnement de matières premières en temps et en forme.

Bien qu'ils ne fassent pas directement l'objet de ce Guide, d'autres modules comme ceux des ventes et de la comptabilité sont essentiels à d'autres départements de l'entreprise, comme le département commercialisation et le département marketing. Les informations contenues dans ces modules peuvent être d'une grande aide pour, par exemple, concentrer des actions de vente, connaître des tendances commerciales ou des tendances du marché.

#### 4.1.2 Systèmes de Planification et Séquencement de la Production

Même si les systèmes ERP peuvent offrir la possibilité de disposer de modules spécifiques pour la planification de la production, en général, dans de nombreux secteurs de production, ces activités sont exercées en utilisant des paquets logiciels spécifiquement

développés à cette fin. Traditionnellement, surtout dans les entreprises céramiques de petite taille, la planification de la production est effectuée à partir de l'expérience des responsables d'usine et des besoins ponctuels du marché. Cependant, au cours des dernières années, les usines de taille moyenne ou grande ont commencé à utiliser des systèmes de planification et séquencement de la production garantissant une exploitation des usines dans des conditions optimales d'efficacité.

En général, les systèmes de planification définissent les quantités et références de produits qu'il est nécessaire de fabriquer sur une période de temps déterminée, soit pour couvrir un certain stock de produit, soit pour répondre à une série de commandes précises. De leur côté, les systèmes de séquencement indiquent quelle est la séquence optimale de traitement que doit suivre un produit déterminé pour être livré à un moment précis. Cette séquence optimale peut habituellement être définie sur la base de différents critères comme obtenir un temps minimum de fabrication, atteindre un coût minimum de fabrication ou encore obtenir un produit de qualité maximale. De plus, et de manière générale, les systèmes de planification utilisés dans l'industrie céramique sont axés sur la production par lots, en opposition avec des systèmes de planification utilisés dans d'autres industries et qui peuvent être axés sur une production en continu, voire en série.

La planification et le séquencement de la production sont de la plus grande utilité dès lors qu'ils sont utilisés conjointement. Les deux puissent leur origine dans la première Révolution Industrielle. À cette époque, il est vrai que leur rôle était secondaire du fait de la petite taille des familles de produits qui étaient fabriqués sous forme de gros lots, mais leur importance commençait déjà à être significative. À la fin du XIXème siècle, les produits fabriqués étaient de plus en plus complexes et variés. De ce fait, il a été nécessaire de créer dans les fabriques les dénommés "bureaux de contrôle de la production", lesquels se chargeaient de générer les plans de production en prenant en considération les deux concepts clés dans la programmation de la production : les priorités, autrement dit les commandes de fabrication ou ordres de travail à exécuter en premier lieu, et la capacité de fabrication, autrement dit quelles quantités de produit peuvent être fabriquées sur des lignes de fabrication déterminées, compte tenu des conditions d'exploitation.

Le développement des outils et stratégies de planification et séquencement de la production a été impulsé par divers ingénieurs comme Frederick Taylor et Henry Gantt. Le premier, connu comme étant le fondateur de l'organisation scientifique du travail, a développé le concept de *Production Control Office* dont la finalité, comme cela a été commenté, était de créer des plans d'action, de contrôle et de surveillance des opérations et un inventaire de l'usine pour que celle-ci travaille avec efficacité. Ainsi en 1911, Taylor est devenu un des pères de l'Administration Scientifique<sup>71</sup> en développant des idées pour l'amélioration des travaux de production, plus précisément par l'optimisation de l'utilisation des ressources impliquées<sup>72</sup>. Pour sa part, l'américain Henry Gantt a développé des diagrammes de suivi de processus qui portent son nom et sont encore utilisés de nos jours<sup>73</sup>. Ces diagrammes ont été conçus pour pouvoir comparer l'avancée envisagée d'un processus de production par rapport à l'avancée réelle du processus.



Cependant, c'est au cours de la Seconde Guerre Mondiale que s'est le plus intensifié le travail de recherche et développement de méthodes et outils qui permettraient de gérer correctement les ressources de production, initialement par rapport aux progrès en matière de produits de guerre et, postérieurement, dans d'autres secteurs industriels. À la fin des années 30, le concept de recherche opérationnelle <sup>74</sup> a commencé à être utilisé. Ce concept est né d'une volonté constante d'appliquer la méthode scientifique aux activités de production. Après la guerre, de nombreux groupes de recherche ont vu l'utilité d'appliquer tout ce qui avait été étudié à des domaines autres que le domaine guerrier. Cette révolution de la recherche d'opérations est née de la programmation linéaire qui a été développée dans les années 40 <sup>75</sup> et qui a été appliquée à des problèmes de production, mais non pas directement au séquencement. George Dantzig a inventé la méthode Simplex en 1947 <sup>76</sup>, une méthode utile et puissante pour résoudre la programmation linéaire de façon manuelle, ce qui permettra de simplifier la résolution des modèles. Après cela, les années 50 ont vu le développement d'algorithmes orientés vers le séquencement comme ceux de Johnson, le SPT et l'EDD, portant respectivement sur les temps de traitement et de livraison. Il convient également de citer les algorithmes de McNaughton qui, en 1959 <sup>77</sup>, est parvenu à résoudre le problème de minimisation du temps total des processus de travaux interrompables sur des machines identiques.

Dans les années 60, alors que les modèles étaient de plus en plus complexes, la méthode de résolution Branch-and-Bound <sup>78</sup> a été développée, une méthode par laquelle étaient énumérées toutes les solutions possibles que pouvait avoir un problème et était trouvée la solution optimale parmi celles-ci, ce qui permettait de rejeter un grand nombre de solutions de façon anticipée avec de simples analyses d'amélioration des objectifs fixés par le modèle. Avec l'apparition des ordinateurs, les possibilités se sont de plus en plus développées. De grands modèles complexes étaient facilement résolus grâce aux premiers ordinateurs capables de réaliser un grand nombre de calculs et de résoudre des problèmes jusqu'alors impossibles à résoudre. C'est à la fin des années 70 que Garey et Johnson ont développé la théorie de la complexité computationnelle <sup>79</sup> qui classe les problèmes conformément à leur structure et difficulté. Cela a permis en outre de définir les ressources nécessaires pour résoudre un problème déterminé de séquencement de la production.

Avec la généralisation des ordinateurs, des paquets logiciels spécialement dédiés au séquencement de processus ont commencé à être développés, permettant ainsi aux responsables des usines de production d'accéder à ces techniques qui étaient jusqu'alors uniquement à la disposition des chercheurs. Ces paquets informatiques reposent sur des modèles de séquencement qui peuvent être déterministes ou stochastiques. Les modèles déterministes sont ceux dans lesquels la sortie du modèle est entièrement déterminée par les valeurs des données saisies pour les modèles et par les conditions initiales. En revanche, les modèles stochastiques sont ceux qui prennent en compte l'élément aléatoire des événements, pour une entrée de données et de conditions initiales exactes. La sortie du modèle sera différente à chaque fois que celui-ci sera résolu. Bien évidemment, la nature a un élément stochastique mais ces modèles sont considérablement plus

compliqués. Un modèle déterministe peut apporter beaucoup plus d'informations dans le champ du séquencement puisqu'il peut directement prédire quels doivent être la distribution et l'ordre optimal des ressources et des tâches. En ce sens, les modèles déterministes sont considérés comme les plus appropriés, le rôle des départements de Contrôle de la Production étant de travailler avec la réalité et de prendre des décisions sur les éventuels écarts par rapport au séquencement d'origine.

À l'heure actuelle, dans le secteur de la céramique, la planification et le séquencement de la production sont souvent réalisés dans les entreprises en utilisant des classeurs Excel. Ces classeurs sont généralement créés et tenus à jour par une seule personne qui, à son tour, par des réunions quotidiennes ou hebdomadaires avec les commerciaux, la direction des exploitations et les chefs de section ou atelier, se charge de les compléter pour répartir la charge de travail sur les différentes lignes de production.

Cette façon de procéder vient de l'époque où les sections de production étaient des îlots d'information et le software de gestion industrielle disponible était rare. C'est pourquoi, cette situation étant surmontée, il s'agit d'une méthodologie de séquencement complètement inappropriée et inefficace, pour trois raisons essentiellement.

Premièrement, parce qu'elle ne permet pas de bénéficier des avantages non négligeables du dynamisme dans la distribution des charges de travail, lequel dynamisme garantit une maximisation de la disponibilité des machines et équipements, avec comme conséquence, une réduction des coûts et une amélioration de l'efficacité de la production à tous les niveaux. Deuxièmement, parce qu'il n'est pas possible de lui intégrer l'information fournie par des systèmes de suivi de production en temps réel, ce qui empêche d'agir immédiatement pour reconduire des situations anormales de fonctionnement. Et enfin, elle ne permet pas une gestion partagée de l'information, ce qui rend difficiles le travail en équipe et les processus de prise de décision à différents niveaux. En effet, quand le bon déroulement de la séquence de production dépend d'une personne, celle-ci devient un élément indispensable à l'entreprise de telle sorte que son absence ou les éventuelles erreurs commises peuvent supposer un coût élevé pour l'entreprise.

Les systèmes de planification et séquencement sont une condition indispensable pour atteindre les indices maximum de productivité. Un bon programme de séquencement doit calculer les besoins en main d'œuvre, machines et équipements pour disposer d'un nombre précis de commandes terminées en un certain temps. Comme pour les calculs nécessaires, de façon complémentaire, il devrait pouvoir générer les ordres de fabrication (OF) en indiquant la quantité et les ressources fournies pour l'exécution des tâches. Après planification et lancement de l'ordre de fabrication, il faudrait en plus réaliser un suivi de la production à partir des données communiquées, par un système MES par exemple, afin de vérifier que ce qui a été planifié et ce qui est exécuté concordent dans le cadre de spécifications prédéfinies. Dans le cas contraire, le système devrait être capable de communiquer les différences relevées et de proposer des alternatives pour recontrôler la situation. Bien évidemment, pour pouvoir réaliser toutes ces actions, le software de sé-



quancement doit être connecté à de multiples systèmes comme, par exemple, l'ERP, afin de connaître l'état des ressources et des commandes ou demandes de produits, l'équipement de l'usine et l'éventuel système de gestion MES, pour connaître l'état des machines intervenant directement ou indirectement dans la production, ou le système de gestion de la maintenance, pour connaître l'état des machines ou les maintenances programmées sur celles-ci.

#### 4.1.3 Systèmes MES/MOM

Dans les paragraphes préalables, nous avons présenté divers systèmes de gestion destinés à la planification et à l'administration des ressources nécessaires au bon déroulement des activités de production et des affaires des entreprises industrielles. À partir de là, il est maintenant nécessaire d'examiner les outils de gestion chargés de relier ces systèmes de planification de ressources, comme l'ERP ou le séquenceur, à la propre usine de production. Il existe essentiellement deux types de systèmes destinés à gérer l'exécution de la production et des opérations et à servir de lien entre l'usine et les systèmes de gestion des niveaux supérieurs : les MES (Manufacturing Execution System) et les MOM (Manufacturing Operations Management). Bien que la nomenclature de ces outils soit similaire et qu'il existe une certaine confusion au sujet de l'utilité de chacun d'eux, il faut souligner qu'ils font référence, comme nous le verrons par la suite, à des concepts différents.

L'acronyme MES est né au cours des années 80 alors l'acronyme MOM est arrivé quelques années plus tard pour faire référence non seulement à un espace d'application plus vaste mais surtout à un ensemble d'opérations s'inscrivant dans la norme ISA-95, en termes d'architecture et de fonctionnalités. En effet, le concept de MOM est sorti au moment de la fin de la rédaction de la norme ISA-95. Grossièrement, en dépit du fait que les aspects repris dans le MOM étaient déjà inclus, d'une certaine manière, dans les fonctions originales d'un MES, le MOM a mis l'accent, au-delà du cadre productif, sur la qualité, la maintenance et l'approvisionnement.

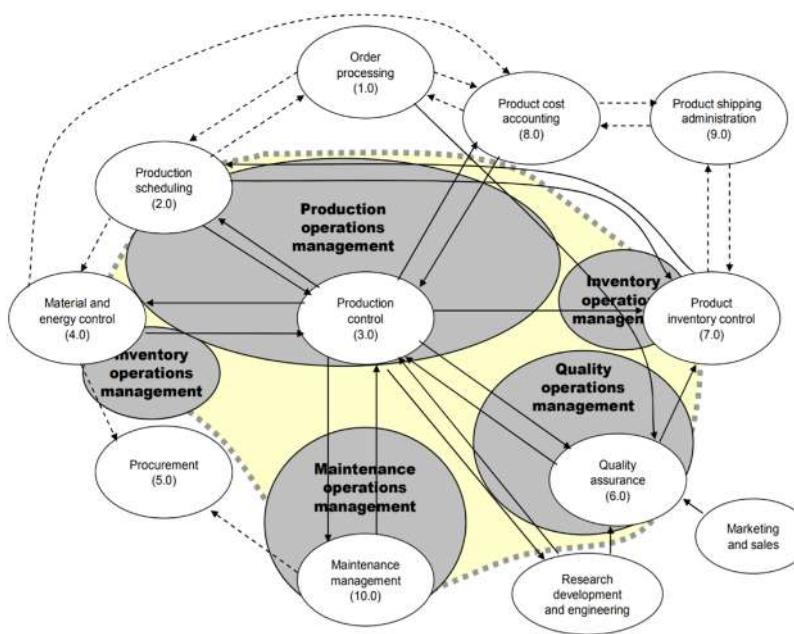
À l'origine, face à l'absence de systèmes de gestion d'entreprise ERP, le CIM situait les MES directement au niveau 4 de la pyramide d'automatisation. Cependant, dans les années 90, les systèmes ERP devenant la colonne vertébrale de la gestion d'entreprise, les MES se sont transformés en applications chargées de connecter la production aux systèmes de planification entrepreneuriale. Ainsi donc, avec le temps et à la suite du développement de l'automatisation et de l'introduction de la digitalisation des fabriques, les MES sont dorénavant au niveau 3 de la pyramide CIM, selon la norme ISA-95, et comprennent en principe les fonctionnalités suivantes :

- Acquisition de données
- Programmation de la production
- Gestion du personnel
- Gestion des ressources

- Suivi de la production
- Traçabilité
- Contrôle qualité
- Gestion du processus
- Analyse de rendement
- Gestion documentaire
- Gestion de la maintenance

Le concept du MOM, à partir de son intégration avec la normalisation ISA-95, se situe, à l'égal des MES, directement au niveau 3 défini par la norme. À son tour, le standard IEC 62264-3:2007 définit les activités s'inscrivant dans le MOM, comme les activités de fabrication facilitant la coordination du personnel, de l'équipement, du matériel et de l'énergie utilisés dans la transformation des matières premières en produits. Par conséquent, le MOM est considéré comme étant un système et une méthode fonctionnant comme un distributeur central d'informations et de données pour les couches 2 et 3 de la pyramide CIM étudiée dans le chapitre 2 ([voir figure 4.2](#)).

Le standard IEC 62264-3:2007 définit 4 modèles à incorporer dans un MOM : gestion des opérations de production, gestion des opérations de maintenance, gestion des opérations de qualité et gestion des opérations d'inventaire.



**Figure 4.2.** Schéma général d'un modèle MOM selon le standard IEC 62264-3:2007.



Cependant, la norme ISA-95 (Société Internationale de l'Automatisation) lui ajoute en plus une série d'activités de support comme :

- la gestion de la sécurité
- la gestion de l'information
- la gestion de la configuration
- la gestion des documents
- la gestion du respect de la réglementation
- la gestion des incidents et écarts

Le contrôle en temps réel et la visualisation des séquences de production, grâce au lien existant entre la fabrique (niveau I) et les systèmes d'information d'entreprise (niveaux IV et V), font du MOM un élément clé pour les entreprises de grande taille et les multinationales. Au contraire, pour les entreprises de céramique en général, il est recommandé, préalablement à l'incorporation d'une plateforme MOM, de disposer d'un système MES qui garantira une bonne exécution de la fabrication, directement connectée aux niveaux de gestion les plus élevés.

En fin de compte, un MES et un MOM se réfèrent tous deux au même domaine d'application : la gestion et le pilotage des opérations de fabrication respectant les normes de modélisation et d'intégration (ISA-95 et ISA-88). Par définition, un système MES va se charger d'exécuter en temps réel les opérations de fabrication (MOM) et permettra aux responsables d'usine de mettre en place des procédures d'amélioration continue grâce, par exemple, à :

- une meilleure communication de l'information (synchronisation, coordination et centralisation des flux d'informations)
- une simplification des processus de fabrication
- un respect des standards de qualité
- une gestion contrôlée des inventaires et des stocks
- un suivi optimisé de la qualité
- une traçabilité systématisée des processus et des produits
- une analyse et une amélioration régulières des rendements de production

À titre d'exemple, la **figure 4.3** montre une vue générale du point de contrôle d'un système MES pour la gestion de production d'une ligne d'émaillage dans une usine de céramique. Comme nous pouvons le remarquer, le MES fournit des informations sur l'OF en cours, les métriques de production générales relatives au rendement, la disponibilité et la baisse de qualité, ainsi que les causes d'inefficacité.

La frontière entre les fonctions d'un MES et celles d'un système ERP est encore difficile à distinguer pour de nombreuses personnes mais, sans être trop loin de la réalité. Il s'agit d'outils complémentaires, tous deux indispensables au bon déroulement des opérations d'une entreprise industrielle.

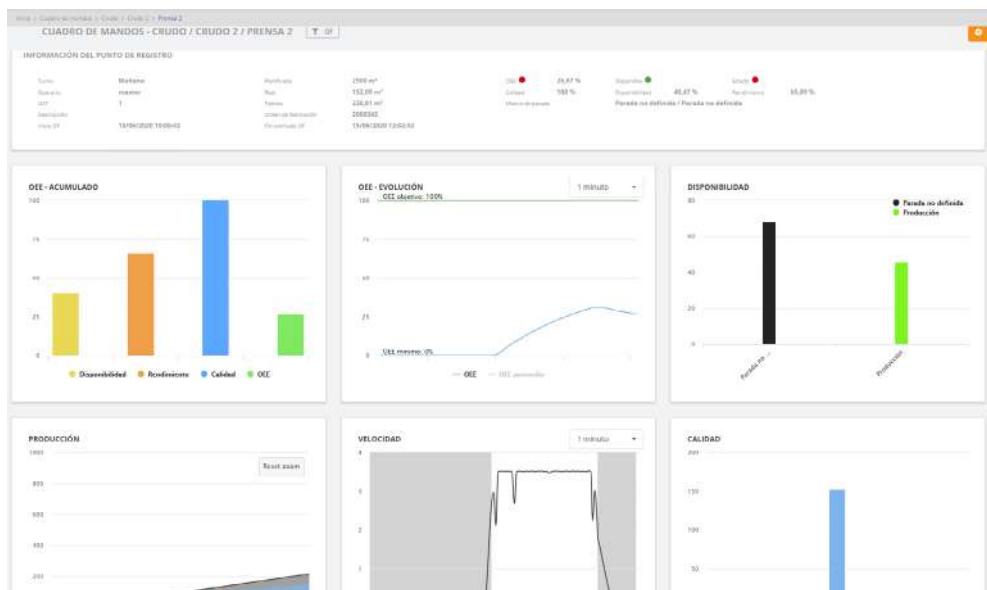


Figure 4.3. Vue générale des données de suivi de l'exécution de la production pour un point de contrôle dans une entreprise de céramique (ligne d'émaillage). Source : Nexus Integra.

Pendant de nombreuses années, l'industrie a mis l'accent sur l'automatisation de ses processus afin de gagner en productivité. Même s'il existe encore des entreprises qui n'en sont qu'au début de leur automatisation, ce n'est pas le cas du secteur céramique, lequel se distingue par de hauts niveaux d'automatisation et de surveillance. En effet, les grandes entreprises de céramique, tout comme les petites, ont réalisé de gros investissements dans des systèmes ERP pour centraliser leur gestion. S'agissant d'un outil transversal décisif pour la planification et l'organisation des ressources, le système ERP a permis d'intégrer les fonctions correspondant au niveau le plus élevé de la pyramide CIM. Ceci étant, pour les responsables de production, le plus important est l'exécution de la production, les responsables de production étant les principaux utilisateurs des systèmes MES qui permettent un contrôle opérationnel précis de la production, contribuant ainsi au développement de leur entreprise.

En ce sens, les systèmes ERP et MES se complètent pour garantir la diffusion et l'exploitation des informations de fabrication au sein de l'entreprise. En effet, les ERP et les MES ne travaillent pas à la même échelle de temps : un ERP ne travaille généralement jamais en-dessous de l'échelle temporelle de la demi-journée ou d'un horaire de travail posté (équipe de production), alors que le MES travaille sur une échelle de minutes ou dizaines de minutes. Cette différence d'échelle de temps masque une autre différence encore plus importante : l'ERP n'a pas été conçu pour capturer et traiter des données en temps réel avec la finesse associée à la conduite et au contrôle des processus ainsi qu'aux fortes exigences de traçabilité et d'amélioration des rendements de production.



En l'absence d'un système MES, il doit être fabriqué sans autre aide que simplement l'Ordre de Fabrication généré par l'ERP. Dans cette situation, dans le meilleur des cas, l'objectif est de communiquer au système ERP, à la fin de chaque ordre, l'ensemble des données qui la caractérisent (quantités réellement fabriquées, matières consommées en précisant leur origine, résultats des contrôles de production : temps d'exécution, pertes, etc.), à travers des formulaires gérés par le système ERP. Cela se traduit par des opérations d'imputation de données extrêmement coûteuses et dépendantes des utilisateurs, ce qui les rend peu fiables. Conscients de cela, dans de nombreux cas, les responsables d'usine et ingénieurs confient généralement au propre intégrateur du système ERP le développement d'un software personnalisé qui leur permettra de capturer des données au cours des différentes étapes de fabrication, de les synchroniser et, enfin, de transmettre des informations consolidées à l'ERP. D'une certaine manière, cela suppose de développer un système MES spécifique, ce qui n'est pas a priori l'option la plus appropriée au regard de la vaste offre de solutions existantes sur le marché, de sa scalabilité et, dans la majorité des cas, du gros investissement que suppose le développement de softwares sur mesure.

#### 4.1.4 Systèmes GMAO

Les systèmes GMAO ou CMMS (Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur ou Computerized Maintenance Management System, en anglais) sont des outils de software utilisés pour faciliter les activités de gestion des services propres à la maintenance des entreprises, que ce soit pour le personnel chargé de les planifier et de les superviser, ou pour les opérateurs chargés de les exécuter.

Les opérations de maintenance dans l'industrie ont connu une évolution cyclique tout au long de leur histoire. Initialement, pendant la révolution industrielle, la maintenance des machines était confiée aux propres ouvriers. Du fait que les machines étaient relativement peu complexes, leur utilisation quotidienne permettait aux ouvriers de disposer des connaissances nécessaires pour réaliser les tâches basiques de maintenance sans que cela suppose une baisse significative au niveau du rendement de leur travail. Avec le temps, les machines ont évolué et sont devenues de plus en plus complexes, ce qui a poussé les entreprises à créer en interne des départements exclusivement dédiés à la maintenance. Que ce soit dans l'un ou dans l'autre cas, il s'agissait toujours d'une maintenance corrective, autrement dit les interventions sur l'équipement avaient toujours lieu après la panne.

À la suite de la Seconde Guerre mondiale, le concept de fiabilité a pris une grande importance. Cela a conduit les départements de maintenance à consacrer une grande partie de leurs efforts non seulement à la réparation des pannes mais aussi à faire en sorte de les prévenir afin qu'elles ne surviennent pas. C'est ainsi qu'est née la maintenance préventive.

Par la suite, dans les années 70, l'idée est venue qu'il pourrait être plus rentable que les opérateurs conduisant les machines, et travaillant au quotidien avec celles-ci, se chargent de procéder à leur maintenance et de veiller à ce qu'elles soient toujours dans le meilleur état de fonctionnement possible. C'est ainsi qu'est née au Japon la Maintenance Pro-

ductive Totale (dont l'acronyme anglais est TPM), une maintenance qui impliquait que les tâches d'entretien soient réalisées par les opérateurs mêmes tandis que le personnel de maintenance se chargerait exclusivement de la maintenance relative à la réparation des pannes. Ce fait, allié à l'intégration progressive des ordinateurs dans l'industrie et au développement des systèmes de production de l'industrie de l'automobile, comme le système de production Toyota, a supposé l'implantation des premiers systèmes GMAO dans les environnements industriels, en cherchant à atteindre le paradigme de zéro panne.

La structure habituelle d'un système GMAO consiste essentiellement en une base de données avec les informations sur les actifs industriels de l'entreprise, la gestion des ressources, les ordres de travail et les ressources humaines, ce à quoi il faut ajouter un système d'analyse de l'information qui permet d'optimiser au maximum la prise de décisions face à de nouveaux besoins.

Bien qu'il existe de nombreuses solutions GMAO disponibles sur le marché et que chacune d'entre elles développe plus largement des éléments spécifiques et offre des outils additionnels pour couvrir certains besoins précis, en général, un système GMAO comprend les modules suivants :

- **Ordres de travail** : Assignation de ressources humaines, réserve de matériel, coûts, suivi d'informations importantes comme la cause du problème, la durée du défaut et les recommandations pour les actions futures.
- **Maintenance préventive** : Suivi des tâches de maintenance, création d'instructions pas à pas ou "checklists", liste des matériels nécessaires et autre détails. En principe, les programmes de gestion de la maintenance assistée par ordinateur programmement des processus de maintenance automatiquement en se basant sur des calendriers ou la lecture de différents paramètres.
- **Gestion d'actifs** : Registre relatif aux équipements et propriétés de l'organisation, incluant des détails, informations sur les garanties, contrat de service, pièces de rechange et tout autre paramètre qui pourra être utile à la gestion. Qui plus est, des paramètres peuvent être générés comme les indices d'état des infrastructures.
- **Ressources humaines** : Module éliminant le contrôle et la gestion des Ressources Humaines du Département ou Service de Maintenance.
- **Contrôle des inventaires** : Gestion des pièces de rechange, outils et autres matériels incluant le stock de matériels pour des travaux déterminés, l'enregistrement du stockage des matériels, la prévision d'achat de nouveaux matériels, etc.
- **Sécurité** : Gestion des autorisations et de la documentation nécessaires pour satisfaire à la réglementation en matière de sécurité.

Une tendance dans le monde de la gestion de la maintenance est la croissante sophistication de la maintenance basée sur l'état de l'actif. Ce type de maintenance comprend des processus de maintenance prédictive et préventive, qui peuvent être définis en fonction



de l'état de l'actif. Pour ce faire, les conditions physiques sont surveillées périodiquement ou en continu à la recherche d'attributs comme les vibrations, particules dans les huiles, usure, etc. de manière à ce que, par des algorithmes spécialement développés pour traiter les données générées par ces analyses, il soit possible de prédire, avec un certain degré de fiabilité, le moment où un équipement peut tomber en panne. De cette façon, la maintenance préventive peut s'effectuer à moindres coûts, tout en minimisant les actions de maintenance corrective.

La maintenance prédictive basée sur l'état est, par conséquent, une alternative à la maintenance corrective basée sur les pannes, qui ne se charge que de réparer les actifs une fois que ceux-ci cessent de fonctionner, ou à la maintenance préventive dépendant de l'utilisation, qui initie les processus en fonction du temps d'utilisation de l'actif ou de la lecture de quelques paramètres. Aujourd'hui, quasiment tous les systèmes GMAO du marché commencent à offrir des avantages pour aborder une maintenance prédictive. Cependant, il faut avoir à l'esprit que, pour que l'implantation de celle-ci soit efficace, il est nécessaire d'adapter les procédures de travail des entreprises et de générer une culture de la prise de décisions basée sur la génération d'informations de valeur à partir de la capture de données.

## 4.2 Le "jumeau numérique"

Les systèmes de gestion et de visualisation exposés dans le point précédent, bien qu'ils aient leur importance dans un environnement d'Industrie 4.0, ne constituent pas en soi des outils qui permettront de mener à bien la transformation de l'industrie céramique vers les standards de l'Industrie 4.0. Il s'agit d'outils d'une grande utilité pour visualiser et gérer des informations clés pour les entreprises et les doter de la transparence requise par l'Industrie 4.0. Cependant, en général, ils sont dépourvus des fonctions d'analyse permettant aux entreprises de se transformer en des entreprises souples avec une capacité d'auto-apprentissage sur la base de la prédiction des événements à venir. En ce sens, le "jumeau numérique" présenté dans le chapitre initial de ce Guide prend beaucoup plus d'importance. Ce "jumeau numérique" se nourrira nécessairement de données et d'informations alimentées par la plupart des outils décrits dans le paragraphe 4.1., mais, qui plus est, il sera capable de modeler le comportement du processus de fabrication et de simuler son futur comportement sur la base d'une série de données de lot. Ce paragraphe décrit tout d'abord les caractéristiques principales d'un jumeau numérique avant de présenter les possibilités d'implantation d'un jumeau numérique du processus de fabrication céramique.

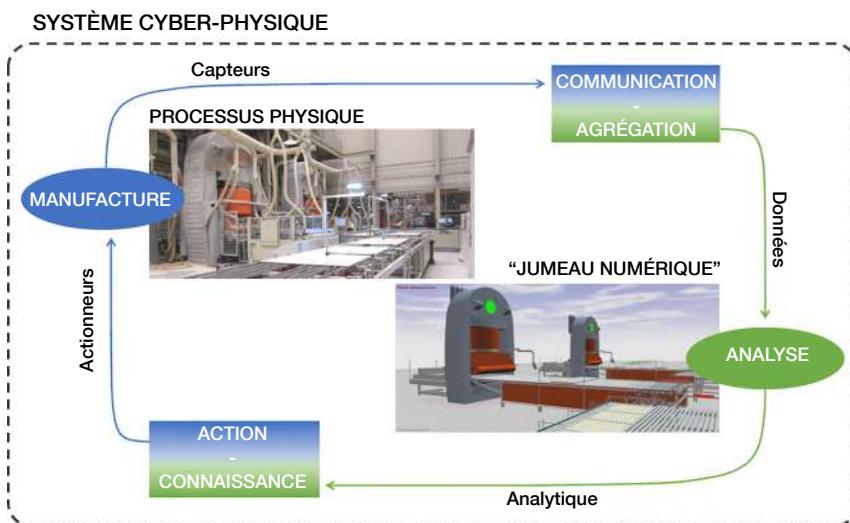
### 4.2.1 Caractéristiques générales d'un "jumeau numérique"

Sur des marchés de plus en plus concurrentiels, l'amélioration des mécanismes de prise de décision associée à la digitalisation des processus de fabrication représente une grande opportunité pour optimiser la productivité et l'efficacité des entreprises industrielles. En effet, dans un environnement globalisé et dynamique à forte complexité, la prise de décisions doit être effectuée correctement et le plus rapidement possible pour rester compétitif à long terme. Ainsi, le potentiel économique de l'Industrie 4.0 réside dans la disposition à accélérer

la prise de décisions de l'entreprise et à adapter les processus internes des organisations aux changements de l'environnement, grâce à l'analyse continue de grands volumes de données et à l'interconnexion entre les systèmes cyber-physiques et les personnes<sup>80</sup>.

Aujourd'hui, le niveau d'instrumentation avancé des processus industriels facilite la capture de données en de multiples points d'acquisition sur l'ensemble du cycle de production. En même temps, les technologies disponibles permettent d'enregistrer en temps réel tous les événements et états survenant dans un processus. Cela offre la possibilité de disposer d'un modèle numérique de l'usine, actualisé à tout moment, modèle connu sous le nom de "jumeau numérique"<sup>81</sup>. L'intérêt de disposer d'un "jumeau numérique" du processus de fabrication est, d'une part, de connaître en temps réel ce qu'il se passe pendant le processus et, d'autre part, de pouvoir gérer les décisions sur la base des informations générées à partir de données réelles. De nombreux travaux de recherche ont mis en évidence que le déploiement du "jumeau numérique" est une étape fondamentale de la transformation vers l'Industrie 4.0 de toute entreprise manufacturière<sup>82,83</sup>.

Dans ce domaine, le "jumeau numérique" constitue une représentation virtuelle et dynamique du système de production. Cette représentation, en utilisant différentes méthodologies de simulation, est capable de rester parfaitement synchronisée avec le système physique grâce à la combinaison de modèles mathématiques et une élaboration en temps réel des données communiquées par l'instrumentation de processus. L'ensemble formé par le "jumeau numérique" et l'environnement physique représenté constitue ce que l'on appelle un système Cyber-physique<sup>84</sup> (voir figure 4.4).



**Figure 4.4.** Système cyber-physique dans un environnement productif résultant de l'intégration entre le "jumeau numérique" et le monde physique.



Le fait de disposer d'un "jumeau numérique" dans un processus manufacturier comme la fabrication de carreaux céramiques offrirait la possibilité de simuler et optimiser le système de production, en contribuant à améliorer significativement la compétitivité, la productivité et l'efficacité. Ces actions d'optimisation se réfèrent généralement à trois points communs dans tous les processus de fabrication :

- Planification et contrôle de la production :

- Planification d'ordres de production sur la base d'hypothèses statistiques.
- Amélioration de la prise de décisions en usine grâce au support apporté par une analyse détaillée de la production.
- Planification et exécution autonome d'ordres de production sur la base de prédictions réalisées par le "jumeau numérique".

- Maintenance des éléments de production :

- Évaluation de l'impact des changements d'état en amont ou en aval lors d'une étape déterminée du processus.
- Identification et évaluation d'éventuelles mesures de maintenance préventive.
- Évaluation de l'état de fonctionnement des éléments de production sur la base de méthodes descriptives et d'algorithmes de "machine learning".
- Intégration, gestion et analyse combinée de données de processus et des machines tout au long du cycle de vie pour atteindre un plus haut niveau de transparence dans le diagnostic de l'état de l'équipement.

- Gestion et adaptation d'opérations en usine :

- Comparaison en temps réel des données traitées avec un "jumeau numérique" de l'usine travaillant à 100% d'efficacité pour détecter et identifier plus rapidement des écarts.
- Analyse continue du système de production, en évaluant d'éventuels changements dans les opérations planifiées, sur la base du traitement automatique de données.

En plus de ces aspects propres à la gestion de la production, si le "jumeau numérique" intègre des modèles de comportement du produit au cours du processus de fabrication, ses propriétés physico-chimiques peuvent être évaluées pendant tout le processus et mises en relation avec les variables de production. Cette possibilité contribue à améliorer non seulement l'efficacité de la production mais aussi la qualité des produits fabriqués, et à maintenir cette dernière à des niveaux optimaux.

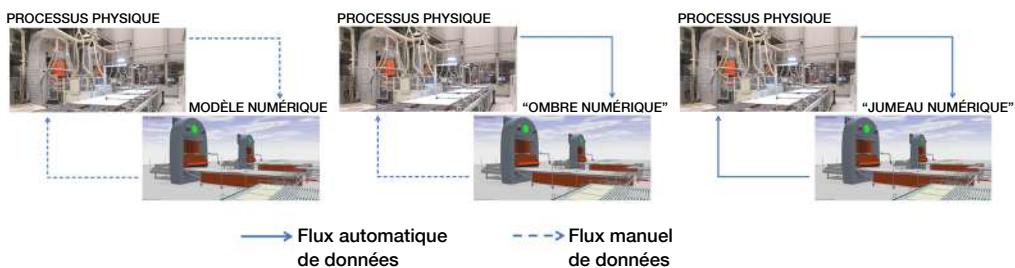
L'obtention d'un "jumeau numérique" implique une série d'étapes préalables, qui sont liées au degré d'intégration qui pourra être établi entre le processus physique et sa copie virtuelle ([voir figure 4.5](#)). Tout d'abord, il est indispensable de disposer d'un modèle digital, lequel est une représentation digitale du processus physique, qui n'utilise aucun type

d'échange automatisé de données entre le monde physique et l'environnement digital. Ces modèles peuvent être constitués par des modèles de simulation, des modèles mathématiques ou tout autre type de modèle d'objets physiques qui n'utilisent aucun type d'intégration automatique de données.

Après déploiement du modèle digital d'un processus, il existe la possibilité de générer son "ombre numérique" grâce à la mise en place d'un flux unidirectionnel et automatisé de données entre l'état du processus physique et le monde digital. Dans cette situation, un changement dans l'état du processus physique se traduit directement par un changement dans le processus digital, mais non pas vice-versa.

Enfin, si le flux de données entre le processus physique et le digital est complètement intégré dans les deux directions, il est possible de faire référence au "jumeau numérique". Dans cette situation, le processus digital exerce des actions de contrôle sur le processus physique, de telle sorte qu'un changement au niveau du processus physique conduit directement à un changement au niveau de l'état du "jumeau numérique" et vice-versa.

Implanter un "jumeau numérique" dans une entreprise de céramique est un véritable défi en raison, essentiellement, du fait que l'information est généralement décentralisée dans différents îlots de données, en l'absence, dans de nombreux cas, d'une unique origine valide<sup>85</sup>. Cependant, du point de vue de l'implantation d'un "jumeau numérique" du processus de fabrication, au cours des dernières années, des avancées significatives ont vu le jour dans l'intégration des données issues des différents équipements de production. En effet, il existe plusieurs expériences pilotes, comme celle décrite dans l'article intitulé "*A place-based policy for promoting Industry 4.0: the case of the Castellon ceramic tile district*"<sup>86</sup>, qui démontrent la possibilité d'intégrer complètement dans une usine de céramique les données industrielles relatives aux variables de processus de chaque étape du processus ainsi qu'aux variables de fonctionnement de l'équipement. Face à cette situation, il a été jugé intéressant d'explorer les possibilités de générer un modèle digital du processus de fabrication de carreaux céramiques en utilisant des outils de simulation et visualisation à code ouvert, qui jette les fondements de l'obtention du "jumeau numérique" dans un futur immédiat.



**Figure 4.5.** Flux d'informations possible entre le processus physique et le processus digital associé en fonction du degré d'intégration atteint.



#### 4.2.2 Modélisation numérique du processus céramique

Le processus de fabrication de carreaux céramiques, depuis leur façonnage jusqu'à leur classification et emballage final, répond parfaitement à un type de production selon le principe des événements discrets. En effet, le processus de fabrication céramique suit une série d'opérations de manipulation et de transformation physique qui se déroulent, dans des laps de temps définis, l'une après l'autre. Chacune de ces opérations suppose un événement discret. Dans une usine de céramique, des milliers d'événements par seconde se produisent sur l'ensemble des lignes de fabrication. Comme exemples de ces événements, nous pourrions citer l'exécution d'un cycle de pressage pour façonner un nombre déterminé de supports, le transport des pièces sur une ligne de convoyeurs pour leur déplacement entre les différentes étapes, l'introduction de pièces dans le chariot d'une zone tampon intermédiaire ou l'introduction des pièces dans les cartons en fonction de leur classification finale.

De par tout ce qui a été commenté précédemment, le processus de fabrication de carreaux céramiques, du façonnage jusqu'à l'emballage, s'inscrit parfaitement dans la typologie de processus discret. En opposition avec les processus continus, dans lesquels l'état du système change continuellement dans le temps, les processus discrets sont constitués d'une série de séquences ou d'événements qui ont lieu à un moment déterminé dans le temps. Les processus continus impliquent habituellement des opérations de transformation dans lesquelles sont manipulés des fluides comme, par exemple, les usines chimiques ou les raffineries de pétrole. Comme exemples de processus discrets, nous pourrions citer la majeure partie des processus manufacturiers comme la fabrication de carreaux céramiques, les systèmes de transport, les systèmes publics, comme les hôpitaux ou les administrations publiques, ainsi que tous les processus et systèmes impliquant la gestion de files d'attente.

Pour toutes ces raisons, pour la génération du "jumeau numérique" d'un processus de fabrication de carreaux céramiques, l'utilisation d'un outil de simulation dénommé "Simulation à Événements Discrets" (DES (Discrete-Event Simulation)) peut être d'une grande utilité. Cette méthodologie permet de modéliser un système déterminé comme une séquence (discrète) d'événements dans le temps. Pendant la simulation, chaque événement marque un changement dans l'état du système, étant considéré qu'aucun changement ne se produit dans le système<sup>87</sup> entre deux événements consécutifs, ce qui permet à la simulation de passer directement au moment où se produit l'événement suivant.

De manière générale, la DES s'utilise pour modéliser des systèmes impliquant une gestion de files d'attente. Le système est représenté comme des entités qui circulent entre les différentes activités qui constituent le processus, ces activités étant séparées par des files d'attente. Les files d'attente se remplissent d'entités quand celles-ci arrivent à une activité déterminée avec une vitesse supérieure à la vitesse à laquelle elles peuvent être traitées par l'activité. Même s'il peut sembler que très peu de systèmes peuvent être modélisés de la sorte, l'application de cette méthodologie est très variée, avec un grand nombre de systèmes ou processus répondant à la théorie des systèmes de files d'attente, que ce

soient des éléments physiques, des personnes ou des informations, ce qui est représenté par les entités qui circulent tout au long du système.

Dans un modèle DES du processus céramique, les pièces céramiques seraient des entités physiques qui circuleraient à travers des systèmes de transport, des empileurs, des systèmes de stockage et des équipements de traitement qui constituent les différentes lignes de la fabrique de céramique. À titre d'exemple, les files d'attente seraient le parc même des chariots guidés, qu'il peut y avoir entre les sections d'émaillage et de cuisson, ou les zones tampons de stockage vertical, qui se trouvent généralement en différentes parties des lignes de fabrication, communément dénommées "compensers".

L'implantation d'un modèle DES peut être réalisée en utilisant des bibliothèques spécifiques développées pour des langages de programmation de haut niveau comme C++ ou Python®. Cependant, dans la mesure des possibilités, il est préférable d'utiliser des outils à code ouvert dont l'utilisation ne requiert pas des connaissances avancées en programmation et permet d'obtenir, avec des temps de développement relativement courts, des solutions d'une grande utilité. Les paquets de simulation DES incluent généralement une interface utilisateur graphique, un moteur d'animations 3D et un ensemble complet d'objets et utilitaires pour la construction de modèles de simulation. Il s'agit de solutions orientées vers les objets, extrêmement rapides et évolutives jusqu'à des applications de taille considérable (des modèles avec plus de 300 000 entités ont été testés à des vitesses de traitement acceptables).

En plus du fait de présenter une courbe d'apprentissage à pente élevée, l'autre raison pour laquelle sont préférées les applications à code ouvert pour mener à bien le développement du modèle digital du processus céramique est que le code de programmation est généralement distribué librement. Cela permettra par la suite de modifier ou créer des objets et méthodes de modélisation qui permettront, si besoin est, d'adapter les développements apportés aux spécificités du processus de fabrication de carreaux.

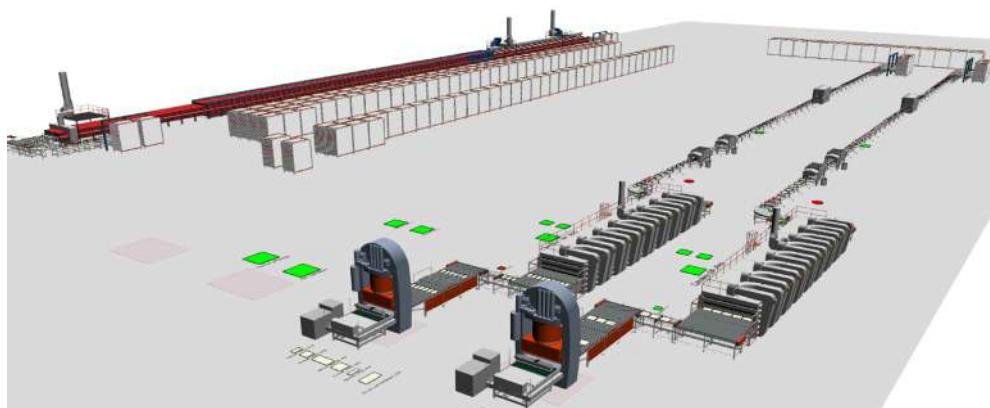


Figure 4.6. Vue 3D du modèle digital d'une usine de céramique. Modèle élaboré à l'aide d'un outil de simulation DES.



À titre d'exemple, la [figure 4.6](#) présente un modèle digital d'une usine de fabrication de céramique, lequel modèle est développé avec un outil de simulation DES. Le modèle est constitué de deux lignes de façonnage et décoration, toutes deux avec les mêmes capacités de production. Chacune des lignes compte une presse hydraulique d'une capacité maximale de pressage de 64000 kN, un séchoir horizontal de 20 m de long, 5 plans de séchage et 3,7 m de largeur utile, ainsi qu'une ligne d'émaillage avec plusieurs applications de décoration. Le processus est complété par un parc de stockage de matériau cru et cuit ainsi que par un four monocouche à rouleaux de 130 m de long et 2,7 m de largeur utile. Par simplicité, dans cet exemple, nous avons préféré ne pas inclure les sections de classification et d'emballage du produit final, en précisant cependant que l'outil utilisé permettrait leur implantation dans le modèle.

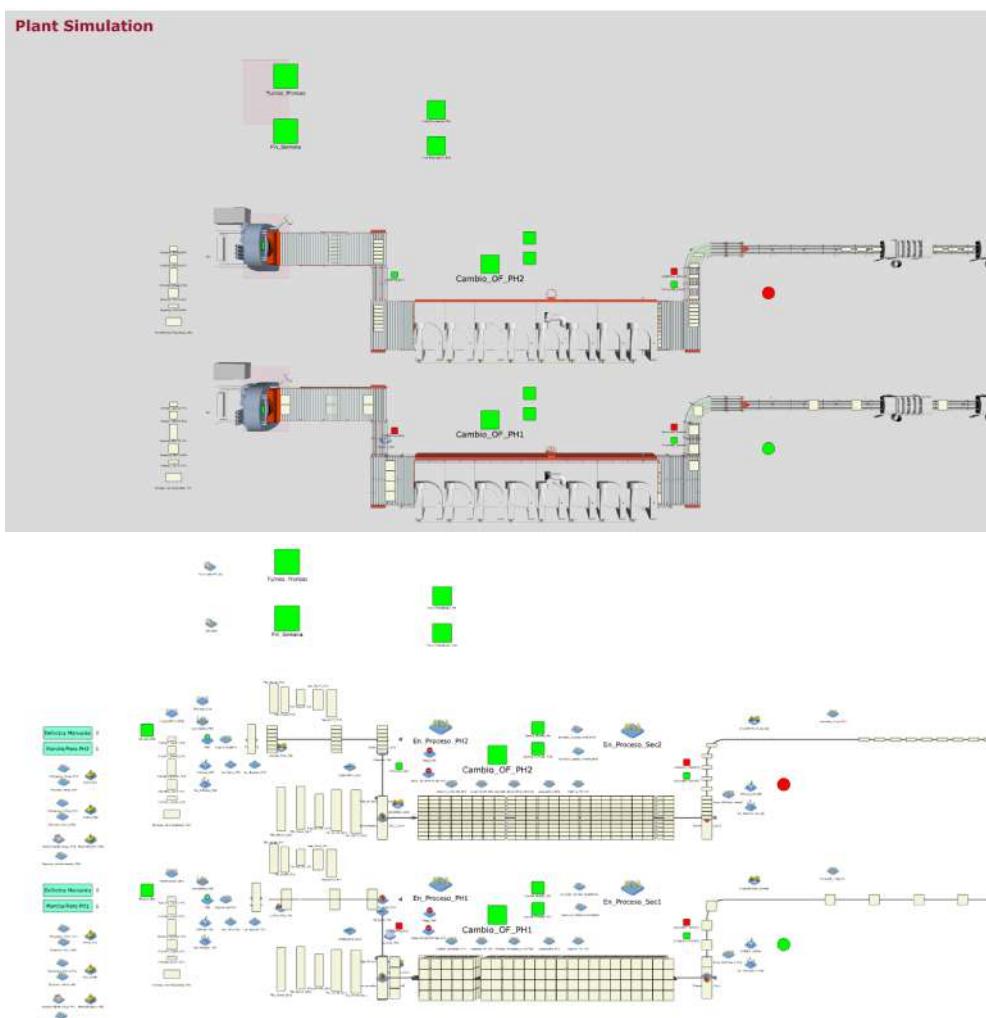
Un modèle digital utilisé pour simuler la fabrication de lots de carreaux céramiques doit prendre en considération toutes les dimensions de pièce pouvant être traitées dans l'installation modélisée. Dans le cas de l'exemple, les dimensions de pièce prises en considération sont les suivantes : 30 cm x 60 cm, 60 cm x 60 cm, 60 cm x 120 cm, 25 cm x 75 cm et 75 cm x 75 cm. De la même manière, afin de simuler correctement le fonctionnement de l'installation, le modèle doit connaître le régime de production et les capacités de l'équipement.

Avec l'ensemble de l'équipement utilisé dans l'exécution des différentes étapes de processus prises en considération, le modèle inclura tous les systèmes de transport nécessaires à la manipulation du produit semi-fini entre les étapes. Ainsi, le modèle permettra, par exemple, de simuler le transport des pièces sur les convoyeurs à rouleaux de sortie des presses, les formeurs de rangs à l'entrée des séchoirs et fours, les convoyeurs à courroies des lignes d'émaillage ou le stockage et le transport dans les chariots, entre autres. À titre d'exemple, les images de la [figure 4.7](#) illustrent, d'une part, la visualisation en 2D de la partie du modèle digital correspondant à la section de pressage et le début des lignes de décoration, et d'autre part, la vue schématique de la même zone du modèle, où sont reflétés les différents diagrammes de blocs et modules dans l'environnement de programmation utilisé. En somme, dans la simulation exécutée au moment des captures affichées sur la [figure 4.6](#), la ligne 1 (partie inférieure) traite des pièces rectangulaires de 75 cm x 75 cm de taille nominale cuite, alors que la ligne 2 produit des pièces rectangulaires de 25 cm x 75 cm.

#### 4.2.3 Intégration du modèle digital avec le processus de fabrication pour l'obtention du "jumeau numérique" céramique

Une fois que le modèle digital du processus est disponible, l'étape suivante est naturellement son intégration avec le processus de fabrication pour la génération de "l'ombre numérique" et par la suite du "jumeau numérique" céramique. Cette intégration passe aussi bien par l'acquisition de données directement issues du processus de fabrication que par la collecte d'informations contenues dans quelques-uns des systèmes de gestion décrits au point 1, tels que le système ERP, le système de planification ou le MES.

Pour configurer les paramètres des différents éléments constituant le modèle, la voie généralement à suivre est de définir une série de fichiers d'en-tête, pour chacune des dimensions de pièce à fabriquer. Ces fichiers, synchronisés avec les données actualisées du système ERP, comprennent, par exemple, les vitesses théoriques des différents éléments de transport, le nombre de pièces traitées par rang dans la presse, le séchoir ou le four, le nombre de pièces par rang et plan dans les chariots de stockage ou la durée des cycles de séchage et de cuisson.



**Figure 4.7.** Vues de la section de façonnage et début des lignes de décoration implantées dans le modèle digital pris en exemple. Rendu de la visualisation (à gauche) et vue en schéma de développement (à droite).



De plus, pour que le modèle digital permette de simuler des conditions réelles d'exploitation, des fichiers d'initialisation doivent être définis, fichiers dans lesquels figurera la planification qu'il est envisagé d'exécuter sur les différentes lignes de façonnage. Pour ce faire, bien évidemment, le modèle devra être constamment actualisé par rapport au système de planification de l'usine. De la sorte, pour chaque ligne, les ordres de fabrication planifiés seront repris de façon séquentielle, avec les dimensions et la quantité à fabriquer, dans chaque cas. En général, il faut faire en sorte que cette synchronisation entre les différentes applications de gestion et le modèle même s'effectue par le biais de fichiers type JSON, dûment implantés.

Enfin, pour simuler correctement le comportement du processus, le modèle devra recevoir les informations relatives aux conditions de fonctionnement de l'équipement et à la variabilité du processus. Il est conseillé de faire en sorte que la connexion avec l'équipement d'usine s'effectue par l'intermédiaire d'un serveur OPC en raison de sa simplicité en vue de l'intégration des données. Il faut également tenir compte que ce même serveur, une fois qu'il est possible de faire à nouveau interopérer le "jumeau numérique" avec le processus de fabrication, pourra être utilisé pour transmettre des données aux différents équipements de l'usine.

En ce qui concerne la variabilité du processus, le plus simple sera de doter le modèle de la variabilité associée aux processus industriels pour prendre en considération les interruptions et pertes de rendement de production suite aux pannes de l'équipement, opérations de maintenance préventive, baisses de production, interruptions pour incidents sur les lignes de convoyage, arrêts pour changements de modèle et arrêts liés aux changements de dimensions du produit fabriqué. Ceci permettra de simuler l'évolution de métriques de production typiques comme le sont la disponibilité, le rendement et la qualité, lesquelles métriques contribuent à l'OEE (Overall Equipment Efficiency) des lignes de production.

La solution la plus efficace sera d'implanter la variabilité du processus à l'aide des fonctions probabilistes fournies par le paquet logiciel utilisé. Ces fonctions peuvent être programmées en utilisant des algorithmes adaptés à partir de l'analyse et de la simulation de modèles <sup>88</sup>. Ces fonctions permettent également de générer de façon aléatoire des données qui s'ajustent à une distribution probabiliste déterminée, afin de simuler l'effet de toutes les variables indiquées. La sélection de la fonction de probabilité utilisée dans chaque cas d'effectuera sur la base de l'analyse des données générées par un système de traçabilité, comme la mise au point pendant le déroulement du projet décrit dans<sup>16</sup>, ou par un système MES paramétré comme il se doit. Sont indiquées ci-après quelques-unes des fonctions probabilistes pouvant décrire la variabilité du processus céramique dans son modèle digital :

### - Modélisation de la variabilité associée aux arrêts de processus

La variabilité associée aux arrêts dans le processus de production, que les arrêts soient planifiés ou non prévus, a un impact direct sur la disponibilité de l'équipement. En fonction de la typologie d'arrêt simulée dans chaque section de l'usine, différentes fonctions probabilistes peuvent être prises en considération :

- Interruptions de flux de produit sur les lignes de fabrication et pannes : ces arrêts peuvent être modélisés en utilisant une distribution probabiliste d'Erlang pour décrire la fréquence des interruptions et une distribution log-Normal pour la durée de ces arrêts.
- Maintenance programmée : les opérations de maintenance préventive, généralement réalisées de façon programmée, peuvent être modélisées en utilisant une série temporelle prédéfinie pour reproduire la fréquence des arrêts et une distribution log-Normal pour leur durée.

### - Modélisation de la variabilité de la cadence de production

Bien que dans des conditions réelles de fabrication, les équipements de production travaillent généralement à des vitesses constantes, au moment de modéliser le processus, il est intéressant d'incorporer une certaine variabilité à cette vitesse afin d'absorber certains arrêts de processus qui, de par leur courte durée, sont difficiles à modéliser de la façon précédemment décrite. En procédant de la sorte, il est possible de modéliser l'incidence des "micro-arrêts" dans le rendement des éléments de production. Pour envisager cela, il est possible d'utiliser des fonctions probabilistes qui modifient les vitesses de production de chaque élément. Par exemple, dans le cas des presses de façonnage, il est possible d'utiliser une fonction discrète qui indique la probabilité que la presse travaille sur une valeur de cycles de pressage par minute inférieure à la valeur établie.

### - Modélisation des baisses de production

Les baisses de production ont un impact direct sur la qualité de la production. Pour refléter leur incidence en différents points des lignes de fabrication, la génération de baisses peut s'implanter au moyen d'un générateur qui modifiera une propriété affectée à chacune des pièces traitées, laquelle indique si la pièce est défectueuse ou non. La probabilité que le générateur booléen de défauts soit vrai est fixée par une fonction mathématique extraite de l'analyse des données communiquées par le système de traçabilité. En somme, le modèle devra envisager la génération de baisses conformément aux différentes fonctions probabilistes aux points suivants du processus : sortie de presses, sortie de séchoirs, fin de la ligne d'émaillage, entrée du four, sortie du four et lignes de classification.





# Chapitre 5: Transparence et capacité prédictive. Intelligence artificielle



À près avoir présenté dans le chapitre précédent les différents outils de visualisation qui permettront à l'industrie céramique de se transformer en une Industrie 4.0, il est nécessaire d'aborder dans ce chapitre les techniques d'analyse qui permettront une exploitation systématisée des données. Tout cela, afin d'acquérir la souplesse propre à l'Industrie 4.0 et la capacité d'auto-apprentissage obtenue à partir de l'exploitation des informations générées par le propre processus de fabrication.

## 5.1 Généralités

Le chapitre est découpé en trois grands groupes de technologies : l'Intelligence Artificielle, le Machine Learning et le Deep Learning. Pour chacun de ces groupes, nous décrivons les concepts généraux, leurs caractéristiques principales, les avantages qu'ils offrent et quelques-unes de leurs principales applications dans les différents secteurs de production, avec une attention particulière apportée à l'industrie.

Avant de se pencher dans les détails sur chacun des blocs mentionnés, il est intéressant d'introduire quelques généralités de base à propos de ces blocs, et d'indiquer de quelle façon ils sont liés entre eux. D'une part, l'Intelligence Artificielle (IA) est, dans sa définition la plus large, toute technique permettant aux ordinateurs d'imiter l'intelligence humaine et son principal objectif est de faire en sorte que les ordinateurs puissent raisonner et apprendre comme un être humain.

Comme schématisé sur la [figure 5.1](#), l'IA englobe à son tour la connaissance liée au Machine Learning (ML), lequel comprend les algorithmes qui ont la capacité d'apprendre

sans être explicitement programmés. Par exemple, le ML regroupe des techniques statistiques permettant aux machines d'améliorer leurs tâches sur la base de l'expérience et de l'analyse des données collectées. Les réseaux de neurones artificiels (ANN) sont une des techniques les plus réputées du ML. Ce type de technique s'inspire du fonctionnement des systèmes nerveux biologiques et sert de passerelle entre le ML et le Deep Learning (DL). Ce dernier concept est un sous-ensemble du ML, constitué d'algorithmes qui permettent à un software de s'au-

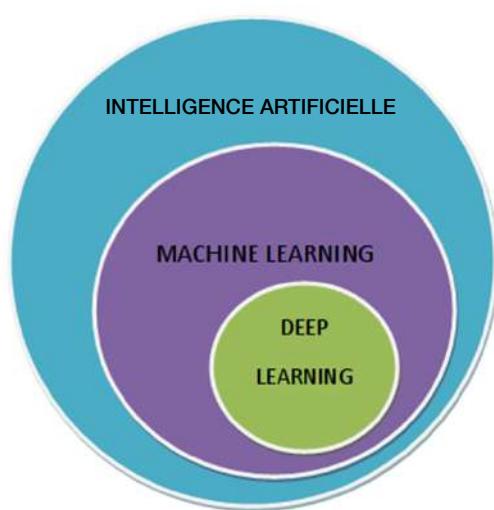


Figure 5.1. Relation entre l'Intelligence Artificielle, le Machine Learning et le Deep Learning.

to-entraîner pour exécuter des tâches comme la parole ou la reconnaissance d'images. Le rôle de ces tâches en DL s'exécute par l'exposition d'énormes quantités de données à des réseaux de neurones artificiels formés à partir de multiples couches. À cet égard, nous pouvons citer Borne (2017) : *"Le Deep Learning n'est qu'une forme complexe de réseau neural"*.<sup>89</sup>

Tous ces domaines qui viennent d'être présentés sont axés sur les étapes cinq et six décrites dans le processus de transformation décrit dans le chapitre initial du Guide, lesquelles étapes sont axées sur la capacité de prédiction des systèmes et leur postérieure adaptabilité ou amélioration des processus de prise de décisions. Ainsi donc, les techniques de ML sont particulièrement utiles dans ces deux étapes, et dans des cas plus spécifiques dans lesquels le système devra constamment s'adapter à une fluctuation significative dans les données d'entrée, celles de DL.

## **5.2 L'Intelligence Artificielle (IA)**

Le concept d'IA est né en 1956 (John McCarthy, 1955)<sup>90</sup>. Ceci étant, ce n'est pas avant les années 90 que l'IA prend de l'importance dans la société en raison du besoin des entreprises d'améliorer la capacité de traitement et d'analyse des énormes quantités de données dont elles disposent grâce à la digitalisation.

Sur ce point, l'idée principale de l'IA est d'exploiter toutes les informations numériques disponibles pour simuler le comportement et la pensée de l'Homme dans des situations spécifiques. Tout cela est rendu possible grâce au progrès de l'informatique, à l'augmentation de la capacité de traitement des équipements informatiques et à la possibilité de manipuler des quantités massives de données dans des temps relativement courts. De la sorte, l'IA peut acquérir et appliquer les connaissances et compétences apprises pour résoudre des problèmes que les humains ne peuvent aborder ou ne peuvent le faire que de façon très limitée.

### **5.2.1 Champs d'application de l'Intelligence Artificielle**

De façon formelle, l'IA peut être définie comme la capacité d'un système, que ce soit un ordinateur, un hardware, un software ou autre dispositif, d'acquérir et appliquer des connaissances et compétences. Les objectifs principaux de l'IA comprennent la déducation ou le raisonnement, la représentation de la connaissance, la planification, le traitement du langage naturel, l'apprentissage, la perception et la capacité à manipuler et déplacer des objets.

Un système d'IA est formé à partir d'une séquence finie d'instructions ou de règles qui spécifient les différentes actions que doit exécuter un ordinateur pour résoudre un problème. Ces instructions ou règles sont connues comme des algorithmes et varient en fonction du problème et des règles utilisées pour le résoudre.



À l'heure actuelle, cette discipline regroupe de nombreuses applications dans différents domaines, à partir de leur application aux problèmes les plus abstraits, comme peut l'être la démonstration de théorèmes mathématiques, jusqu'à leur application dans les problèmes les plus courants, comme le traitement rapide et efficace de données ou l'identification de systèmes. La **figure 5.2** présente les principaux domaines dans lesquels l'IA est présente aujourd'hui, lesquels s'appliquent au niveau de l'entreprise ou de la production mais sont aussi présents dans la majorité des applications qu'utilisent individuellement ou personnellement les utilisateurs, au quotidien. Comme exemples de la présence de l'IA à la portée de n'importe quel utilisateur, nous pouvons citer la reconnaissance faciale, les "chatbots" ou les assistants personnels intelligents.

L'IA, bien qu'étant une discipline relativement récente, a vu sa croissance et sa présence dans la société actuelle augmenter de façon exponentielle. Pour preuve, ce sont les grandes entreprises comme Google, YouTube, Amazon, Facebook, Apple ou Netflix, entre autres, qui sont actuellement à la tête des technologies de gestion et d'exploitation de données. Toutes ces entreprises développent leurs propres algorithmes, lesquels sont de plus en plus sophistiqués pour doter leurs produits et services d'une Intelligence Artificielle. Qui plus est, nombreuses sont ces sociétés qui ne se concentrent pas sur un seul domaine de l'IA, mais sur l'application de ses divers champs d'application en fonction du produit ou du service qu'elles offrent. C'est le cas de Google qui utilise le traitement de langages naturels (PLN) pour la traduction de textes, le Machine Learning (ML) pour la classification d'images ou la voix pour son assistant personnel.

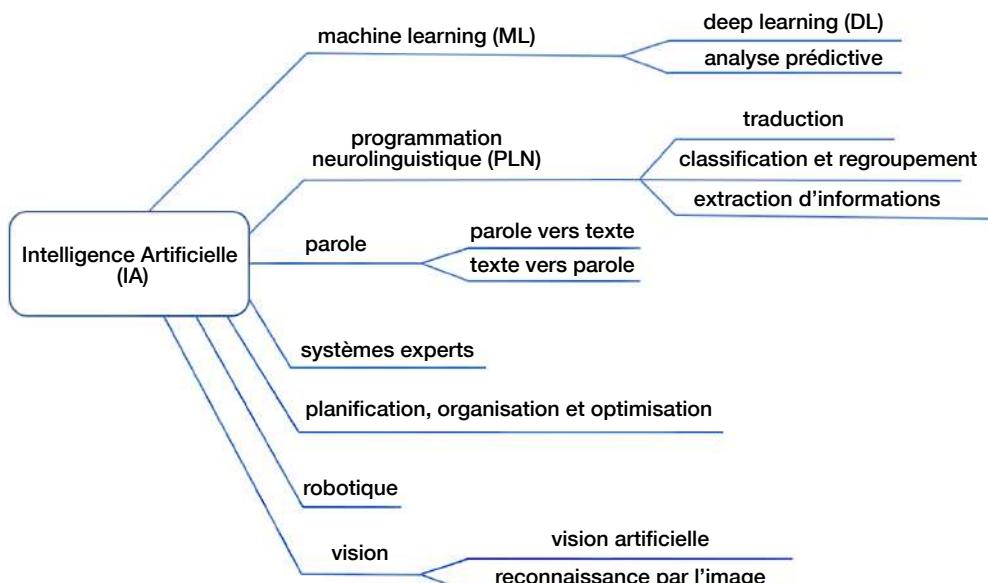


Figure 5.2. Principaux champs d'application de l'Intelligence Artificielle.

Par ailleurs, à la différence des grandes entreprises, les PME commencent maintenant à connaître ou appliquer l'IA et ses avantages, même si c'est de manière très progressive. Actuellement, la plupart des PME espagnoles, dont quasiment la moitié est issue du secteur industriel, considèrent que l'IA offre plus de bénéfices que de risques et environ 70% de ces entreprises pensent qu'il s'agit d'une technologie maintenant disponible mais qui a encore beaucoup de chemin à faire. Dans le secteur industriel, l'intelligence artificielle a le potentiel d'aider les industries de processus à améliorer significativement le rendement, la génération de valeur et le modèle d'affaires existant, par l'optimisation de l'expérience et de l'interaction avec le client, des opérations en usine, de l'administration, de la recherche et développement, etc. En tout cas, il faut préciser également que l'IA n'est pas uniquement synonyme d'amélioration du rendement et d'augmentation de valeur, mais qu'elle suppose également l'apparition de nouveaux produits et permet de proposer des services plus compétitifs.

Comme expliqué tout au long de ce Guide, les tendances industrielles sont axées sur un futur dans lequel les processus disposeront d'un support entièrement numérique et seront toujours exécutés dans des conditions optimales, avec une efficacité maximale en termes de ressources et d'énergie, avec une circularité habilitée de manière complètement numérique, qui garantira une collaboration maximale entre secteurs, et avec une réduction drastique des temps d'inactivité. Il est escompté que l'IA, outre le fait d'intervenir dans les tâches d'exploitation, les opérations de maintenance et les ventes, bénéficiera aux tâches administratives et aux étapes scientifiques impliquant la R&D. Tous ces changements auront un impact considérable sur les tâches dans lesquelles l'effort humain est requis, tâches qui seront progressivement supprimées et remplacées ou transformées en des opérations exécutées par des êtres humains qui développeront, superviseront et géreront toutes les opérations reposant sur l'IA.

L'IA aura, en totale sécurité, de multiples impacts positifs sur l'industrie de processus et ses différentes composantes. Du point de vue de la fabrication du produit, l'IA fournira des analyses prédictives qui contribueront à concevoir des expériences et à interpréter les résultats, à améliorer la qualité d'un produit ou à accélérer le développement d'un nouveau produit. Dans les opérations d'usine, l'IA supposera une amélioration dans l'efficacité du processus de production et une réduction de la consommation d'énergie, tout en favorisant le contrôle des routines de maintenance des machines pour éviter des casses et arrêts dans la production. De même, sur les chaînes de fourniture, elle permettra de créer de nouveaux services et des offres flexibles et personnalisées, de mieux comprendre le comportement du client ou de mieux pronostiquer la demande, ce qui permettra de réduire les conditions requises en matière de stockage. Enfin, elle influera également sur la contribution de l'être humain puisque, en étant capable de manipuler d'énormes quantités de données, l'IA accélérera l'apprentissage, automatisera les tâches excessivement répétitives ou réduira la participation de l'être humain dans les tâches physiques pouvant s'avérer dangereuses.

En dépit de l'activité de l'industrie dans le passé, ce n'est que depuis quelques années que les entreprises ont témoigné d'un intérêt pour les nouvelles techniques de la Tech-



nologie Informatique (IT). Cela reflète le retard des industries dans l'intégration d'outils d'IA face aux pionniers que sont l'industrie de la communication ou les réseaux sociaux. À cet inconvénient, il faut ajouter la difficulté que suppose, pour l'industrie, la réalisation de changements de manière immédiate du fait de la grande planification nécessaire et qu'il est escompté que les investissements réalisés durent des décennies. Par ailleurs, autre problème d'importance : le manque de données. C'est à ce niveau-là qu'entre en jeu la nécessité d'adapter les solutions existantes du Big Data à des techniques de Smart Data, et de cette manière, de remplacer les besoins spécifiques de l'industrie de processus.

Outre les inconvénients listés dans le paragraphe précédent, les PME sont confrontées à un autre défi : avoir accès ou disposer d'un personnel qualifié pour développer les compétences que requiert l'IA, comme la connaissance ou la maîtrise des techniques de ML ou encore les capacités d'analyse plus simples. De toute façon, cette discipline étant largement acceptée, de plus en plus d'outils qui offrent le ML voient le jour, le ML étant vu comme un service à travers des interfaces graphiques intuitives qui permettent d'évaluer et d'exécuter des algorithmes directement sur les données possédées.

Malgré l'incidence encore faible de l'IA dans les industries de processus, un simple regard en arrière sur les différentes technologies existantes dans le processus de fabrication céramique montre que nombreux sont les domaines représentés sur la figure 2 qui aujourd'hui offrent des exemples d'application dans le secteur céramique. Ainsi, par exemple, il existe des systèmes experts pour la gestion de la couleur qui facilitent, pour les responsables d'usine, la prise de décisions sur le maintien des tonalités sur le produit fini. Or, il n'en est pas moins vrai qu'il reste encore beaucoup de choses à mettre en place par rapport aux systèmes experts pour la gestion du processus céramique en général. En ce sens, il serait possible d'utiliser des techniques d'IA pour analyser en continu les données de processus générées par les équipements et les mettre en relation avec les données de qualité du produit final. Et ce, afin d'obtenir des liens de cause à effet qui permettront, dans les usines de fabrication et au quotidien, de doter de prédictivité la prise de décisions.

En matière de planification, organisation et optimisation, de nombreux systèmes informatiques pouvant être utilisés pour la planification de la production sont dotés d'algorithme spécifiques d'IA, lesquels algorithmes peuvent être utilisés pour fournir le séquencement optimal en fonction de différents paramètres d'optimisation. Malgré cela, il existe dans ce domaine également un domaine d'amélioration dans la mesure où la plupart de ces systèmes ne sont pas dûment connectés au processus de fabrication et il est difficile de faire en sorte qu'ils exécutent un entraînement automatisé.

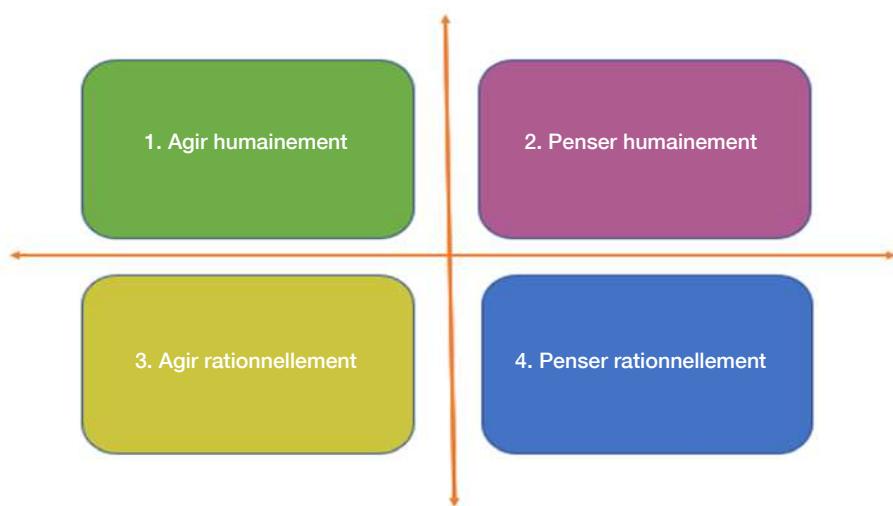
Dans la robotique, l'application la plus couramment rencontrée dans les usines de céramique, ce sont les systèmes de transport à chariots à guidage laser, qui transportent de façon automatisée les pièces semi-finies entre les différentes étapes de fabrication. De la même manière, il existe certaines applications d'emballage de produit fini basées sur la robotique, comme par exemple la manipulation de pièces grand format.

Quant au domaine de la vision artificielle, il existe depuis plusieurs années des systèmes d'inspection automatique capables de reconnaître les défauts d'un produit fini. Pour ce faire, les équipements sont dotés d'une série d'algorithmes d'IA pour la reconnaissance d'images et la détection des défauts les plus courants à la surface des pièces fabriquées, que ce soit à l'état cru ou cuit. Comme pour le reste des applications, cette application pourrait être largement améliorée en mettant en relation la défectologie détectée sur chaque pièce et les conditions réelles dans lesquelles la pièce a été traitée.

Parmi les techniques qui, pour le moment, sont peu appliquées dans le domaine de la céramique, il y a notamment les techniques de ML, dont on attend, dans les années qui viennent, qu'elles contribuent considérablement à la mise en place de la maintenance prédictive, non seulement dans le processus de fabrication céramique mais aussi dans d'autres secteurs. De plus, les techniques de ML peuvent susciter un intérêt tout particulier pour aborder la résolution de problèmes liés à l'absence de stabilité dimensionnelle et aux variations des tons du produit fini. En effet, une analyse détaillée des données de processus et de qualité de produit pourrait, par des techniques de ML, apporter des informations précieuses qui contribueraient à la stabilisation de ces deux variables critiques sur la qualité des produits céramiques.

### 5.2.2 Approches de l'Intelligence Artificielle

La définition d'IA peut, à son tour, peut revêtir quatre approches différentes qui s'appuient sur diverses branches de la philosophie et de la psychologie. La **figure 5.3** représente les différents ensembles dans lesquels sont divisés les systèmes de l'IA en fonction de l'approche.



**Figure 5.3.** Les différentes approches de l'Intelligence Artificielle.



- 1. Systèmes se comportant comme des humains :** Dans cette approche de l'IA, l'idée est de développer des machines capables de réaliser des fonctions pour lesquelles la contribution de l'intelligence humaine serait nécessaire. Par rapport à cette approche, on peut évoquer le Test de Turing. Ce test permet de mesurer si une machine montre ou non un comportement intelligent. Pour pouvoir passer ce test, la machine doit remplir les conditions suivantes :
  - Traitements de langage naturel qui lui permettra de communiquer.
  - Représentation de la connaissance pour stocker ce qu'elle connaît ou sent.
  - Raisonnement automatique pour répondre à des questions et extraire de nouvelles conclusions en utilisant les informations stockées.
  - Apprentissage automatique pour s'adapter à de nouvelles circonstances, détecter et explorer de nouveaux étalons.
  - Vision informatique pour percevoir des objets.
  - Robotique pour déplacer et manipuler des objets.
- 2. Systèmes pensant comme des humains :** Cette approche vise à doter les machines de capacités cognitives dans la prise de décisions, la résolution de problèmes, l'apprentissage, etc. Dans cette approche se trouve la science cognitive dans laquelle convergent des modèles informatiques d'IA avec des techniques expérimentales de la psychologie afin d'élaborer des théories précises et vérifiables sur le comportement de l'esprit humain.
- 3. Systèmes se comportant rationnellement :** Le but est de concevoir des agents intelligents. On suppose que ces agents intelligents opèrent de manière autonome, perçoivent l'environnement, perdurent pendant une période de temps prolongée, s'adaptent aux changements, créent et poursuivent des objectifs. Le but est d'obtenir le meilleur résultat, et en cas d'incertitude, le meilleur résultat escompté.
- 4. Systèmes pensant rationnellement :** L'objectif est de découvrir les lois qui régissent la pensée rationnelle, autrement dit, les calculs qui permettent de percevoir, raisonner et agir. Dans cette approche se trouve la logique qui essaye d'exprimer les lois qui dictent la façon dont doit opérer l'esprit.

### 5.3 Le Machine Learning (ML) ou Apprentissage Automatique

La première application pratique du ML à avoir atteint une renommée mondiale est la détection de courriels malicieux dans les années 90. À partir de cet instant et jusqu'à ce jour, ce sont des centaines d'applications de cette science qui ont vu le jour et qui, silencieusement, alimentent des centaines de produits et fonctions quotidiennement utilisés. Actuellement, avec la quantité de données disponibles, les applications dotées du ML sont très étendues.

Le ML est la science (et l'art) de programmer des ordinateurs pour qu'ils puissent extraire des informations ou connaissances à partir des données fournies. Une définition plus générale serait "*Le Machine Learning est le champ d'étude qui fournit aux ordinateurs la capacité d'apprendre sans être explicitement programmés*", Arthur Samuel, 1959.<sup>91</sup>

Comme observé sur la **figure 5.4**, le ML est un champ d'étude résultant de l'intersection entre la statistique, l'IA et la science des ordinateurs. Dans certains domaines, le ML est également connu comme l'analyse de prédiction (prédictive) ou l'apprentissage statistique.

L'application de méthodes de ML est devenue omniprésente dans la vie quotidienne au cours des dernières années, preuves en sont les constantes recommandations automatiques sur les films à voir, les repas à commander ou les produits à acheter, qui apparaissent sur de multiples supports digitaux. Actuellement, les sites web ou appareils utilisés personnellement ou professionnellement fonctionnent à partir d'algorithmes de ML. En ce sens, nous pouvons citer comme autre bel exemple de l'utilisation d'algorithmes de ML les sites web complexes comme ceux de Facebook, Amazon ou Netflix, qui contiennent et distribuent plusieurs modèles de ML pour pouvoir effectuer des recherches rapidement et efficacement ou faire des recommandations adaptées à chaque utilisateur.

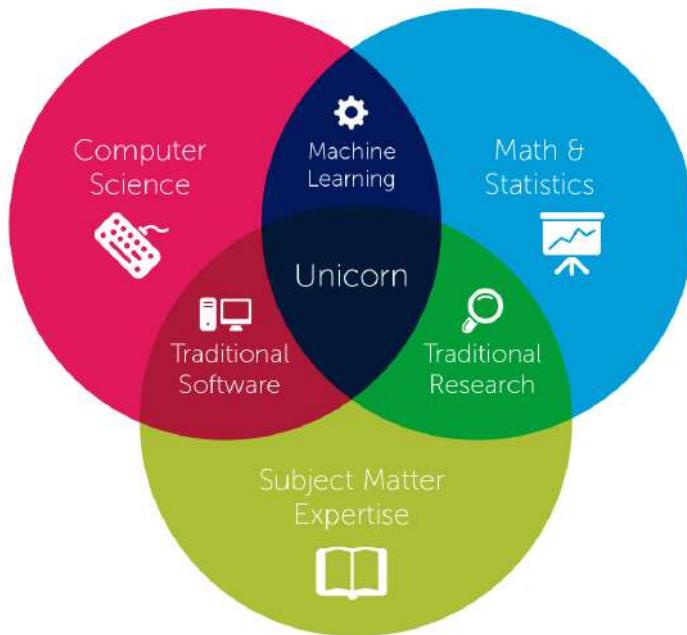


Figure 5.4. Diagramme représentant les champs qui constituent le Machine Learning.



Au-delà des applications commerciales, le ML a eu une grande influence sur la forme sous laquelle la recherche basée sur le traitement de données est actuellement effectuée. Ainsi, nombreux sont les outils de ML qui ont été appliqués dans la résolution de problèmes scientifiques comme la compréhension de phénomènes cosmiques et stellaires, la recherche de planètes distantes, l'analyse séquentielle d'ADN ou le développement de traitements personnalisés pour la guérison du cancer.

Dans les premières applications "intelligentes", de nombreux systèmes utilisaient des règles codifiées manuellement pour exécuter des décisions sur la façon de traiter les données ou d'ajuster les entrées que fournissait l'utilisateur. Ce type de règles présentait trop d'inconvénients puisque la logique requise pour prendre une décision est spécifique à chaque domaine et à chaque tâche. De plus, créer des règles requiert une connaissance étendue sur le mode de prise d'une certaine décision. Un exemple où ce type de règles codifiées "manuellement" serait en défaut, ce serait dans la détection de visages sur les images. Le principal problème dans cette façon de procéder serait que la manière avec laquelle un ordinateur interprète les pixels est bien différente de celle des humains pour détecter un visage. Cette différence de perception rend basiquement impossible, pour un être humain, la création d'un bon ensemble de règles qui spécifient à un ordinateur ce qui constitue un visage dans une image numérique.

Cependant, en utilisant le ML, le simple fait de présenter une grande collection d'images à un algorithme est suffisant pour que celui-ci détermine quelles sont les caractéristiques/spécifications nécessaires pour identifier un visage.

Le ML est de la plus grande utilité dans des domaines dans lesquels les problèmes soumis sont trop complexes pour être résolus à l'aide d'approches classiques ou en l'absence d'algorithme pouvant les résoudre. Par ailleurs, autre cas dans lequel ce type de techniques est généralement utilisé, c'est pour identifier des étalons qui, en principe, peuvent ne pas être apparents, au sein de grandes quantités de données. Cette recherche d'étalons reçoit le nom de Data Mining (exploration de données).

De façon abrégée, les tâches dans lesquelles le ML donne de bons résultats sont :

1. La résolution de problèmes pour lesquels il existe une solution, mais son obtention exige d'utiliser de nombreuses règles créées "manuellement".
2. La résolution de problèmes complexes dans lesquels soit il existe une solution connue, soit l'utilisation d'approches connues ne donne pas une bonne solution.
3. La résolution de problèmes avec des conditions fluctuantes, puisque les algorithmes de ML peuvent s'adapter aux nouvelles données disponibles.
4. La résolution de problèmes complexes qui requièrent la manipulation de grandes quantités de données.

Il existe plusieurs façons de catégoriser les systèmes de ML, selon qu'ils sont ou non entraînés avec une supervision humaine, selon qu'ils peuvent ou non apprendre progressivement sur le tas, selon qu'ils fonctionnent simplement en comparant de nouveaux points de données avec d'autres connus, ou à la place, s'ils détectent des étalons dans les données d'entraînement et construisent un modèle prédictif. Chacune de ces catégories est définie par la suite, avec un peu plus de détails, afin de pouvoir comprendre leurs différences.

### 5.3.1 Systèmes de Machine Learning en fonction du type de supervision

#### 5.3.1.1 Apprentissage supervisé

Les algorithmes de ML les plus efficaces sont ceux qui automatisent les processus de prise de décisions par la généralisation d'exemples connus. L'algorithme dans lequel l'utilisateur fournit les paires de données d'entrée et de sortie souhaitées est défini comme un algorithme d'apprentissage supervisé, de manière à ce que l'algorithme trouve la façon de produire la sortie souhaitée face à de nouvelles données d'entrée qu'il n'a pas traitées antérieurement, tout ce sans l'aide d'un être humain.

Dans l'apprentissage supervisé, on distingue deux types de méthodes : la méthode de régression et la méthode de classification.

##### 5.3.1.1.1 Régression

La régression est la méthode d'apprentissage supervisé dont l'objectif est de prédire des valeurs continues à partir de données étiquetées. La [figure 5.5](#) présente un ensemble de données où les variables indépendantes sont "Période" et "Demande" et la variable dépendante est "Pronostic". Dans ce cas, à partir des variables indépendantes, s'entraîne un

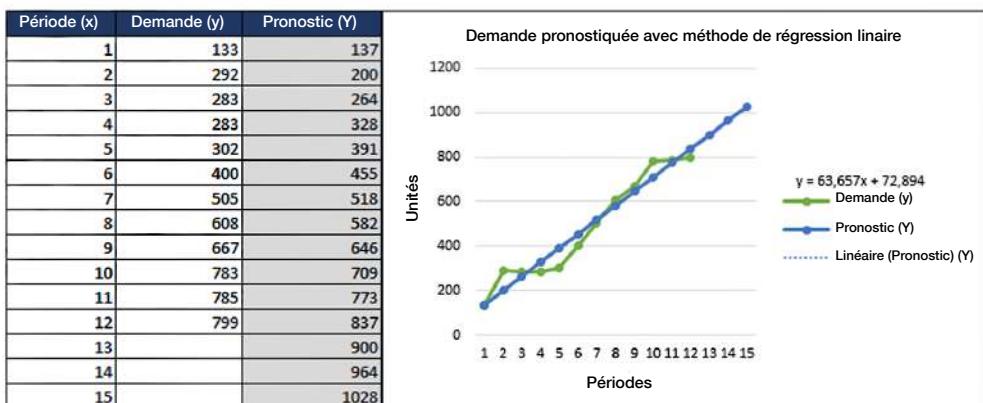


Figure 5.5. Exemple d'apprentissage supervisé en appliquant la méthode de régression linéaire.



modèle linéaire qui prédit la valeur continue espérée pour "Pronostic". À droite de la figure, nous pouvons observer la représentation graphique des données, ainsi que la ligne droite de régression à partir du modèle et qui, pour de nouvelles valeurs des variables indépendantes, donne la valeur espérée pour la variable indépendante.

### 5.3.1.1.2 Classification

La classification se définit comme la méthode d'apprentissage supervisée dont l'objectif est la classification des données historiques étiquetées dans différents groupes. À titre d'exemple, la [figure 5.6](#) représente un ensemble de points, chacun appartenant à une classe différente (rouge ou bleu). L'objectif est de prédire la classe à laquelle appartient le nouveau point (noir). Pour résoudre le problème, on utilise la méthode de classification des K plus proches voisins (en anglais, K-nearest neighbours, en version abrégée K-nn). Pour un  $k=5$ , ce qui signifie qu'au moment de classer le nouveau point, on prend les 5 points les plus proches de ce nouveau point et la classe la plus représentée est celle qu'adopte la valeur prédite pour le nouveau point. Dans le cas ici décrit, le nouveau point serait classé comme un point de classe bleue.

Une application de cette méthodologie dans l'industrie de processus pourrait être de classer les conditions que doit remplir un produit pour passer un contrôle de qualité déterminé. Ainsi, sur la [figure 5.6](#), si les points rouges sont considérés comme les produits qui auraient échoué au contrôle et les bleus comme ceux qui auraient passé avec succès le contrôle, en utilisant la méthode k-nn précédemment expliquée, le résultat obtenu serait que le nouveau produit à évaluer passerait avec succès ou non le contrôle en fonction de la plus grande classe de représentation des points entourant le nouveau point à étiqueter.

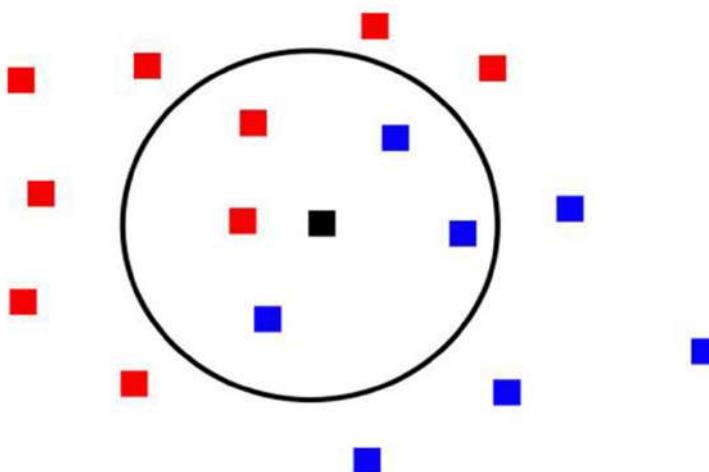


Figure 5.6. Exemple d'apprentissage supervisé en appliquant la méthode de classification KNN.

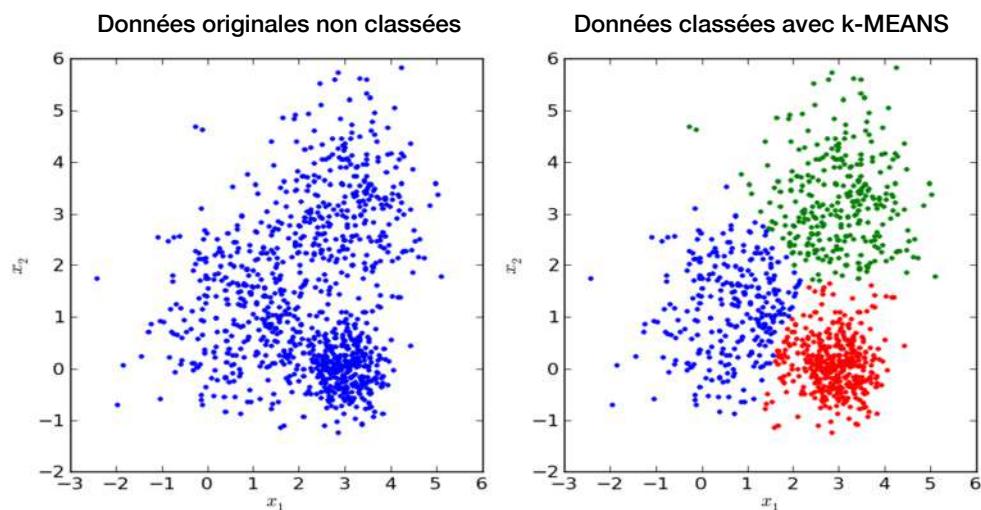
### 5.3.1.2 Apprentissage non supervisé

Par ailleurs, les algorithmes d'apprentissage non supervisé sont ceux où seules les données d'entrées sans les sorties souhaitées sont fournies à l'algorithme. Il existe de nombreuses applications de ce type d'apprentissage, lesquelles peuvent être catégorisées selon trois types différents.

#### 5.3.1.2.1 Clustering

La technique du Clustering consiste essentiellement à réaliser des partitions de l'ensemble de données objet du problème en groupes plus petits, dénommés "clusters". L'objectif est de trouver les partitions sur l'ensemble de données de manière à ce que chaque cluster englobe les points qui lui sont similaires. De façon similaire aux algorithmes de classification, le Clustering affecte une classe à chacun des points des données, en indiquant à quel cluster ils appartiennent.

Sur la [figure 5.7](#), la partie gauche représente un ensemble de données non étiquetées. La partie droite représente le même ensemble de données après application de l'algorithme de Clustering k-Means, pour un  $k=3$  classes. L'algorithme essaye de trouver le centre des clusters qui seront représentatifs pour certaines régions des données. Pour cela, il se base sur la répétition de deux étapes cycliques : assigner à chaque point des données le centre du cluster le plus proche et déplacer ensuite le centre de chaque cluster en fonction de la moyenne des données qui se trouvent dans ce cluster-là. L'algorithme met fin au processus dès qu'il ne se produit plus de changement dans le nombre de points formant chacun des clusters.



**Figure 5.7.** Exemple d'apprentissage non supervisé de Clustering avec la méthode k-Means.



L'utilisation de ce type d'algorithmes, comme le k-MEANS, est d'une grande utilité pour classer les types de clients d'une entreprise. Par exemple, une entreprise de téléphonie dispose des données personnelles de chacun de ses clients, connaît la zone géographique à laquelle appartiennent les clients, les tarifs ou produits souscrits, leur ancienneté en tant que clients de l'entreprise, s'ils ont renouvelé leurs services ou changé d'offre tarifaire, etc. Avec toutes ces données, il est possible de créer des clusters du type clients que possèdent l'entreprise et, ainsi, il est possible de prédire quel type de tarif ou service il faut proposer ou recommander au client, en fonction des caractéristiques que présentent les clients appartenant à ce cluster.

### 5.3.1.2.2 Visualisation et réduction de dimensionnalité

Les algorithmes de visualisation génèrent une représentation en deux ou trois dimensions à partir de données complexes et non étiquetées. Ce type d'algorithmes essaye d'expliquer, en préservant la plus grande partie possible de la structure des données originales, comment ces données sont organisées, en permettant d'identifier des étalons existants dans ces données.

Une tâche liée à la visualisation est la réduction de dimensionnalité. Quand les données d'entrée contiennent 4 dimensions ou plus, il est compliqué de réaliser une représentation décrivant toutes les informations disponibles. Ainsi, l'objectif des méthodes de réduction de la dimensionnalité est de simplifier les données sans perdre trop d'informations. Pour atteindre cet objectif, il est possible de combiner plusieurs des caractéristiques liées dans l'ensemble de données en une seule. Les principales raisons pour lesquelles il est généralement utilisé une des diverses méthodes de réduction de la dimensionnalité sont les suivantes : identifier et supprimer les variables sans importance dans l'ensemble de données, améliorer le rendement du calcul et réduire la complexité du modèle et de ses résultats.

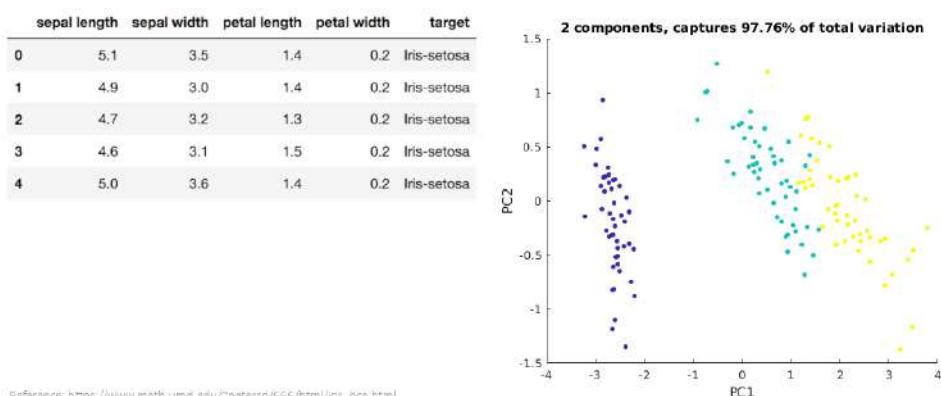


Figure 5.8 Exemple d'apprentissage non supervisé par réduction de dimensionnalité en appliquant la méthode PCA

À titre d'exemple, la partie gauche de la [figure 5.8](#) montre un ensemble de données avec quatre variables continues : la longueur et la largeur du sépale et la longueur et la largeur du pétale de divers types de fleurs. En appliquant la réduction de dimensionnalité sur les variables de l'ensemble de données, la partie droite affiche le résultat de l'application de la fameuse méthode PCA. La méthode PCA identifie la combinaison d'attributs (ou composantes principales) de l'ensemble de données qui explique la plus grande variance des données. Ainsi, sur l'image de droite, figurent les deux composantes principales obtenues à partir de la méthode PCA (sur l'image PC1 et PC2), lesquelles capturent presque 98% de la variation des données d'origine. C'est ainsi que l'on passe d'un ensemble de données à quatre variables distinctes à un ensemble de données à deux variables qui sont une combinaison des quatre variables d'origine.

#### **5.3.1.2.3 Apprentissage par règles d'association**

Ce type de méthode d'apprentissage non supervisé a comme objectif d'aller au fond de structures avec de grandes quantités de données de manière à découvrir des relations entre les différents attributs existants dans l'ensemble de données. Les règles d'association ont diverses applications comme, par exemple, le support dans la prise de décisions, le diagnostic et la prédition d'alarmes dans les télécommunications, l'analyse des informations de ventes, la distribution de marchandises en boutiques ou la segmentation de clients sur la base de modèles d'achat.

Un exemple typique des règles d'association est l'analyse du panier d'achat. Dans le panier se trouvent des associations entre les produits qu'achètent les clients et qui peuvent avoir une influence sur les stratégies marketing de l'entreprise.

#### **5.3.1.3 Apprentissage semi-supervisé.**

Autre type d'apprentissage à prendre en compte n'est autre que l'apprentissage semi-supervisé. Dans ce type de ML se trouvent les algorithmes qui peuvent utiliser des données d'entraînement partiellement étiquetées. En général, la plupart des données qui traitent ce type de modèles ne sont pas étiquetées.

L'application de ce type d'apprentissage est de plus en plus courante aujourd'hui. Un bel exemple d'application de ce type de modèles est l'analyse des conversations enregistrées dans un *call center*. L'objectif est d'en déduire automatiquement les caractéristiques des interlocuteurs, leurs états d'âme, les motifs de l'appel, etc. Pour ce faire, il est nécessaire de disposer d'un volume important de cas étiquetés sur lesquels s'apprennent les modèles de chaque typologie d'appel, ce qui constitue une tâche assez coûteuse en termes de temps. Pour les cas dans lesquels l'étiquetage est rare, on applique la méthode d'apprentissage semi-supervisé *Self-Learning*. Dans la première phase de la méthode, on entraîne un classifieur avec le peu de données étiquetées. Le classifieur est ensuite utilisé pour prédire les données non étiquetées et les prédictions les plus fiables sont ajoutées à l'ensemble d'entraînement. Le classifieur est ensuite réentraîné avec le nouvel ensemble



d'entraînement et, enfin, cette procédure est répétée jusqu'à ce qu'il ne soit plus possible d'ajouter de nouvelles données à l'ensemble.

Enfin, bien que cela ne vaille pas la peine de le considérer comme une catégorie spécifique du ML supervisé, on peut parler du fameux apprentissage renforcé. Dans ce type d'apprentissage, le système peut observer l'environnement, sélectionner et réaliser des actions. En fonction des actions prises, le système obtient des récompenses en échange ou des sanctions, raison pour laquelle il doit apprendre par lui-même quelle est la meilleure stratégie pour obtenir la meilleure récompense possible avec le temps.

### 5.3.2 Systèmes de Machine Learning selon leur capacité d'apprentissage incrémental

Autre critère de classification des systèmes de ML : discerner si le système peut ou non apprendre incrémentalement à partir d'un flux de données entrantes. Pour les cas dans lesquels le système peut apprendre des nouvelles données entrantes, il est dit que l'apprentissage est en ligne et, dans les cas contraires, il est dit que l'apprentissage est par lots.

#### 5.3.2.1 Apprentissage par lots

Ces algorithmes de ML doivent être entraînés en utilisant toutes les données disponibles et sont incapables d'apprendre de façon incrémentale. Cela prend beaucoup plus de temps et de ressources informatiques. Le système est tout d'abord entraîné, puis est lancé en production et s'exécute sans que le système ne réapprenne quoique ce soit. Ce type de système reçoit également le nom de ML avec apprentissage hors ligne.

Pour qu'un système d'apprentissage par lots améliore ses caractéristiques par l'incorporation de nouvelles données d'apprentissage, une nouvelle version du système doit s'entraîner à partir de zéro sur l'ensemble de données complet (données anciennes et nouvelles), arrêter le système antérieur qui a été lancé et le remplacer par le nouveau. L'entraînement avec l'ensemble complet de données peut durer des heures, raison pour laquelle, si le système a besoin de s'adapter aux données qui changent rapidement, il convient de chercher un autre type de systèmes.

#### 5.3.2.2 Apprentissage en ligne

Dans les algorithmes de ML avec apprentissage en ligne, le système s'entraîne de façon incrémentale en étant alimenté avec des données individuelles ou en petits groupes de façon séquentielle. Chaque étape d'apprentissage est rapide et d'un faible coût computationnel, raison pour laquelle le système apprend sur les données au fur et à mesure qu'elles sont disponibles. Ce type d'apprentissage est idéal pour les systèmes recevant des données en continu et devant s'adapter aux changements de façon autonome et rapidement. Une fois que le système a appris sur les nouvelles données, il peut les écarter à moins qu'il ait besoin de revenir à un état antérieur.

Le taux d'apprentissage est un paramètre important dans ce type de systèmes. Ce taux indique au système d'apprentissage en ligne la façon dont il doit rapidement s'adapter aux données changeantes. Si le taux d'apprentissage est élevé, le système s'adapte rapidement aux nouvelles données, mais, en revanche, il oublie rapidement les données anciennes. De façon analogue, pour un taux d'apprentissage bas, l'inertie du système sera plus grande, autrement dit, le système apprendra plus lentement mais il sera en revanche moins sensible au bruit des nouvelles données.

### **5.3.3 Systèmes de Machine Learning selon leur capacité à définir des modèles prédictifs**

Le mode de généralisation est une autre façon de catégoriser les systèmes de ML. La majorité des tâches des ML consiste en des prédictions. Cela signifie que, à partir d'un nombre d'exemples d'entraînement, le système a besoin d'être capable de généraliser des exemples qu'il n'a pas vus précédemment. L'objectif est non seulement de fonctionner correctement sur les exemples d'entraînement mais également sur les nouveaux problèmes qui lui seront posés. Il y a deux approches principales pour la généralisation : l'apprentissage basé sur des exemples ou l'apprentissage basé sur des modèles.

#### **5.3.3.1 Apprentissage basé sur des exemples**

Le mode d'apprentissage le plus banal est l'apprentissage par la mémoire. Il s'agit de l'apprentissage dans lequel les systèmes mémorisent les exemples avant de les généraliser sur les nouveaux cas en utilisant une mesure de similitude. Cet apprentissage est dénommé apprentissage basé sur des exemples.

#### **5.3.3.2 Apprentissage basé sur des modèles**

Une autre façon de généraliser à partir d'un ensemble de données, c'est de créer un modèle à partir de ces données et d'utiliser ensuite ce modèle pour faire les prédictions. Ce type d'apprentissage est dénommé apprentissage basé sur des modèles.

En résumé, ce type d'apprentissage comprend les étapes suivantes :

- Étudier les données.
- Sélectionner un modèle.
- Entraîner le modèle sur les données d'entraînement, autrement dit, faire en sorte que l'algorithme d'apprentissage recherche les paramètres du modèle qui minimisent la fonction de coût.
- Appliquer le modèle pour qu'il fasse des prédictions sur les nouveaux cas, en attendant que le modèle généralise correctement.



### 5.3.4 Réseaux de Neurones Artificiels (ANN)

Jusqu'à présent, le ML a été défini comme un sous-ensemble de l'IA où les ordinateurs apprennent à faire quelque chose sans être programmés pour le faire. Cependant, les algorithmes de ML peuvent être programmés de différentes manières.

Un type de problème habituel pourrait être, par exemple, l'identification d'animaux sur une image. L'entraînement du modèle consisterait, par exemple, à montrer différentes images d'animaux, chacune avec une étiquette avec le nom du type d'animal apparaissant sur l'image. La routine apprendrait finalement les combinaisons des caractéristiques qui tendent à apparaître ensemble et à associer ces caractéristiques à l'animal figurant sur l'étiquette. Une fois le modèle construit, le programme de ML testerait le modèle en essayant d'identifier chacun des étiquettes des animaux dans un ensemble d'images qu'il n'a pas vues auparavant. Le modèle serait ensuite testé en évaluant son rendement et en réalisant des ajustements progressifs du modèle jusqu'à obtention d'un niveau de précision suffisamment élevé pour identifier les différents animaux. Cette tâche d'identification d'animaux peut s'effectuer à l'aide de différents algorithmes de ML mais un des algorithmes les plus utilisés pour ce type de tâches est celui des Réseaux de Neurones Artificiels (ANN, Artificial Neural Networks).

Le système nerveux et le cerveau humain sont tous deux constitués de millions de neurones. Ces neurones sont interconnectés entre eux et pour effectuer certaines tâches spécifiques comme le sont les calculs mathématiques, la mémoire ou le positionnement, ces neurones s'activent et forment différents groupes pour chaque tâche. Le cerveau a comme autre qualité l'acquisition de connaissances à partir de l'expérience, autrement dit apprendre à partir de l'interaction avec l'environnement. Les ANN naissent de cet intérêt à apprendre et sont des modèles qui ressemblent, bien que de façon plus simple, aux réseaux de neurones biologiques. Les ANN essayent d'extraire les capacités du cerveau pour apporter une solution aux problèmes complexes comme celui de la vision, de la reconnaissance de formes, du contrôle sensori-moteur, etc.

Un ANN est un ensemble d'algorithmes du champ de l'IA dont la finalité est de modéliser des abstractions de haut niveau dans des données en utilisant des architectures dans lesquelles sont exécutées des transformations non linéaires multiples. Les ANN se composent d'un ensemble d'éléments de processus dénommés neurones. Les neurones sont distribués en couches, chaque neurone de la couche antérieure étant connecté à des neurones de la couche suivante. De cette façon, il existe trois types de couches : une couche d'entrée, des couches intermédiaires recevant le nom de couches cachées et une couche de sortie. L'information circule dans le réseau de neurones de la manière suivante : chaque élément de processus reçoit un signal d'entrée des unités antérieures et communique sa sortie aux unités postérieures après application d'une transformation non linéaire au signal entrant. L'inférence des propriétés que l'on souhaite obtenir a lieu dans les neurones, et la concaténation de ces modèles inférentiels donne comme résultat un modèle unique qui reprend l'abstraction recherchée.

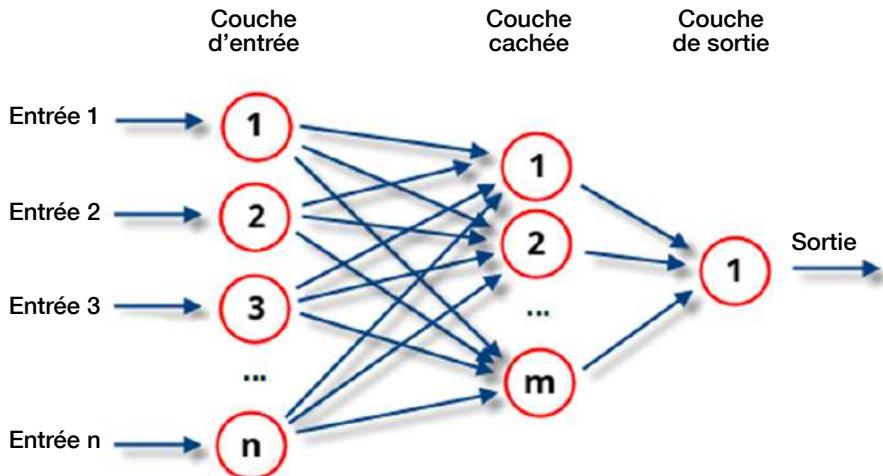


Figure 5.9. Exemple de Réseau de Neurones Artificiels

La **figure 5.9** est un exemple de réseau de neurones artificiels avec les différents éléments qui le composent.

Les ANN offrent les avantages suivants :

- Ils permettent de modéliser des processus non linaires.
- Le processus d'apprentissage consiste basiquement à présenter au réseau un exemple et à modifier ses poids synaptiques (paramètres d'ajustement) conformément à sa réponse.
- Le réseau a la capacité d'adapter ses paramètres en temps réel.
- Du fait de l'interconnexion massive, le défaut d'un processeur n'altère pas sérieusement l'opération.
- Uniformité dans l'analyse et la conception.

La réalisation de différentes tâches liées à l'IA est un des avantages des réseaux de neurones artificiels. Ces tâches peuvent être classées en deux grands blocs (comme observé précédemment) : les tâches de classification supervisées et les tâches de classification non supervisées. Comme cela a été décrit tout au long de ce chapitre, dans les tâches de classification supervisées, le réseau de neurones part des données d'entrée, crée sa propre prédiction et réalise des ajustements en fonction de la réponse espérée jusqu'à ce que, finalement, le résultat prévu se rapproche du résultat escompté. Au contraire, dans les tâches de classification non supervisées, il n'est pas indiqué au réseau de neurones quelle est la réponse correcte et il réalise ses propres associations basées sur une fonction de coût.



Un exemple de l'usage qui pourrait être donné aux ANN dans le processus de fabrication céramique serait de pouvoir anticiper le comportement des supports céramiques pendant la cuisson sur la base de la mesure de propriétés comme les distributions de densité et d'épaisseur au sein de ces supports. Ainsi, en combinant les résultats d'un appareil de mesure non destructif de la densité apparente avec les données communiquées par un système de mesure des dimensions en sortie de four et un ANN dûment conçu et entraîné, il serait possible de parvenir à établir, dans une période de temps relativement prudente, un modèle prédictif qui indiquerait si les supports récemment façonnés vont avoir tendance à présenter des problèmes de stabilité dimensionnelle dans certaines conditions de cuisson. Des exemples similaires pourraient être cités pour d'autres paramètres clés du processus de fabrication céramique, comme la tendance à l'apparition de tonalités sur le produit final ou de changements dans sa courbure.

#### 5.4 Deep Learning (DL) ou Apprentissage Profond

L'approche classique de l'analytique de données basée sur le ML consiste à utiliser les données disponibles pour entraîner ou mettre en place des systèmes dotés d'une capacité prédictive, parvenir ensuite à établir un modèle analytique et finalement calculer les paramètres (ou les valeurs inconnues) de ce modèle. Ces techniques peuvent produire des systèmes prédictifs qui ne généralisent pas bien parce que l'intégrité et la correction dépendent de la qualité du modèle et de ses caractéristiques (SAS, 2019). La promesse du Deep Learning (DL) ou apprentissage profond est de générer des systèmes prédictifs qui généralisent bien, s'adaptent bien, progressent continuellement conformément aux nouvelles données qui leur sont transmises et qui sont plus dynamiques que les systèmes prédictifs reposant sur des règles strictes. De la sorte, en travaillant avec DL, ce n'est pas le modèle qui est ajusté mais c'est une tâche précise qui est entraînée.

L'approche visée par le DL consiste à remplacer la formulation et la spécification de la modélisation au moyen du ML classique par des ANN qui sont composés de plusieurs niveaux hiérarchiquement disposés. Ces réseaux de neurones doivent apprendre à reconnaître les caractéristiques latentes des données. Cet apprentissage du réseau de DL s'effectue de la manière suivante : le réseau apprend quelque chose de simple au niveau initial de la hiérarchie et envoie ensuite cette information au niveau suivant. Le niveau suivant prend l'information simple, la combine en quelque chose d'un peu plus complexe et la transmet au niveau successif. De cette façon, ce processus se réitère dans les différents niveaux de la hiérarchie jusqu'à atteindre la couche de sortie. En résumé, un ANN de DL présenterait le même schéma que celui représenté sur la [figure 5.9](#), mais au lieu d'avoir une seule couche cachée, il présenterait de multiples couches cachées hiérarchisées.

Les modèles computationnels de DL imitent les caractéristiques d'architecture du système nerveux et permettent qu'il y ait, dans le système global, des réseaux d'unités de processus spécialisés dans la détection de certaines caractéristiques cachées dans les données. Cette approche a permis d'améliorer les résultats obtenus à partir des premiers ANN, comme par exemple dans la tâche de perception computationnelle.

En reprenant l'exemple de la classification d'images d'animaux, le niveau initial d'un réseau neuronal de DL pourrait utiliser les différences entre les zones les plus claires des images et celles les plus foncées pour apprendre où se trouvent les bords ou les lignes de l'image. Le niveau initial passerait cette information sur les arêtes ou bords au deuxième niveau, qui combinerait les arêtes en formes simples, comme une ligne diagonale ou un angle droit. Le troisième niveau combinerait les formes simples en objets plus complexes comme pourraient l'être des ovales ou rectangles. De la sorte, le niveau suivant pourrait combiner les ovales et les rectangles en moustaches, pattes ou queues rudimentaires. Ce processus continuerait jusqu'à ce que soit atteint le niveau supérieur dans la hiérarchie où le réseau aurait appris à identifier chacun des animaux.

Dans la section précédente de ML, il a été décrit une méthode d'entraînement pour la reconnaissance du type d'animal qui apparaît dans un ensemble d'images, où chaque image est correctement étiquetée avec l'animal figurant sur cette image. Chaque étape itérative dans le test et l'affinage du modèle implique de comparer l'étiquette de l'image avec l'étiquette que le programme lui a attribuée, pour déterminer si le programme a été capable ou non d'identifier correctement le type d'animal. Par conséquent, nous sommes en présence d'une méthode d'apprentissage supervisé. L'apprentissage supervisé est relativement rapide et exige relativement moins de puissance de calcul que certaines autres techniques d'entraînement qui sont utilisées dans le ML.

Dans le monde réel, on collecte une immense quantité de données comme peuvent l'être les informations sur les personnes par le biais de réseaux sociaux, hardware, software, autorisations d'applications ou cookies de sites web. Toutes ces données peuvent être très précieuses. Le problème survient quand la majorité de ces données n'est pas étiquetée et, par conséquent, quand ces données ne peuvent être utilisées pour entraîner des programmes de ML qui dépendent de l'apprentissage supervisé. Pour aborder ce problème, une solution possible serait d'étiqueter toutes ces données non étiquetées, mais il s'agit d'un processus long et très coûteux.

Dans ce domaine, les réseaux de DL se distinguent dans l'apprentissage non supervisé et représentent une bonne alternative aux algorithmes d'apprentissage supervisé face à la problématique des données non étiquetées ou non structurées. En reprenant le problème de la classification d'animaux par des images, même si ces images ne sont pas étiquetées, les réseaux de DL sont capables d'apprendre à identifier les animaux figurant sur chacune des images.

En contrepartie, les algorithmes de DL nécessitent une grande puissance de calcul pour résoudre les problèmes. Ce coût vient de leur nature itérative, raison pour laquelle leur complexité augmente conformément à l'augmentation du nombre de couches et du volume de données nécessaire pour entraîner ce type de réseaux. Même ainsi, leur capacité d'amélioration et d'adaptation continue au changement dans le modèle d'information implicite, leur efficacité ou la capacité à simplifier les opérations analytiques existantes font du DL un outil présentant de grandes opportunités avec de nombreuses



applications dans l'industrie. Quelques-unes des applications commerciales les plus populaires du DL sont actuellement la reconnaissance vocale, la reconnaissance d'images, la programmation neurolinguistique ou les systèmes de recommandation, ces applications étant rencontrées dans des secteurs aussi divers que la conduite autonome ou les appareils médicaux :

**Conduite autonome** : Les chercheurs dans le domaine de l'automobile utilisent l'apprentissage profond pour détecter automatiquement des objets comme les panneaux de stop et feux tricolores. De plus, l'apprentissage profond s'utilise pour détecter les piétons, ce qui contribue à réduire les accidents.

**Secteur de l'aérospatial et de la défense** : L'apprentissage profond s'utilise pour identifier des objets à partir de satellites qui localisent des zones d'intérêt et identifient les zones sûres ou non pour les troupes.

**Recherche médicale** : Dans la lutte contre le cancer, les chercheurs utilisent l'apprentissage profond pour détecter automatiquement des cellules cancérogènes. Des équipes d'UCLA ont construit un microscope avancé produisant un ensemble de données multidimensionnelles pour entraîner une application de DL afin d'identifier avec précision les cellules cancérogènes.

**Automatisation industrielle** : L'apprentissage profond contribue à améliorer la sécurité des travailleurs dans des environnements de machines lourdes, grâce à la détection automatique de personnes ou objets quand ils se trouvent à une distance non sécurisée des machines.

**Électronique (CES)** : L'apprentissage électronique s'utilise dans l'audition automatisée et la traduction du langage. Par exemple, les appareils d'assistance domestique qui répondent à la voix et connaissent les préférences se basent sur des applications d'apprentissage profond.



# Chapitre 6: Standardisation de l'industrie 4.0

e chapitre 6 du Guide est une introduction à ce qu'est et à ce que signifie la standardisation, normalisation ou réglementation applicable à l'Industrie 4.0 du point de vue des facilitateurs ou outils digitaux. Nous identifierons les groupes de travail développant, aussi bien au niveau international que national, les différents standards applicables aux facilitateurs digitaux qui favorisent le développement de l'Industrie 4.0. Nous nous attacherons ensuite à étudier plus en profondeur les standards espagnols fixant les conditions requises pour qu'une entreprise soit considérée comme une Industrie 4.0, ainsi que la façon d'évaluer ces conditions requises.

Enfin, nous passerons en revue les différents modèles de gestion ou de bonnes pratiques pouvant être utilisés pour faciliter la transformation digitale de l'industrie céramique.

## **6.1 La standardisation comme moteur de l'Industrie 4.0**

La normalisation ou standardisation a comme objet l'élaboration d'une série de spécifications techniques (normes) qui sont utilisées volontairement. La législation espagnole (article 8 de la Loi 21/1992 sur l'Industrie) dispose qu'une norme est "la spécification technique d'application répétitive ou continue dont l'observation n'est pas obligatoire, établie avec la participation de toutes les parties intéressées, qu'approuve un Organisme reconnu, au niveau national ou international, par son activité normative".

Les normes sont élaborées par les organismes de normalisation (dans le cas de l'Espagne, UNE, Association espagnole de normalisation), à travers des Comités Techniques de Normalisation, où est présente une représentation équilibrée de toutes les entités ayant un intérêt dans la normalisation d'un sujet précis, ce qui garantit la transparence, l'ouverture et le consensus dans leur travail.

Les comités sont constitués de groupes d'intérêt, à savoir des représentants des entreprises, organisations de consommateurs, corporations professionnelles, organismes de certification, d'essais et d'inspection, organisations environnementales et sociales, autorités et organismes chargés de faire respecter la législation, associations sectorielles, syndicats, institutions éducatives et centres de recherche, entre autres.

Le processus d'élaboration d'une norme est soumis à une série de phases qui permettent de garantir que le document final est le fruit du consensus, et que toute personne, même si elle n'appartient pas à l'organe de travail élaborant la norme, pourra faire part de ses avis ou commentaires.

Les normes créent une base sûre pour le contrat technique, garantissent l'interopérabilité dans les applications et protègent les consommateurs par un règlement qui fournit une base au développement de produits, permettant en outre la communication entre tous les impliqués au moyen de termes et définitions standardisés.

C'est pour cette raison que la standardisation est d'une importance cruciale pour la réussite de l'Industrie 4.0. Une normalisation internationale solide, convue et officiellement reconnue est nécessaire, raison pour laquelle l'IEC (Commission Électronique Internationale, organisation de normalisation dans les domaines électrique, électronique et des technologies connexes) a pris l'initiative en apportant de la coordination à travers son Groupe Stratégique IEC 8, I 4.0, Fabrication Intelligente.

Chacun sait que posséder un modèle contribue à se concentrer sur les points importants. Un modèle de référence est un schéma décrivant de façon cohérente un point qui joue un rôle de premier plan dans une situation importante. Un modèle de référence qui répond à ces critères est un modèle de référence standardisable. Une fois que ce modèle a été défini, le second objectif est d'avoir un unique modèle de référence pour une situation particulière et d'utiliser globalement ce modèle comme l'unique standard. Cependant, cela n'est pas toujours faisable. Les modèles de référence ne sont jamais les seuls véritables modèles <sup>92</sup>.

Force est rappeler quelques avantages offerts par la standardisation de l'Industrie 4.0 pour les entreprises. La standardisation leur offre une base solide sur laquelle elles peuvent concevoir de nouvelles technologies et améliorer leurs processus. En somme, les standards facilitent l'accès au marché, apportent des économies d'échelle et favorisent l'innovation. De plus, ils servent à développer la connaissance des initiatives et des avancées techniques. Pour les PME, il est important que les solutions qu'elles utilisent s'appuient sur des standards, pour leur apporter une indépendance de fournisseurs, éviter des blocages technologiques et permettre une interopérabilité maximale avec le monde extérieur.

La fabrication du futur est orientée vers la disponibilité de toutes les informations nécessaires en temps réel, par la connexion de tous les éléments participant à la chaîne de valeur. Elle a besoin d'un niveau sans précédent d'intégration de l'information de tous les domaines entrepreneuriaux.

Pour atteindre les objectifs visés, ce flux d'information doit être continu et uniforme, et cela doit se faire nécessairement à travers des interfaces normalisées <sup>93</sup>.

## **6.2 Normalisation et "facilitateurs digitaux" dans l'Industrie 4.0**

L'Industrie 4.0 suppose d'appliquer un ensemble de technologies dans toute la chaîne de valeur de l'industrie. Ces changements offrent des avantages, que ce soit au niveau du processus ou au niveau du produit et modèle d'affaires.

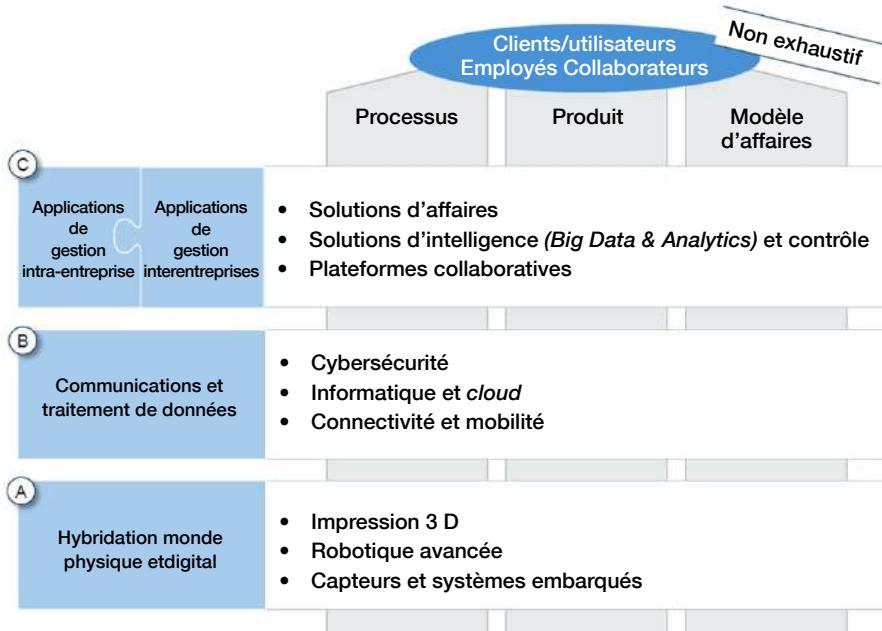
Comme expliqué tout au long du Guide, les "facilitateurs digitaux" sont l'ensemble de technologies qui rendent possible cette nouvelle industrie qui exploite le potentiel de l'internet des objets. En effet, ceux-ci permettent l'hybridation entre le monde physique et le monde digital, autrement dit, relier le monde physique au monde virtuel pour faire de l'industrie une industrie intelligente <sup>94</sup>.

Pour interconnecter tous les systèmes dans les processus de recherche, conception, développement, production et logistique, et offrir les services associés, il faut des interfaces standardisées.

C'est à cette tâche que se consacrent depuis plusieurs années les organisations internationales de normalisation, l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO) et la Commission Électronique Internationale (IEC). Leurs standards sont déjà utilisés dans les modèles de fabrication de l'Industrie 3.0, et dorénavant, il faut les faire évoluer sur les points nécessaires<sup>95</sup>.

Pour chaque besoin technologique de l'Industrie 4.0, il existe un comité de normalisation qui apporte des solutions. Les comités internationaux de normalisation ont leurs comités espagnols équivalents en norme UNE. La participation aux comités de normalisation UNE est ouverte à l'industrie espagnole. Avec les comités de normalisation UNE, l'industrie espagnole peut défendre ses intérêts dans les forums internationaux où sont prises les décisions<sup>96</sup>.

En Espagne, il a été créé le Comité Technique de Normalisation CTN 71 sur les Technologies Habilitantes Digitales (THD), de norme UNE. Ce comité tend à favoriser le développement des nouvelles technologies digitales au sein des secteurs économiques du pays, par l'élaboration et l'utilisation de standards régissant ces nouveaux marchés.



**Figure 6.1.** Cadre conceptuel des facilitateurs digitaux (source : "La transformación digital de la industria española" -Minetur 2015).

### 6.2.1 Cybersécurité

L'utilisation massive des technologies de l'information dans les processus entrepreneuriaux, processus de production et produits offre des avantages considérables mais nécessite de garantir la protection et la confidentialité de l'information.

L'information sera l'actif le plus précieux de l'entreprise, et des technologies comme le Cloud Computing ou les modèles de recherche et développement collaboratif feront qu'il sera impossible de définir avec précision un périmètre de protection.

Le comité de normalisation international ISO/IEC JTC 1/SC 27 Techniques de sécurité pour les technologies de l'information élabore des standards pour la protection de l'information dans les TIC. En Espagne, le comité CTN 320 Cybersécurité et protection des données personnelles est en charge de la standardisation dans ce domaine.

L'ensemble ISO/IEC 27000 correspond aux standards internationaux sur la Sécurité de l'Information. La norme UNE-EN ISO/IEC 27000 contient le vocabulaire sur lequel repose le reste des normes.

Comme normes les plus significatives, il convient de citer la norme UNE-EN ISO/IEC 27001 "Système de gestion de la sécurité de l'Information", qui comprend l'ensemble des conditions requises pour implanter un SGSI, et la norme UNE-EN ISO/IEC 27002, un recueil de bonnes pratiques pour la Sécurité de l'information décrivant les contrôles et objectifs de contrôle. La norme UNE-EN ISO/IEC 27001 est certifiable.

Autres normes en rapport avec ce domaine : ISO/IEC 27032. Directives pour la cybersécurité ; ISO/IEC 27033. Sécurité des réseaux ; ISO/IEC 27034. Sécurité des applications ; ISO/IEC 27035. Gestion d'incidents de sécurité de TI ; ISO/IEC 27036. Gestion de la sécurité de l'information dans les relations avec les tiers ; UNE-EN ISO/IEC 27037. Gestion des preuves numériques ; et ISO/IEC 27050. Gestion des processus de découverte (e-Discovery).

Il convient de citer également la norme ISO/IEC 15408 "Information technology — Security techniques — Evaluation criteria for IT security", qui est un guide très utile définissant un critère standard à utiliser comme base pour l'évaluation des propriétés et caractéristiques de sécurité d'un produit déterminé ou Système IT. Elle fournit des critères et arguments compréhensibles pour les différents profils d'acteurs liés aux technologies de la sécurité (développeurs, évaluateurs de sécurité et utilisateurs).

Par ailleurs, le groupe de travail IEC/SC 65C/WG 13 Réseaux industriels. Cybersécurité, élabore des standards spécifiques d'application à la cybersécurité des systèmes de contrôle et automatisation industrielle (IACS, Industrial Automation and Control Systems).

Les standards de la Série IEC 62443 (Industrial Communication Networks - Network and System Security), évolution des standards élaborés par le comité ISA 99 de l'Internatio-

nal Society of Automation, ont également été définis. Ils déterminent les alignements du contrôle de sécurité pour les fournisseurs fabriquant des composants pour des systèmes de contrôle de processus, les intégrateurs qui construisent de tels systèmes en intégrant les composants, les opérateurs faisant fonctionner les systèmes, et toutes les organisations concernées par les systèmes de contrôle de processus.

### 6.2.2 Connectivité

La connectivité est un autre domaine essentiel pour la réussite de l'implantation de l'Industrie 4.0. Ce nouveau paradigme industriel repose sur un flux d'informations pour lequel tous les composants impliqués doivent être connectés.

Les standards sont développés dans les comités IEC TC 65 Mesure, contrôle et automatisation de processus industriels. Il s'agit de normes applicables aux systèmes et éléments utilisés pour la mesure et le contrôle de processus industriels de fabrication par lots ou en continu.

De même, le comité international ISO/TC 184 Systèmes d'automatisation et d'intégration, développe les standards de systèmes d'information, d'automatisation et de systèmes de contrôles, et des technologies d'intégration. En Espagne, le comité chargé de développer la standardisation dans ce domaine est le CTN 116/SC5 Systèmes industriels automatisés. Conditions qui permettront l'intégration de systèmes. Ce comité a développé la norme UNE-EN ISO 11354-1 Technologies avancées d'automatisation et leurs applications. Conditions pour établir l'interopérabilité entre processus de fabrication dans les entreprises. Partie 1 : Cadre de l'interopérabilité dans les entreprises.

### 6.2.3 Robotique avancée

La flexibilité inhérente aux processus de fabrication de l'Industrie 4.0 requerra des robots avec de nouvelles capacités qui interagiront avec l'environnement (processus et y compris avec le produit même).

Le comité international ISO TC 299 Robots et dispositifs robotiques élabore les standards utilisés sur les robots de manipulation contrôlés automatiquement et reprogrammables, qu'ils soient fixes ou mobiles. Au niveau national, nous avons le comité CTN 116/SC2 Systèmes industriels automatisés. Robots pour la fabrication. Les normes développées par ces comités sont :

- UNE-EN ISO 10218-1 Robots et dispositifs robotiques. Conditions de sécurité pour robots industriels. Partie 1 : Robots.
- UNE-EN ISO 10218-2 Robots et dispositifs robotiques. Conditions de sécurité pour robots industriels. Partie 2 : Systèmes robot et intégration.
- ISO TS 15066:2016 Robots and robotic devices -- Collaborative robots. Spécification technique.

#### 6.2.4 Nouvelles technologies de fabrication

Les nouvelles technologies de fabrication permettront de passer d'un modèle de production de grands lots de produits identiques à de petits lots de produits personnalisés, voire à la fabrication de produits individuels à un prix compétitif.

La fabrication additive ou impression 3D, qui est déjà largement utilisée dans la fabrication de prototypes, se rapproche de la production du produit final.

Le comité international ISO TC 261 Fabrication additive ainsi que le comité national CTN 116/GT 1 se chargent de développer la standardisation des processus, procédures de test, paramètres de qualité et accords de fourniture liés à la fabrication additive. Les normes développées par ces comités sont :

- ISO/ASTM DIS 52904 Additive manufacturing - Process characteristics and performance -Standard practice for metal powder bed fusion process to meet critical applications
- ISO/ASTM DIS 52907 Additive manufacturing - Technical specifications on metal powders
- ISO/ASTM DIS 52911-1 Additive manufacturing - Technical design guideline for powder bed fusion — Part 1: Laser-based powder bed fusion of metals
- UNE-EN ISO/ASTM 52915:2016 Spécification du format de fichier pour la fabrication additive (AMF), élaborée en collaboration avec l'ASTM, qui spécifie le format d'échange de données entre les programmes de conception assistée par ordinateur et les équipements de fabrication additive.
- ISO/ASTM WD 52941 Additive manufacturing — System performance and reliability — Standard test method for acceptance of powder-bed fusion machines for metallic materials for aerospace application
- ISO/ASTM WD 52942 Additive manufacturing — Qualification principles — Qualifying machine operators of metal powder bed fusion machines and equipment used in aerospace applications

Il existe une technologie similaire et spécifique aux produits électroniques : l'électronique imprimée. Avec de nouvelles formes d'impression et des matériaux innovants, l'électronique imprimée peut fabriquer des produits à un prix compétitif et présentant de nouvelles possibilités. Le comité international IEC TC 119 Électronique imprimée élabore les standards applicables aux matériaux, processus, équipements, produits et conditions de sécurité nécessaires au développement de la technologie de l'électronique imprimée.

### 6.2.5 Capteurs et internet des objets

Les réseaux de capteurs sans fil (WSN) et l'Internet des Objets (IoT) sont deux ressources technologiques applicables à l'industrie et partageant entre elles le fait de constituer une infrastructure de réseau autonome, dans laquelle sont interconnectés des objets pour mesurer des variables physiques et apporter des solutions à des problèmes.

Au niveau international, le comité ISO/IEC JTC 1/SC 41 Internet des objets et technologies connexes développe des standards liés à l'internet des objets (IoT) et aux réseaux de capteurs.

Le sous-comité de normalisation CTN 71/SC 41 IoT et Technologies connexes développera des standards dans le domaine de l'Internet des Objets (IoT) et des réseaux de capteurs, destinés à garantir l'interopérabilité et la fiabilité de ces réseaux et dispositifs, qu'ils soient génériques ou pour des secteurs déterminés.

Pour sa part, le groupe de travail national CTN 71/GT 7 Réseaux de capteurs a élaboré les standards suivants :

- UNE-ISO/IEC 29182-1 Technologie de l'information. Réseaux de capteurs : Architecture de référence pour réseaux de capteurs. Partie 1 : Vue d'ensemble et exigences.
- UNE-ISO/IEC 29182-2 Technologie de l'information. Réseaux de capteurs : Architecture de référence pour réseaux de capteurs. Partie 2 : Vocabulaire et terminologie.
- UNE-ISO/IEC 29182-6 Technologie de l'information. Réseaux de capteurs : Architecture de référence pour réseaux de capteurs. Partie 6 : Applications.

### 6.2.6 Cloud computing

La possibilité de disposer de l'ensemble de l'information, des processus, des données, etc., au sein du réseau internet, comme dans un nuage, où tout le monde peut avoir accès à l'information complète, sans posséder une grande infrastructure, est un nouveau service que le monde digital offre aux entreprises.

Le comité international ISO/IEC JTC 1/SC 38 Informatique en nuage et plateformes distribuées est responsable du développement des standards garantissant l'interopérabilité et la portabilité des données et applications dans le nuage, qui permettront une scalabilité réelle sans dépendre de technologies propriétaires.

Jusqu'à présent, ce comité a développé les standards ISO/IEC 17788 Informatique en nuage : Description et vocabulaire, et ISO/IEC 17789 Informatique en nuage : Architecture de référence.

## 6.2.7 Intelligence artificielle

Le comité international ISO/IEC JTC 1/SC 42 Intelligence Artificielle développe les standards nécessaires au déploiement de l'Intelligence Artificielle ou à la capacité d'un système à interpréter correctement des données externes, pour apprendre de ces données et utiliser ces connaissances pour réussir des tâches et atteindre des objectifs précis à travers une adaptation souple. Ci-après quelques-unes des normes développées par ce comité :

- ISO/IEC 20546 Information technology — Big data — Overview and vocabulary
- ISO/IEC TR 20547-2 Information technology — Big data reference architecture — Part 2: Use cases and derived requirements
- ISO/IEC TR 20547-5:2018 Information technology — Big data reference architecture — Part 5: Standards roadmap

Au niveau national, il a été récemment créé le sous-comité CTN 71/SC 42 Intelligence Artificielle (IA) et Big Data, qui élabore des standards applicables à ces technologies, en couvrant des aspects comme l'architecture de référence, la gestion des risques, la fiabilité et autre sujets techniques, ainsi que d'autres standards relatifs aux implications éthiques et sociales liées à l'utilisation de ces technologies.

La collecte de données de façon massive qu'implique l'Industrie 4.0 ne sert à rien si l'on ne sait pas extraire et analyser convenablement. En analysant les données obtenues de l'usine, il est possible de procéder à une maintenance préventive ou à une optimisation de processus. À partir des données obtenues des produits, il est possible de recueillir des informations pouvant être utilisées dans les processus de conception, dans la maintenance prédictive des produits ou pour réaliser des études d'habitudes de consommation.

Pour pouvoir utiliser efficacement le Big Data, il est essentiel que les ensembles de données soient standardisés et de disposer d'une architecture de référence. Le comité ISO/IEC JTC 1/WG 9 Big Data a engagé l'élaboration de la norme internationale qui spécifiera l'Architecture de Référence <sup>93</sup>.

## 6.3 Système de gestion pour la digitalisation industrielle

En Espagne, il a été créé le comité CTN GET24 – Processus de transformation pour l'Industrie 4.0 (groupe spécifique de nature temporelle), chargé de la normalisation des processus de transformation digitale des entreprises.

Les standards développés par ce comité permettent d'évaluer la conformité, c'est-à-dire la certification, des entreprises industrielles qui satisferont aux exigences de la réglementation développée.

Cette réglementation repose sur deux grands principes : l'analyse, la gestion et l'atténuation des risques des Technologies de l'Information dans les entreprises ; et le cycle d'amélioration continue, connu sous le sigle anglais PDCA (Planifier, Faire, Vérifier, Réagir). Le cycle d'amélioration continue est la base conceptuelle sur laquelle sont actuellement développées les normes qui définissent les systèmes de gestion dans tout domaine d'activité.

Deux normes ont été développées : la Spécification UNE 0060:2018 Industrie 4.0. Système de gestion pour la digitalisation ; et la Spécification UNE 0061:2019 Industrie 4.0. Système de gestion pour la digitalisation. Critères pour l'évaluation des exigences.

Le standard UNE 0060 définit le système de gestion pour guider le processus de transformation digitale des entreprises industrielles, quels que soient leur taille et leur secteur, en garantissant l'interopérabilité maximale que requiert l'Industrie 4.0. Il se caractérise par :

- Facilité d'utilisation, intégrable avec d'autres systèmes de gestion ISO implantés.
- Orientation vers les PME, conditions adaptées aux besoins des PME.
- Orientation vers le client (digital).
- Processus clés d'affaires, ceux ayant un impact significatif sur les résultats de l'Entreprise.

Le principal objectif de cette norme est de favoriser la digitalisation de l'industrie espagnole, à travers un système de gestion efficace. La spécification a été débattue au sein de l'UNE, dans le cadre d'un groupe multisectoriel dans lequel sont intervenues des associations d'appareils d'éclairage, fournisseurs automobiles, fournisseurs alimentaires et de boissons, entreprises de construction et entreprises technologiques, autres entreprises et PME, et avec la participation directe du Ministère de l'Industrie.

La norme UNE 0060 décrit les conditions pour qu'une industrie, quelle que soit sa taille et quel que soit son secteur, soit considérée comme une Industrie Digitale et puisse être évaluée comme telle, en interne ou par des agents externes (organismes de certification, par exemple).

La norme envisage les points suivants :

- **Leadership**, pour surmonter la résistance au changement qui apparaît naturellement dans le processus de transformation digitale et d'implantation des facilitateurs technologiques relatifs à l'Industrie 4.0 dans tous les secteurs.
- **Planification de la digitalisation**, de façon à ce que l'Industrie 4.0 identifie, pour agir sur eux de façon cohérente et planifiée :
  - i Les processus clés d'affaires dans leur chaîne de valeur tournée vers le client.
  - ii Les produits/services qui pourront être transformés ou complétés.
  - iii Les changements disruptifs qui impacteront le plus leur modèle d'affaires.
  - iv Les compétences et rôles digitaux dont les entreprises ont besoin dans leur activité.

- **Soutien**, pour la mise en place, l'implantation, le maintien et l'amélioration continue de la digitalisation, ainsi que les ressources économiques et financières nécessaires pour y parvenir. En somme :
  - i L'infrastructure en soutien de tous les processus de l'entreprise, et qui permet d'adopter les technologies facilitant la digitalisation.
  - ii Le capital humain avec les aptitudes et compétences suffisantes dans le domaine digital pour assurer la digitalisation de ses processus et activités et son évolution dans le temps.
  - iii Information documentée qui comprendra, au minimum, la carte des processus de l'entreprise, l'organigramme fonctionnel, la planification détaillée de digitalisation et la documentation explicative de l'observation des différentes exigences spécifiées.
- **Opération**, pour mettre en place et contrôler les processus nécessaires, en particulier ceux identifiés comme des processus clés d'affaires. Pour remplir les conditions et développer les actions dans l'environnement digital. Pour contrôler également les changements planifiés et revoir les conséquences des changements non prévus, en engageant des actions pour atténuer tout effet contraire. La mise en place et le développement des activités de digitalisation doivent être envisagés sous différents points de vue :
  - i Vision des processus, en envisageant, au minimum, les processus clés comme l'étude de produits/services, la fabrication, la logistique et distribution et les processus de relation avec le client : marketing/communication, vente, après-vente et service client.
  - ii Vision de client et produit/service. Communication avec le client, transformation digitale dans la conception, le développement et la production. Marketing digital.
  - iii Vision des données numériques. Utilisation de l'information et des données des processus.
  - iv Vision de la technologie, par rapport à la connectivité, traitement et stockage de l'information et des données, hybridation du monde physique et digital, applications client et sécurité de l'information (cybersécurité)
- **Innovation**, pour disposer d'un système permettant de générer, enrichir, matérialiser et partager de manière effective toute la connaissance générée au sein de l'entreprise afin de renforcer les processus de transformation à travers l'Industrie 4.0 qui contribueront à construire des avantages concurrentiels à haute valeur ajoutée, en réduisant les erreurs, en améliorant la qualité et la vitesse de développement et de livraison des produits ou services.
- **Suivi, mesure et évaluation** pour évaluer la conformité avec les exigences fixées et assurer l'efficacité du système implanté.

- **Amélioration continue** par l'analyse périodique de la pertinence, de l'adéquation et de l'efficacité de la digitalisation implantée dans les activités, processus et produits. Mise en œuvre des actions d'amélioration suite à cette analyse.

Pour sa part, la Spécification UNE 0061 établit la procédure d'évaluation de la conformité avec les conditions de la Spécification UNE 0060. Plus précisément, elle définit la durée du cycle d'amélioration continue, fixe les critères détaillés pour évaluer l'observation des conditions définies dans la Spécification UNE 0060 et établit les critères minimums d'observation des conditions pour obtenir la qualification d'Industrie Digitale.

- **Cycle d'amélioration continue.** Un processus d'amélioration continue est une activité récurrente pour améliorer l'exécution. La durée du cycle d'amélioration continue du processus d'évaluation de la digitalisation a été fixée à 3 ans.
- **Critères d'évaluation des conditions.** La Spécification définit le critère d'évaluation des conditions extraites de la Spécification UNE 0060. Les conditions dites *Obligatoires* doivent être toujours envisagées dans le processus de digitalisation de l'organisation industrielle. Seules seront admises des exclusions pour des motifs réglementaires qui s'appliqueront à un secteur déterminé. Les conditions dites *Évaluables* peuvent être exclues du processus si, objectivement, elles ne sont pas applicables et si cela est dûment justifié. Les conditions dites *Non Évaluables* ne sont pas évaluées directement. Leur observation est évaluée à travers d'autres conditions. Le nombre de conditions à évaluer par rapport à chaque point sont :
  - Contexte de l'industrie digitale : 4 obligatoires
  - Leadership : 5 obligatoires
  - Planification : 4 obligatoires, 6 évaluables et 2 non évaluables
  - Infrastructure : 3 obligatoires, 3 évaluables et 1 non évaluable
  - Compétences, talent et capital humain : 4 obligatoires et 2 évaluables
  - Information documentée : 5 obligatoires
  - Opération : 2 obligatoires et 1 évaluable
  - Vision des processus : 1 obligatoire
  - Vision du client et Produit/Service : 2 obligatoires
  - Vision des données numériques : 1 obligatoire et 1 évaluable
  - Vision de la technologie : 2 obligatoires et 1 évaluable
  - Connectivité : 4 obligatoires et 3 évaluables
  - Traitement et stockage : 1 obligatoire et 4 évaluables
  - Hybridation du monde physique et digital : 7 évaluables
  - Applications client : 3 obligatoires et 2 évaluables
  - Sécurité de l'information. Cybersécurité : 8 obligatoires
  - Innovation : 5 obligatoires et 1 évaluable
  - Suivi, mesure et évaluation : 3 obligatoires
  - Amélioration continue : 1 obligatoire

- **Critères minimums d'observation des conditions** tout au long du cycle d'amélioration continue. Pour être qualifiée d'Industrie Digitale, l'entreprise doit satisfaire aux critères minimums applicables aux conditions obligatoires et aux conditions évaluables :
  - i Conditions obligatoires : 80% au début du processus ; 85% au terme de la première année du cycle d'amélioration continue ; 90% au terme de la deuxième année du cycle d'amélioration continue ; 100% au terme du cycle complet d'amélioration continue.
  - ii Conditions évaluables : 35% au début du processus ; 60% au terme du cycle complet d'amélioration continue.

Outre la qualification d'Industrie Digitale, il est possible d'atteindre un niveau d'Industrie Digitale Excellente. Pour atteindre ce niveau d'excellence, l'entreprise doit remplir 100% des conditions obligatoires et 80% de la notation maximale pouvant être obtenue dans les conditions évaluables.

#### **6.4 Modèles de gestion et de bonnes pratiques**

Indépendamment des standards déjà cités, il existe différents modèles et outils qui peuvent être utilisés pour un passage à la transformation digitale de l'Industrie 4.0<sup>97</sup> :

- ITIL (ITSMF, IT Service Management Forum). Bibliothèque d'infrastructure des technologies de l'information (Information Technology Infrastructure Library), de l'Office Public Britannique du Commerce (Office of Government Commerce, OGC). Il s'agit d'un cadre sur les meilleures pratiques relatives à la livraison de services de TI, recherchant qualité et efficacité.
- eTOM, carte améliorée d'opérations de télécommunications (Enhanced Telecom Operations Map), de Telemanagement Forum (TMF), est composé d'un groupe d'entreprises fournissant des services ou applications de télécommunications. Il s'agit d'un cadre de référence de processus pour des opérateurs de télécommunications dont l'objectif est de garantir l'interopérabilité dans l'administration de réseaux, systèmes commerciaux et systèmes opérationnels. eTOM décrit les processus nécessaires à l'automatisation ou à l'interconnexion de systèmes ou éléments.
- CMMI. Intégration de modèles de maturité de capacités (Capability Maturity Model Integration). Il appartient au Centre de Recherche de l'Institut d'Ingénierie de Software (SEI, Software Engineering Institute). Il s'agit d'un cadre pour améliorer les processus destinés à la prestation de services. Le degré de maturité est quantifié en cinq niveaux progressifs, ce qui aide à prendre en compte le chemin évolutif qu'il est possible de suivre pendant une croissance de maturité.

- COBIT. Objectifs de contrôle de l'information et des technologies associées (Control Objectives for Information and related Technology), de l'Association d'Audit et de Contrôle des Systèmes d'Information (ISACA, Information Systems Audit and Control Association) et Gouvernance de TI Institute (ITGI). Il s'agit d'un cadre pour de meilleures pratiques pour la gestion de TI, utilisant un ensemble des objectifs de contrôle généralement acceptés. Cette référence pourrait être utilisée pour définir les objectifs et les pratiques dans tout cadre lié aux installations de TIC.
- TOGAF. Le schéma d'Architecture de l'Open Group (The Open Group Architecture Framework), développé par The Open Group, est une des méthodologies les plus populaires pour développer une Architecture Entrepreneuriale. TOGAF est un outil d'aide à l'acceptation, création, utilisation et maintenance d'architectures. Il repose sur un modèle itératif de processus soutenu par les meilleures pratiques et un ensemble réutilisable d'actifs architectoniques existants.
- TRL. Niveaux de Maturité Technologique (Technology Readiness Levels). Il s'agit d'une méthode pour mesurer le degré de maturité d'une technologie. Il existe 9 niveaux et cette méthode est largement acceptée (Département de la Défense des États-Unis, Agence Spatiale Européenne ou Commission Européenne). En fonction du domaine, différentes définitions sont utilisées et bien qu'il existe des différences entre elles, elles sont conceptuellement similaires.
- Cycle d'attentes exagérées de Gartner. Il s'agit d'une représentation graphique de la maturité, adoption et application commerciale de technologies spécifiques, où sont caractérisés l'excès d'enthousiasme initial et la déception postérieure qui suit généralement l'introduction de nouvelles technologies. C'est un modèle de comportement largement utilisé pour les TIC.
- HADA. Outil d'Autodiagnostic Numérique Avancé. Développé dans le cadre de l'initiative Industrie Connectée 4.0 en collaboration avec l'EOI (École d'Organisation Industrielle) qui permet de connaître le degré de maturité technologique. Il compte une série de questions regroupées en 5 dimensions.
- Industry 4.0 Readiness (IMPULS). Modèle de Maturité Industrie 4.0 réalisé par la Fondation IMPULS de la Fédération d'Ingénierie Allemande. Il s'agit d'un modèle d'orientation très technologique divisé en 6 dimensions et prévoyant 18 éléments pour indiquer le degré de maturité représenté en 6 niveaux.
- Industry 4.0 Self Assessment (PwC). Outil d'autoévaluation élaboré par PwC qui prend en considération 6 dimensions et qui permet d'identifier des besoins, et de classer le niveau de maturité actuel de l'entreprise en 4 niveaux.



# Bibliographie



## BIBLIOGRAPHIE

### Chapitre 1:

1. <https://www.deutschland.de/es/topic/economia/globalizacion-comercio-mundial/industria-40-en-la-feria-de-hannover>
2. <http://www.bbc.com/mundo/noticias-37631834>
3. <http://www.bmbf.de/en/19955.php>
4. <http://www.industriaconectada40.gob.es/Paginas/index.aspx>
5. [http://www.acatech.de/fileadmin/user\\_upload/Baumstruktur\\_nach\\_Website/Acatech/root/de/Publikationen/Projektberichte/acatech\\_STUDIE\\_Maturity\\_Index\\_eng\\_WEB.pdf](http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Publikationen/Projektberichte/acatech_STUDIE_Maturity_Index_eng_WEB.pdf)
6. INDUSTRIACONECTADA40 LA TRANSFORMACIÓN DIGITAL DE LA INDUSTRIA ESPAÑOLA. INFORME PRELIMINAR (<http://www6.mityc.es/IndustriaConectada40/informe-industria-conectada40.pdf>)
7. Gilchrist, A. "Industry 4.0: The Industrial Internet of Things". Editorial Apress. 2016
8. Parrott, A. Warshaw, L. "Industry 4.0 and the digital twin. Manufacturing meets its match". Deloitte University Press. 2017
9. Parrott, A. Warshaw, L. "Industry 4.0 and the digital twin. Manufacturing meets its match". Deloitte University Press. 2017 (<https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cn/Documents/cip/deloitte-cn-cip-industry-4-0-digital-twin-technology-en-171215.pdf>)

### Chapitre 2:

10. [https://tsapps.nist.gov/publication/get\\_pdf.cfm?pub\\_id=820267](https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=820267)
11. Simpson, J. A. Hocken, R. J., Albus, J. S. The Automated Manufacturing Research Facility of the National Bureau of Standards, Journal of Manufacturing Systems: Society of Manufacturing Engineers, 1981
12. N. Abid Ali Khan M. Shyam Sundar S. Sambiah "Low-cost USB2.0 to CAN2.0 bridge design for Automotive Electronic Circuit" International Journal of Electronics Engineering, 2 (2), 2010, pp. 287 – 293
13. Bosch, R. "Automotive Serial Controller Area Network", International Congress and Exposition, Detroit, 24-28 Febrero, 1986
14. <https://www.can-cia.org/can-knowledge/can/can-history/>
15. [https://www.researchgate.net/figure/Typical-Automotive-CAN-Network\\_fig1\\_210264476](https://www.researchgate.net/figure/Typical-Automotive-CAN-Network_fig1_210264476) [accessed 27 Apr. 2020]
16. <https://www.iso.org/standard/20380.html>
17. <http://www.modbus.org/faq.php>
18. <https://www.iso.org/standard/14252.html>
19. [https://standards.ieee.org/standard/802\\_1X-2020.html](https://standards.ieee.org/standard/802_1X-2020.html)
20. <https://ieeexplore.ieee.org/browse/standards/get-program/page/series?id=68>
21. Liberg, O. Sundberg, M. Wang, E. Bergman, J. Sachs, J. "Cellular Internet of Things", Academic Press, 2018
22. <https://opcfoundation.org/about/opc-foundation/history/>
23. <https://revistadigital.inesem.es/gestion-integrada/protocolo-opc-ua-caracteristicas-y-aplicaciones/>
24. <https://www.cisco.com/c/dam/en/us/solutions/collateral/industry-solutions/white-paper-c11-738950.pdf>
25. <https://1.ieee802.org/tsn/>
26. <https://www.3gpp.org/dynareport/SpecList.htm?release=Rel-15&tech=4>
27. <https://www.idtechex.com/research/articles/idtechex-research-5g-is-coming-what-to-expect-and-why-00014993.asp>

28. <https://tools.ietf.org/html/rfc8376>
29. [https://www.3gpp.org/news-events/1785-nb\\_iot\\_complete](https://www.3gpp.org/news-events/1785-nb_iot_complete)
30. [https://www.3gpp.org/news-events/1906-c\\_iot](https://www.3gpp.org/news-events/1906-c_iot)
31. <https://accent-systems.com/es/blog/diferencias-nb-iot-lte-m/>
32. <https://www.sigfox.com/en/sigfox-story>
33. <https://patentimages.storage.googleapis.com/7b/c7/52/702f5f975a85c9/US20160094269A1.pdf>
34. [https://documents.trendmicro.com/assets/white\\_papers/wp-the-fragility-of-industrial-IoTs-data-backbone.pdf?v1](https://documents.trendmicro.com/assets/white_papers/wp-the-fragility-of-industrial-IoTs-data-backbone.pdf?v1)
35. <https://www.iso.org/standard/69466.html>
36. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/1255421.1255424>
37. <https://tools.ietf.org/html/rfc7252>
38. <http://crypto.stanford.edu/~nagendra/papers/dtls.pdf>
39. Nagendra, M, Rescorla, E. "The Design and Implementation of Datagram TLS", Standford, 2006

### Chapitre 3:

40. J.L. Peña. La simulación dinámica en el control de procesos. Ingeniería Química, Julio/Agosto, 139-145, 1998.
41. T.E. Marlin. Process Control. Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance. Mc.Graw-Hill International Editions, 745-773, 1995.
42. J.C. Jarque et al. Comportamiento de composiciones cerámicas frente al secado en condiciones industriales. En el VII Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico - Qualicer 2002. Castellón: Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2002.
43. J.L. Amorós et al. Mejora de la estabilidad dimensional de piezas de gres porcelánico a través de la medida en continuo de la humedad de los soportes prensados. Cerámica Información, 311, 117-126, 2004.
44. J.L. Amorós. Vidriados para pavimentos y revestimientos cerámicos. Evolución y perspectiva. Qualicer 1992, 73-103, 1995.
45. BLASCO, A; ENRIQUE, J.E.; ARRÉBOLA, C. Los defloculantes y su acción en las pastas cerámicas para atomización. Cerám. cristal, 98, 37-41, 1986.
46. V. Cantavella, E. Sánchez, G. Mallol, E. Monfort, L. Miralles, E. Cuesta, M.C. García. Control de la operación de molienda en continuo En VII Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico - Qualicer 2002. Castellón: Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2002.
47. M. Moschini, G.M. Revel, S. Rocchi, D. Totaro, I. Roncarati. Medida en línea de la densidad y viscosidad de la barbotina. En VIII Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico - Qualicer 2004. Castellón: Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2004.
48. J.L. Amorós. Pastas cerámicas para pavimentos de monococción. Influencia de las variables de prensado sobre las propiedades de la pieza en crudo y sobre su comportamiento durante el prensado y la cocción. Valencia: Universidad, 1987, p. 61. Thèse doctorale
49. J.L. Amorós et al. La operación de prensado en la fabricación de pavimento por monococción. I Influencia de la naturaleza del polvo de prensas sobre las propiedades de la pieza en crudo. Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidrio, 27(5), 273-282, 1988
50. J.L. Amorós et al. La operación de prensado de pavimentos por monococción. II Influencia de la naturaleza del polvo de prensas sobre las propiedades de la pieza en cocido. Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidrio, 29(3), 151-158, 1990
51. F. Negre, J.C. Jarque, C. Feliú, J.E. Enrique. Estudio de la operación de secado por atomización de polvos cerámicos a escala industrial, su control y automatización. Técnica Cerámica, 228, 736-744, 1994

52. JARQUE, J.C.; CANTAVELLA, V.; SANZ, V.; MESTRE, S. Control automático de la humedad en una instalación de secado por atomización. XL Congreso de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 8-11 de noviembre de 2000. Onda (Castellón).
53. A. Escardino, J.L. Amorós, V. Beltrán. Cinética de la oxidación de la materia orgánica en productos cerámicos prensados. En: I Congreso Iberoamericano de Cerámica, Vidrio y Refractarios. Arganda del Rey: Sociedad Española de Cerámica y Vidrio (1). 317-329, 1983.
54. ENRIQUE, J.E.; GARCÍA, J.; AMORÓS, J.L.; BELTRÁN, V. Alternativas al método de inmersión en mercurio para la determinación de la densidad aparente de baldosas cerámicas. Técnica Cerámica, 250, 18-27, 1997.
55. CANTAVELLA, V.; LLORENS, D.; MEZQUITA, A.; MOLTÓ, C.; BHARDWAJ, M.C.; VILANOVA, P.; FERRANDO, J.; MALDONADO-ZAGAL, S. Uso de la técnica de ultrasonidos para medir la densidad aparente de las baldosas en crudo y optimizar el proceso de prensado. En el IX Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico - Qualicer 2006. Castellón: Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2006.
56. MARCHETTI, B.; REVE, G.M. Medida en línea de la densidad en crudo de baldosas cerámicas. Análisis de incertidumbres. En el VII Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico - Qualicer 2002. Castellón: Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2002.
57. BLASCO, A.; LLORENS, D.; MALLOL, G.; JARQUE, J.C. Experimental Study of the determination of dry compaction of ware shaped by unidirectional pressing, in continuous operation and in true time. Tile Brick Int., 8(6), 424 - 438, 1992.
58. G. Mallol, A. Mezquita, D. Llorens, J.C. Jarque, J. Sahún, F. Valle. Estudio de la operación de secado de los soportes de las baldosas cerámicas de secaderos verticales. En el VII Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico - Qualicer 2002. Castellón: Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2002.
59. J.C. Jarque. Estudio del comportamiento mecánico de soportes cerámicos crusos. Mejora de sus propiedades mecánicas. Universitat Jaume I de Castelló. Castelló, 2001.
60. J.E. Enrique, V. Cantavella, D.T. Llorens. Dispositivo y método de control automático de aportación de fluidos. Patente Pg901211. 1999.
61. S. Coe. The Automatic Inspection of Ceramic Tiles Between Press and Kiln. cfi/Ber. DKG 79 (2002) No. 11.
62. BLASCO, A.; CARDÀ, L.; MALLOL, G.; MONFORT, E. Optimización de las condiciones de funcionamiento en hornos monoestratificado (I). Curva de presiones. Técnica Cerámica, 206, 585-593, 1992.
63. BLASCO, A.; ENRIQUE, J.E.; MALLOL, G.; MONFORT, E. Optimización de las condiciones de funcionamiento en hornos monoestratificado (II). Caudal de aire de combustión. Técnica Cerámica, 218, 716-729, 1993.
64. D. Llorens, G. Mallol, E. Monfort, A. Moreno, C. Ferrer. Optimización de las condiciones de funcionamiento en hornos monoestratificado (III). Medida de gradientes transversales de temperatura. Técnica Cerámica, 227, 653-662, 1994.
65. J.C. Jarque et al. Influencia de las condiciones de operación del horno de rodillos sobre la curvatura de las piezas. Técnica Cerámica, 303, 685-687, 2002.
66. J.L. Amorós et al. Estabilidad dimensional en piezas de monococción porosa. En: Actas del II Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico. Castellón. Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 347-376, 1992.
67. V. Cantavella. Simulación de la deformación de baldosas cerámicas durante la cocción. Universitat Jaume I de Castelló. Castelló, 1998.
68. J.L. Amorós et al. Acuerdo esmalte-soporte (I) Causas y factores de los que depende. Técnica Cerámica, 178, 582-592, 1989.
69. R. Massen, T. Franz. The Quality of Automatic Tile Quality Inspection Systems. cfi/Ber. DKG 78 (2001) No. 1-2
70. S. Coe. Automatic tile inspection. International Ceramics, 1, 33, 35, 2000.

**Chapitre 4:**

71. Münch, Administración: Escuelas, proceso administrativo, áreas funcionales y desarrollo emprendedor. Editorial Pearson, Première édition, 2007, pp. 75-76.
72. Taylor, F. W. (1911), The Principles of Scientific Management, New York, NY, USA and London, UK: Harper & Brothers, LCCN 11010339, OCLC 233134. (También disponible para descarga en el proyecto Gutenberg.)
73. Gantt H. L., Work, Wages and Profit. The Engineering Magazine (Nueva York). 1915 ISBN 0879600489.
74. Tornos Juan P., Lova Ruiz A. "Investigación Operativa para ingenieros" Editorial Universidad Politécnica de València, 2003
75. Kantorovich L. Métodos matemáticos para la organización y la producción, 1939
76. Dantzig, G. Linear Programming and Extensions. United States Air Force, 1948
77. McNaughton, R. Scheduling with deadlines and loss functions. Management Science, pp. 1-12, 1959.
78. A. H. Land and A. G. Doig. An automatic method of solving discrete programming problems. Econometrica. pp. 497-520. 1960
79. Michael R. Garey y David S. Johnson, Computers and intractability. A guide to the theory of NP-completeness, Macmillan Higher Education, Nueva York, 1979.
80. L. Monostori et al. Cyber-physical systems in manufacturing. CIRP Annals; Volume 65, Issue 2 (2016), 621-641
81. T. Uhleman et al. The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0. Procedia CIRP; Volume 61 (2017), 335-340
82. E. Negri et al. A review of the roles of Digital Twin in CPS-based production systems. Procedia Manufacturing; Volume 11 (2017), 939-948
83. W. Krintzinger et al. Digital Twin in manufacturing: a categorical literature review and classification. IFAC PapersOnLine; 51-11 (2018), 1016-1022
84. Y. Lu et al. Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing; Volume 61 (2020), 101837
85. G. Mallol. Control y automatización en la industria cerámica. Evolución y perspectivas. Cerámica Información; 347. (2007) 63-80
86. J. L. Hervas et al. A place-based policy for promoting Industry 4.0: the case of the Castellón ceramic tile district. European Planning Studies (2019)
87. S. Robinson. Simulation – The Practice of Model Development and Use. 2nd edition; Palgrave McMillan (2017)
88. A. M. Law. Simulation modelling and analysis; New York: McGraw-hill, Inc (2007)

**Chapitre 5:**

89. [https://www.sas.com/es\\_es/insights/analytics/deep-learning.html](https://www.sas.com/es_es/insights/analytics/deep-learning.html)
90. McCarthy, J., Minsky, M., Rochester, N., Shannon, C.E. A Proposal for the Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence, August 31, 1955
91. Samuel, A. L.. "Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers". IBM Journal of Research and Development, 1959 pp. 206–226.

**Chapitre 6:**

92. <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=2935&edi=146&xit=industria-40-o-smart-industry>
93. Document "Estandarización para la Industria 4.0. Informes de Normalización". UNE Asociación española de normalización.
94. Document "Normalización y la Industria 4.0" Octobre 2018. UNE Asociación española de normalización.
95. Spécification UNE 0060:2018 Industria 4.0. Système de gestion pour la digitalisation. Exigences
96. Spécification UNE 0061:2019 Industria 4.0. Système de gestion pour la digitalisation. Critères pour l'évaluation des exigences
97. Projet de fin d'études "Marco para la evaluación en la implementación de la Industria 4.0". Auteur : M<sup>a</sup> Dolores Sánchez Pena. Dép. d'Organisation Industrielle et Gestion des Entreprises. École Technique Supérieure d'Ingénierie. Université de Séville



**Entreprises partenaires:**

BARBIERI & TAROZZI IBERICA, S.L.  
CHUMILLAS TECHNOLOGY, S.L. - CHT  
EFI CRETAPRINT, S.L.U.  
ERRECE MAQUINARIA CERAMICA, S.L.  
INTEGRA SYNERGY SYSTEMS, S.L.U.  
INNOVA MAQUINARIA INDUSTRIAL, S.L  
KERAJET, S.A.  
MACER, S.L.  
MAINCER, S.L.  
SACMI IBERICA, S.A.  
SYSTEM ESPAÑA, S.A.  
TALLERES FORO, S.A.



Financé par:



GENERALITAT  
VALENCIANA

TOTS  
A UNA  
*velu*

iVACE  
INSTITUTO VALENCIANO DE  
COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL



UNIÓN EUROPEA  
Fondo Europeo de  
Desarrollo Regional

*Una manera de hacer Europa*

Collaborateur:



Asociación Española de Fabricantes  
de Maquinaria y Bienes de Equipo  
para la Industria Cerámica



Auteur:

