

Chapitre 2 : Cadre Théorique – Qualité Industrielle et Pilotage par Indicateurs

Qualité industrielle : concepts fondamentaux

Dans le domaine industriel, la **qualité** recouvre un ensemble de principes et de méthodes visant la satisfaction des exigences client tout en améliorant en permanence les processus internes. Ce chapitre présente les concepts théoriques majeurs de la gestion de la qualité en entreprise, en abordant notamment la notion de *Qualité Totale*, l'approche du *Zéro Défaut*, la méthode d'organisation *5S*, l'*approche processus* et le principe d'*amélioration continue*. Chacun de ces concepts a contribué à forger les pratiques modernes de management de la qualité et sert de fondation à la mise en place d'indicateurs de performance pertinents.

Qualité Totale (Total Quality Management)

La **Qualité Totale**, souvent désignée par le sigle *TQM* (Total Quality Management), est une démarche globale de gestion de la qualité qui vise à impliquer l'ensemble de l'organisation dans l'amélioration continue en vue d'atteindre une qualité « parfaite » ¹. L'idée centrale de la Qualité Totale est que chaque membre de l'entreprise, du dirigeant aux opérateurs, participe activement à la quête de l'excellence. Il s'agit d'une philosophie managériale apparue au Japon vers les années 1950 dans le sillage des travaux de Deming, Juran et Crosby, et qui a été popularisée mondialement dans les décennies suivantes.

Concrètement, le management par la Qualité Totale se traduit par une mobilisation très large de tous les départements et employés pour minimiser les **gaspillages** et optimiser les processus, produits et services fournis ¹. Cela implique notamment : (1) une *orientation client* forte (comprendre et satisfaire voire surpasser les attentes du client), (2) l'*implication du personnel* et la responsabilisation de chacun vis-à-vis de la qualité, (3) une approche factuelle fondée sur des indicateurs et des données mesurables, et (4) un engagement de la direction à créer une culture propice à la qualité. En Qualité Totale, la qualité n'est plus seulement le fait du service qualité, mais devient l'affaire de tous au quotidien.

Il convient de noter que la Qualité Totale repose sur certains standards, notamment la norme **ISO 9004**, qui complète la norme ISO 9001 en fournissant des lignes directrices pour atteindre les objectifs de performance et de pérennité dans une perspective de Qualité Totale ². De plus, la Qualité Totale a été à l'origine de nombreuses pratiques aujourd'hui répandues (cercles de qualité, amélioration continue via PDCA, gestion participative, etc.), formant un cadre de référence pour une organisation apprenante tournée vers l'excellence opérationnelle.

L'approche « Zéro Défaut »

L'approche **Zéro Défaut** est un objectif ambitieux qui s'inscrit dans la recherche de la perfection au sein de la Qualité Totale ³ ⁴. Il s'agit de viser l'*absence totale de défauts* dans les processus de production et les produits livrés. Popularisé au début des années 1960 par le qualité-guru **Philip B. Crosby**, le principe du zéro défaut postule que le seul niveau de qualité véritablement acceptable est celui où aucune non-conformité n'est produite ⁵. En ce sens, il encourage une prévention absolue des erreurs : « *faire bien du premier coup* » et éliminer la notion même de « tolérance » aux défauts. Crosby

résumait cette philosophie en affirmant que la qualité coûte moins cher que la non-qualité, et qu'il n'y a pas de raison d'accepter le moindre défaut si les processus sont correctement maîtrisés.

Cependant, bien que noble dans son intention, l'objectif zéro défaut est souvent perçu comme difficilement atteignable de façon soutenable. Certaines critiques font valoir qu'une poursuite littérale du zéro défaut peut avoir un effet démobilisateur sur les employés, comme si l'erreur humaine était totalement exclue, et peut laisser croire à tort qu'une perfection absolue est possible en toutes circonstances ⁵. En pratique, la démarche zéro défaut sert surtout de **cap idéal** pour inciter à repousser sans cesse les limites de la performance qualité. Dans l'industrie, cela se traduit par exemple par la mise en place de contrôles et de méthodes robustes de *prévention des erreurs* (poka-yoke, analyse des causes racines des non-conformités, amélioration des processus) afin de tendre vers cet idéal.

De nos jours, certaines industries à haute exigence (aéronautique, automobile, médical...) ont quasiment approché le zéro défaut sur de larges échelles de production, au point de devoir affiner leurs mesures de qualité à des niveaux extrêmement faibles de non-conformité (voir section sur le PPM et l'IPB). Ainsi, le « zéro défaut » reste un principe moteur en qualité industrielle, comme une *cible asymptotique* guidant l'amélioration continue et la culture de la prévention.

La méthode des 5S

La méthode des **5S** est un outil d'organisation du lieu de travail, originaire du Japon, visant à améliorer l'efficacité, la qualité et la sécurité dans l'entreprise par un environnement de travail ordonné et standardisé. Le terme 5S réfère aux cinq étapes (issues de cinq mots japonais commençant par S) qui structurent la démarche : **Seiri (Trier)**, **Seiton (Ranger)**, **Seiso (Nettoyer)**, **Seiketsu (Standardiser)** et **Shitsuke (Maintenir – discipline)** ⁶. En français, on les traduit par *Trier*, *Ranger*, *Nettoyer*, *Standardiser* et *Maintenir*.

L'application systématique des 5S consiste d'abord à **Trier** pour éliminer l'inutile (se débarrasser des outils, matériaux ou documents superflus afin de ne garder que ce qui est nécessaire à l'activité). Ensuite, **Ranger** chaque chose à sa place de manière logique (pour minimiser les déplacements et faciliter l'accès aux objets utiles) et **Nettoyer** régulièrement afin de maintenir un espace de travail propre et détecter rapidement d'éventuels dysfonctionnements (fuites, usure, anomalies visibles). Quatrièmement, **Standardiser** les méthodes de rangement et de nettoyage (mettre en place des normes visuelles, procédures, check-lists afin que tous suivent les mêmes pratiques optimales). Enfin, **Maintenir** ces bonnes habitudes dans le temps par la discipline, la formation et l'implication du personnel.

La méthode 5S constitue souvent le socle d'une démarche de *lean management* ou d'**amélioration continue** sur le terrain. En effet, un poste de travail bien organisé réduit les risques d'erreur, les temps perdus et améliore naturellement la qualité du produit et la productivité. Le *Collège de Paris* résume l'intérêt de la méthode 5S en soulignant qu'elle fournit un cadre structuré pour éliminer les gaspillages, motiver les employés et instaurer un environnement propice à l'efficacité et à la sécurité ⁷. En d'autres termes, le 5S crée les conditions d'un travail de qualité : un opérateur qui n'a pas à chercher ses outils, qui évolue dans un espace sûr et propre, sera plus à même de réaliser un produit conforme du premier coup.

De plus, la mise en place des 5S a un effet *visuel* et culturel important : un atelier ordonné et bien tenu reflète une culture de la rigueur et du souci du détail, ce qui est communicatif vis-à-vis du personnel comme des visiteurs ou auditeurs qualité. Ainsi, la méthode des 5S est bien plus qu'un simple nettoyage : c'est un levier d'**assurance qualité** et de performance opérationnelle au quotidien.

L'approche processus

L'**approche processus** est un principe clé du management de la qualité, formalisé notamment dans la norme ISO 9001. Il s'agit d'une méthode d'analyse et de gestion qui consiste à considérer les activités de l'organisation comme un ensemble de *processus* interconnectés, transformant des entrants en sortants, et dont il convient de maîtriser les interactions pour satisfaire efficacement les objectifs ⁸. En d'autres termes, plutôt que de raisonner en silos (par services ou fonctions séparées), l'approche processus amène à raisonner en termes de flux de travail transversal allant de la demande du client à la livraison du produit/service final, en passant par toutes les étapes intermédiaires.

Définition : Un *processus* est un ensemble d'activités corrélées ou interactives qui utilise des ressources (main d'œuvre, matières, informations, équipements) pour convertir des éléments d'entrée (*inputs*) en éléments de sortie (*outputs*) apportant de la valeur pour un client (interne ou externe). Par exemple, la fabrication d'un produit est un processus qui prend en entrée des matières premières, des instructions de production, etc., et qui délivre en sortie un produit fini. L'approche processus implique d'identifier chaque processus de l'entreprise, de clarifier ses **objectifs**, ses **indicateurs de performance**, ses **fournisseurs** (internes/externes) et **clients** (internes/externes), puis de gérer ces processus de manière pilotée.

L'approche processus apporte plusieurs valeurs ajoutées : elle permet de **formaliser l'organisation** (en cartographiant les processus, on obtient une vision commune du fonctionnement de l'entreprise), de mieux **comprendre et maîtriser les interactions** entre activités (par exemple, comment un retard dans le processus d'approvisionnement impacte le processus de fabrication), et d'**améliorer de façon continue** les performances en agissant sur les processus plutôt que sur les seules fonctions isolées ⁹. Ce mode d'organisation transverse favorise aussi la communication et la collaboration entre services, chacun voyant son rôle dans la « chaîne de valeur » globale de l'entreprise ¹⁰.

En pratique, une **cartographie des processus** est souvent réalisée, distinguant généralement les processus de *pilotage* (ou management), les processus *opérationnels* (cœur de métier, ex: conception, production, vente) et les processus *de support* (soutien, ex: maintenance, RH, systèmes d'info). Cette représentation aide à identifier les interactions clés et à affecter des *propriétaires de processus* chargés de leur performance. L'approche processus s'accompagne enfin de la notion de *système de management par les processus* où l'ensemble des processus est surveillé via des indicateurs, audité et amélioré en continu. C'est un élément fondamental des systèmes qualité certifiés ISO 9001, qui reposent sur l'idée que la **maîtrise systématique des processus** conduit à la maîtrise de la qualité des produits et services livrés.

L'amélioration continue

L'**amélioration continue** est un principe transversal à toute démarche qualité : il s'agit de l'effort constant et systématique pour **perfectionner les processus, produits et services** d'une organisation ¹¹. Plutôt qu'un état final à atteindre, la qualité est perçue comme un objectif en mouvement, nécessitant des ajustements et des optimisations régulières. Ce concept, popularisé par la philosophie japonaise *Kaizen* (« changement pour le mieux »), se concrétise par la mise en place de méthodes permettant d'impliquer durablement toute l'entreprise dans la recherche d'améliorations graduelles, petites ou grandes.

L'amélioration continue repose classiquement sur le **cycle PDCA (Plan-Do-Check-Act)**, également appelé roue de Deming, qui fournit une démarche itérative structurée pour la résolution de problèmes et l'optimisation des processus. Le PDCA comprend quatre étapes fondamentales : *Planifier* (Plan) une amélioration ou une action en se fixant des objectifs et en déterminant les moyens, *Déployer/Réaliser*

(Do) les actions à petite échelle pour test, *Contrôler/Vérifier* (Check) les résultats obtenus en les comparant aux objectifs, puis *Agir* (Act) en standardisant l'amélioration si elle est concluante ou en initiant un nouveau cycle avec les corrections nécessaires ¹² ¹³. Ce cycle, représenté schématiquement ci-dessous, est au cœur des systèmes qualité pour assurer une progression continue :

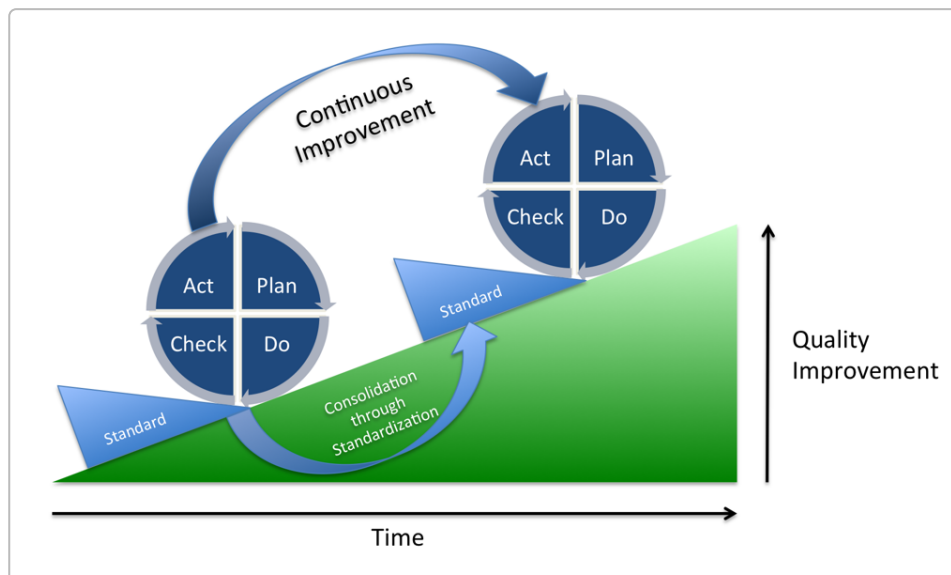


Figure – Cycle PDCA (Plan-Do-Check-Act), fondation de l'amélioration continue. En itérant sur ces quatre étapes, les organisations consolident les progrès réalisés et élèvent graduellement leur niveau de qualité. ¹²

¹⁴

Comme illustré ci-dessus, chaque itération du PDCA permet d'obtenir un palier de performance amélioré, ensuite standardisé, puis on relance un nouveau cycle pour aller plus loin. Cette approche crée une **boucle d'apprentissage permanente** dans l'entreprise, où l'on analyse systématiquement les écarts, on en tire des actions correctives et on capitalise sur les succès. L'amélioration continue ne concerne pas que les processus de production, mais aussi la qualité du management, la formation du personnel, la relation fournisseurs, etc. Il s'agit vraiment d'une **culture** à inculquer à tous les niveaux : chaque employé doit être encouragé à rechercher des opportunités d'amélioration dans son travail quotidien et à remonter les problèmes ou idées (d'où l'importance de démarches participatives, de suggestions, de cercles de qualité, etc. dans l'esprit Kaizen).

En adoptant une telle culture, **l'excellence opérationnelle** devient un objectif partagé. Les bénéfices concrets incluent une réduction progressive des non-conformités, des gains de productivité, une plus grande agilité face aux changements et une meilleure satisfaction des clients. En somme, l'amélioration continue est le moteur qui permet aux autres concepts (Qualité Totale, zéro défaut, 5S, etc.) de vivre dans la durée et de produire leurs effets : elle transforme les coups d'éclat en progrès durables. Il est souvent dit qu'un système de management de la qualité *sans* amélioration continue est voué à stagner, voire à régresser, compte tenu de l'évolution constante des besoins et du contexte.

Les indicateurs de performance qualité (KPI)

Pour piloter la qualité de manière efficace, les entreprises ont recours à des **indicateurs de performance** clés, souvent appelés *KPI* (Key Performance Indicators). Un indicateur de performance qualité est une mesure quantitative qui permet d'évaluer dans quelle mesure un processus ou un produit atteint les objectifs qualité fixés. Ces indicateurs offrent une **vue synthétique** et chiffrée de la

performance, et constituent le langage commun sur lequel s'appuie le management pour détecter les problèmes, suivre les progrès et orienter les actions d'amélioration.

Dans le contexte industriel, de nombreux KPI qualité peuvent être suivis. On peut citer par exemple le *taux de défauts* (pourcentage de pièces défectueuses), le *taux de retouche* (pièces nécessitant reprise), le *taux de réclamations client*, etc. Cependant, ce chapitre mettra l'accent sur quelques indicateurs particulièrement répandus et significatifs dans l'industrie manufacturière, notamment dans l'automobile et l'électronique : **PPM**, **IPB**, **Coût de Non-Qualité (NQC)** et **First Pass Yield (FPY)**. Chacun de ces indicateurs sera défini précisément, avec sa formule de calcul et son intérêt, illustré par des exemples industriels.

Notons qu'un bon indicateur doit être **pertinent, fiable, simple à mesurer, et actionnable**. La sélection des KPI doit s'aligner sur les objectifs stratégiques de l'entreprise et les axes d'amélioration visés ¹⁵. En effet, un tableau de bord qualité efficace se contente d'un nombre limité d'indicateurs bien choisis, évitant de se noyer dans des données inutiles ¹⁶. Les sections suivantes décrivent les indicateurs retenus.

Le PPM (Parts Per Million)

PPM est l'acronyme de *Parts Per Million*, c'est-à-dire « pièces par million ». Il s'agit d'un indicateur qui exprime le **nombre de pièces non conformes pour un million de pièces produites ou traitées**. Autrement dit, le PPM quantifie la proportion de défauts à l'échelle du million d'unités, ce qui en fait une mesure très fine du niveau de qualité d'un processus. Cet indicateur est particulièrement utilisé dans les secteurs où les taux de défaut sont très faibles (automobile, aéronautique, électronique...), afin de pouvoir comparer et suivre des niveaux de qualité qui se chiffrent en fractions de pour-cent.

Formellement, on calcule le PPM ainsi :

$$[\text{PPM} = \frac{\text{Nombre de pièces non conformes}}{\text{Nombre total de pièces produites}} \times 1\,000\,000.]$$

Par exemple, si dans une usine on détecte 5 pièces défectueuses sur un lot de 10 000 pièces produites, alors le PPM vaut ($\frac{5}{10000} \times 1\,000\,000 = 500$) PPM. Cela signifie que statistiquement, sur un million de pièces, on en aurait 500 de défectueuses. Un PPM faible indique donc un très haut niveau de qualité (proche du zéro défaut).

La littérature souligne que dans l'automobile et l'aérospatiale, le PPM est *l'indicateur de niveau de qualité* par excellence, car une seule pièce défectueuse peut souvent entraîner la panne de l'ensemble du système (véhicule, avion) ¹⁷. Ces industries cherchent donc à atteindre des PPM extrêmement bas sur chaque composant pour garantir la fiabilité globale. Ainsi, **un PPM mesure la maîtrise du processus de fabrication** : atteindre quelques ppm, voire moins d'1 ppm, est signe d'une excellente maîtrise.

Un exemple concret est donné par un service de restauration qui constate que 20 clients sur 1000 sont insatisfaits d'un temps d'attente trop long ; cela correspond à un PPM de 20 000 (sur un million de clients, 20 000 auraient attendu trop longtemps) ¹⁸. Dans un contexte industriel, un fournisseur automobile peut avoir un objectif de, par exemple, **PPM = 10**, ce qui signifie au maximum 10 pièces défectueuses par million livrées.

Le PPM a aussi l'avantage d'être une mesure **globale** facile à communiquer : les constructeurs automobiles fixent souvent des objectifs PPM à leurs fournisseurs et comparent les performances.

Cependant, le PPM seul ne dit pas tout : il ne précise pas la criticité des défauts, ni leur nature. C'est un indicateur quantitatif brut. Il doit donc être complété par d'autres analyses (par exemple, distinguer PPM interne – défauts détectés en usine – et PPM externe – défauts détectés chez le client, ou encore PPM par type de défaut). Malgré ces limites, le PPM reste une référence universelle de la qualité industrielle.

À titre informatif, l'approche Six Sigma, méthodologie de qualité visant 3,4 défauts par million d'opportunités, s'exprime également en PPM (3,4 ppm correspondant à 99,99966% de qualité). Ce niveau « quasi-parfait » illustre à quel point l'échelle du PPM permet de mesurer de minuscules taux de défaillance que d'autres indicateurs (pourcentage de défauts, Cpk...) ne distingueraient plus.

L'IPB (Incidents Per Billion)

Alors que le PPM s'exprime par million, certaines entreprises ont vu leurs performances qualité progresser au point de devoir mesurer les défauts sur une échelle encore plus grande : le **milliard**. C'est le cas de l'indicateur **IPB** (*Incidents Per Billion*), soit « incidents par milliard de pièces ». L'IPB indique le **nombre d'incidents de qualité rapporté à un milliard d'unités produites**. Un « incident » peut être défini selon le contexte : souvent, il s'agit du nombre d'incidents qualité chez le client (par exemple, nombre de réclamations, nombre de retours ou pannes) sur le nombre de pièces livrées.

L'IPB se calcule de manière analogue au PPM, en multipliant par 1 000 000 000 au lieu de 1 000 000 ¹⁹.
Formellement :

[$IPB = \frac{\text{Nombre d'incidents qualité}}{\text{Quantité de pièces fournies}} \times 1\,000\,000\,000$,
000.]

Cet indicateur est apparu dans l'industrie électronique et automobile, où la fiabilité tend vers des taux de défaut extrêmement faibles. Par exemple, l'équipementier Cooper Standard a indiqué s'être progressivement focalisé non plus sur les défauts par million (PPM) mais sur les incidents par milliard (IPB) pour évaluer la performance qualité de ses usines ²⁰. De même, le groupe Stellantis (ex-FCA) a adopté l'IPB dans l'évaluation qualité de ses fournisseurs, afin de baser les calculs sur le nombre de pièces plutôt que sur d'autres critères ²¹.

Concrètement, supposons qu'un fournisseur livre 50 000 000 de pièces à un constructeur sur une période donnée, et que 1 de ces pièces a causé un incident majeur en clientèle. On aurait alors ($IPB = \frac{1}{50\,000\,000} \times 1\,000\,000\,000 = 20$) IPB. Ce chiffre de 20 IPB signifie que si on extrapolait à un milliard de pièces, on pourrait s'attendre à 20 incidents. Un objectif typique pour un fournisseur de composants critiques pourrait être d'avoir $IPB \leq 1$ (ce qui revient à moins d'un incident grave par milliard de pièces livrées).

L'intérêt de l'IPB est de **pousser la logique du zéro défaut encore plus loin**. Là où le PPM devient peu sensible (quand on descend en dessous de 1 ppm, il faut des volumes énormes pour détecter des défauts réels), l'IPB offre une granularité additionnelle. Il témoigne aussi de l'élévation des exigences qualité : certaines entreprises de haute technologie visent aujourd'hui des taux en parties par milliard, signe d'un niveau de qualité autrefois inimaginable. Par exemple, dans le secteur des semi-conducteurs ou de la mémoire informatique, on parle en « DPPB » (défauts par milliard) tant le niveau d'exigence est élevé.

En résumé, **PPM et IPB sont des métriques de non-conformité liées** : le PPM mesure à l'échelle du million et l'IPB à celle du milliard. Les deux sont calculés de façon similaire et permettent de comparer la

qualité réalisée à des objectifs extrêmement stricts. Le passage au suivi en IPB dans l'automobile illustre simplement que la qualité s'améliorant, on exprime désormais les rares incidents sur une base plus large pour mieux les quantifier ²⁰. L'IPB reste toutefois moins universellement utilisé que le PPM, sauf dans des accords client-fournisseur précis ou des industries de pointe.

Le coût de non-qualité (NQC)

Le **coût de la non-qualité** (souvent abrégé en *NQC* pour *Non-Quality Cost* ou *Coût de Non-Qualité*) représente l'ensemble des coûts **occasionnés par des défauts, des dysfonctionnements ou des insuffisances de qualité** dans l'entreprise. En d'autres termes, ce sont toutes les dépenses qui n'auraient pas lieu d'être si la qualité était parfaite du premier coup. On parle parfois également de *COPQ* (*Cost of Poor Quality*) ou de *coûts des non-conformités*. Ces coûts cachés de la non-qualité peuvent être énormes : il est souvent cité qu'ils peuvent représenter entre 10 % et 40 % du chiffre d'affaires d'une entreprise ²², quand on cumule les pertes directes et indirectes.

Le coût de non-qualité se divise classiquement en plusieurs catégories ²³ :

- **Coûts d'anomalies internes** : ce sont les pertes liées aux défauts détectés *avant* la livraison au client. Par exemple, la ferraille et les rebuts (scrap) de pièces non réparables, les coûts de retouche et de réparation des produits non conformes, les heures de main d'œuvre supplémentaires pour trier ou refaire des lots, le coût des *délais* supplémentaires occasionnés, etc. S'y ajoutent parfois des coûts moins visibles comme la gestion des stocks excédentaires liés aux problèmes de qualité, les interruptions de production (arrêts de chaîne dus à un défaut), les accidents ou incidents internes causés par des non-conformités (ex: pièce cassée dans une machine), etc. ²⁴.
- **Coûts d'anomalies externes** : ce sont les coûts générés par les défauts découverts *après* livraison au client. Cela inclut le traitement des réclamations clients, les retours produits, les échanges sous garantie, les pénalités et compensations financières versées aux clients mécontents, les campagnes de rappel (très coûteuses dans l'automobile par ex.), ainsi que la perte potentielle de clients ou de parts de marché du fait d'une mauvaise qualité perçue ²⁵. S'y rattachent aussi les coûts éventuels de contentieux juridiques, d'assurance qualité (malus d'assurance en cas de problèmes) ou d'atteinte à l'image de marque.
- **Coûts de détection** (ou d'évaluation) : ils correspondent aux dépenses liées aux activités de contrôle et de test qui, bien qu'indispensables, sont en un sens des coûts de non-qualité car elles n'ajoutent pas de valeur au produit final du point de vue du client. Par exemple, les salaires et équipements pour les inspections qualité, les coûts d'audit interne, les matériaux consommés pour les essais destructifs, l'étalonnage des instruments de mesure, etc. ²⁶. Ces coûts visent à détecter des défauts qui n'auraient pas dû exister et seraient idéalement éliminés par une meilleure prévention.
- **Coûts de prévention** : ce sont les investissements consentis pour éviter la non-qualité. Paradoxalement, ils sont parfois rangés dans les coûts de qualité, mais on peut aussi les considérer comme la partie « utile » du coût de non-qualité. Y figurent la formation du personnel à la qualité, la mise en place de procédures, les actions de *gestion des risques*, la qualification des fournisseurs, la maintenance préventive des machines, la conception à l'optimum (Design for Quality), etc. ²⁷. Ce sont des coûts volontaires engagés pour réduire les autres catégories de coûts de non-qualité.

La somme de toutes ces composantes constitue le **coût total de la non-qualité** pour l'entreprise sur une période donnée. Il est souvent très difficile à mesurer précisément, car nombre d'éléments sont diffus ou non traçables directement en comptabilité (par exemple, la perte de crédibilité ou d'image de marque est un coût bien réel mais difficilement chiffrable ²⁸). Néanmoins, on peut tenter de l'estimer via des analyses spécifiques et des indicateurs.

Parmi ces indicateurs, on trouve fréquemment : le *pourcentage de NQC par rapport au chiffre d'affaires* (Coûts de non-qualité / CA × 100), qui donne une idée de l'impact financier global des problèmes de qualité ²⁹ ³⁰. D'autres ratios existent, comme *NQC par rapport à la valeur ajoutée* ou *NQC par employé* ³¹ ³². Par exemple, si une usine a un chiffre d'affaires annuel de 10 M€ et qu'elle estime ses divers coûts de non-qualité à 1,5 M€, alors **NQC/CA = 15 %**, ce qui signale une marge de progression importante. Des entreprises performantes cherchent à réduire ce ratio en dessous de 5 %, voire 1 % dans les industries de classe mondiale.

L'intérêt de mesurer le coût de non-qualité est de **faire prendre conscience de l'enjeu économique de la qualité**. On parle parfois de « *fabrique cachée* » à propos des coûts de non-qualité, car ce sont des ressources gaspillées qui pourraient être évitées et réinvesties utilement ailleurs ²². En quantifiant ces coûts, la direction peut prioriser les projets d'amélioration là où les gains potentiels sont les plus élevés (on utilise par exemple des *diagrammes de Pareto* pour identifier les causes principales de coût de non-qualité et concentrer les efforts sur le « 20 % » causant « 80 % » des coûts ³³).

En somme, le NQC est un indicateur plus *financier* que les précédents (PPM, IPB, FPY) qui sont plutôt techniques. Il traduit la performance qualité en euros sonnants et trébuchants, ce qui parle aux décideurs. L'objectif ultime du management qualité est de minimiser le coût de non-qualité en investissant judicieusement en prévention et en amélioration continue, selon l'adage bien connu : « *La qualité ne coûte pas, elle rapporte* », car chaque euro investi pour éviter un défaut en économise plusieurs en réparations ou pertes ultérieures.

Le rendement au premier passage (First Pass Yield)

Le **Rendement au Premier Passage**, souvent désigné par l'anglicisme *First Pass Yield (FPY)*, est un indicateur qui mesure la qualité d'un processus de production en évaluant la proportion de produits sortis *conformes du premier coup*. En français, on parle aussi de **Taux de conformité du premier coup** ou **Taux de rendement première passe**.

La formule de calcul du FPY est simple :

[
$$FPY = \frac{\text{Nombre d'unités produites conformes du premier coup}}{\text{Nombre total d'unités produites}}$$
]

On l'exprime généralement en pourcentage ³⁴. Par « conforme du premier coup », on entend que le produit a satisfait aux critères de qualité sans nécessité de retouche, de réparation ou de recyclage dans la ligne de production. Ainsi, un FPY de 100 % signifierait que *tous* les produits étaient bons dès la première fabrication, sans aucune non-conformité détectée. À l'inverse, un FPY de 85 % indique que 15 % des unités ont dû être retravaillées ou mises au rebut.

Un exemple permettra d'illustrer : supposons qu'une ligne de production fabrique 100 pièces par jour. Sur ces 100 pièces, 95 passent tous les contrôles qualité du premier coup, tandis que 5 présentent des défauts. Sur ces 5 défectueuses : 4 sont retouchées avec succès et 1 est rebutée. Le FPY se concentre sur le premier passage, donc **FPY = 95 / 100 = 0,95**, soit 95 % ³⁵. Cela signifie que 95 % des pièces

étaient conformes immédiatement. Les 5 % restantes ont nécessité une intervention (et la pièce rebutée est une perte nette). Ce chiffre de 95 % FPY correspond en fait à l'exemple fourni où 91 tôles sur 100 étaient conformes sans retouche, donnant $FPY = 91\%$ ³⁵ .

Le FPY est un indicateur très prisé en production car il combine à la fois une notion de **qualité** et une notion d'**efficacité** du processus. Un faible rendement première passe indique que beaucoup de pièces nécessitent reprises ou sont jetées, ce qui engendre des coûts de non-qualité (main d'œuvre de retouche, temps machine supplémentaire, gâchis de matière) et perturbe le flux de production. Au contraire, un FPY élevé signifie que le process est bien maîtrisé, produisant quasi systématiquement des pièces bonnes du premier coup, synonyme de *fluidité* et de *productivité*.

Les industriels cherchent donc à maximiser le FPY. Des actions typiques pour améliorer le FPY incluent : améliorer la qualité des composants ou matières premières (car de mauvais matériaux augmentent les défauts en aval), assurer une maintenance préventive régulière des équipements pour éviter les dérives de machine, former les opérateurs aux bonnes pratiques, éliminer les causes racines des défauts récurrents, etc. ³⁶ ³⁷ . En somme, travailler sur tout ce qui peut faire que « bien du premier coup » devienne la norme.

Il est intéressant de noter que le FPY peut se décliner à chaque étape du processus ou de la ligne de production. On parle parfois de *FPY étagé* ou de *RTY (Rolled Throughput Yield)* qui est le produit des FPY de chaque étape. Mais de manière simple, le FPY global d'une ligne indique la probabilité qu'une unité traverse tout le processus sans encombre du premier essai.

Dans une optique Lean Six Sigma, le FPY est un indicateur clé car il reflète la capacité du processus à être « *capable* » et sans variabilité excessive. Un FPY bas signale soit un problème de **capabilité du procédé** (il ne tient pas les tolérances), soit un problème de **stabilité** (variations non maîtrisées). Par conséquent, améliorer le FPY va de pair avec la réduction de la variabilité et l'élévation du sigma du processus.

En résumé, le First Pass Yield répond à la question : « *Quelle proportion de nos produits fabriquons-nous correctement du premier coup ?* ». Un suivi attentif de cet indicateur, couplé aux autres KPI (PPM, taux de rebuts, etc.), permet d'évaluer l'efficacité des actions de qualité mises en place et de guider l'amélioration continue. Par exemple, si malgré un FPY modeste les contrôles attrapent tout et qu'in fine le PPM client est excellent, cela indique des coûts cachés de retouche qu'il serait bénéfique de réduire en agissant à la source des problèmes pour augmenter le FPY.

Autres indicateurs qualité : Bien que le PPM, l'IPB, le coût de non-qualité et le FPY soient centraux, il existe de nombreux autres KPI qualité utilisés selon les contextes. Citons rapidement le *taux de satisfaction client* (mesuré via des enquêtes, notant la qualité perçue), le *taux de service* (livraisons conformes et dans les délais), le *TRS* (Taux de Rendement Synthétique des équipements, combinant disponibilité, performance et qualité), ou encore des indices synthétiques internes. L'important est de choisir les indicateurs les plus pertinents vis-à-vis des objectifs opérationnels et stratégiques. Un bon **tableau de bord qualité** croisera souvent plusieurs indicateurs pour fournir une vision équilibrée (par exemple : indicateurs d'efficacité interne comme le FPY, et indicateurs d'efficacité externe comme le PPM client ou le taux de réclamations) ³⁸ .

Le tableau de bord de la qualité

Un **tableau de bord qualité** est un dispositif de pilotage qui regroupe de façon structurée et visuelle l'ensemble des indicateurs clés de la démarche qualité d'une organisation. Il offre une **vue d'ensemble**,

complète et synthétique, de la performance qualité à un instant donné ³⁹. En ce sens, on peut le comparer au tableau de bord d'une voiture qui indique en temps réel au conducteur les paramètres critiques (vitesse, niveau de carburant, température, voyants d'alerte...) afin de guider sa conduite. De même, le tableau de bord qualité informe le *responsable qualité* et la direction sur l'état de santé des processus au regard des objectifs qualité, et les aide à prendre les bonnes décisions.

Les fonctions d'un tableau de bord qualité dans une entreprise industrielle sont multiples ⁴⁰ ⁴¹ :

- **Mesure et évaluation** : Rassembler les données de performance (les KPI) et les présenter de manière lisible permet de comparer les résultats aux objectifs fixés. Par exemple, visualiser chaque mois le PPM réel vs l'objectif PPM, ou le coût de non-qualité cumulé vs le budget, etc. On transforme ainsi des données brutes en informations exploitables « d'un seul coup d'œil » ⁴². Le tableau de bord sert d'outil de *suivi des progrès* ou éventuellement de détection de dérive si un indicateur dépasse un seuil critique.
- **Identification des problèmes** : Avec des indicateurs bien choisis et mis à jour régulièrement, on détecte rapidement les axes qui posent problème. Par exemple, un tableau de bord pourrait faire ressortir un FPY anormalement bas sur une ligne de production particulière, ou une hausse soudaine du taux de réclamations client sur un produit donné ⁴¹. Ces signaux alertent les managers qui peuvent alors enquêter et agir de façon ciblée (méthode des "feux tricolores" : indicateur en rouge = plan d'action requis).
- **Communication et alignement** : Le tableau de bord qualité, partagé au sein de l'organisation, permet de communiquer les priorités et les résultats en matière de qualité. C'est un **outil de management visuel** qui motive les équipes en rendant visibles les améliorations (par exemple, afficher l'évolution du PPM ou du FPY après un projet d'amélioration valorise le travail accompli). Il assure aussi que tout le monde travaille vers les mêmes objectifs en rendant explicite la politique qualité de l'entreprise à travers des métriques concrètes ⁴³.
- **Aide à la décision et amélioration continue** : En fournissant une base factuelle, le tableau de bord éclaire les décisions. Par exemple, décider d'investir dans une nouvelle machine de test peut être étayé par des chiffres montrant un coût de non-qualité important lié aux défauts non détectés à temps. De plus, le tableau de bord s'inscrit dans le cycle d'amélioration continue : il permet de *vérifier* (Check du PDCA) l'efficacité des actions menées, et de réorienter la stratégie si besoin ⁴⁴.

Concevoir un tableau de bord qualité efficace requiert de sélectionner les **indicateurs pertinents** (voir section précédente) et de les présenter de manière claire. Il n'est pas nécessairement très fourni : il vaut mieux peu d'indicateurs mais bien compris, plutôt qu'une myriade de chiffres illisibles ¹⁶. Alain Fernandez, expert en tableaux de bord, recommande de focaliser sur quelques KPI directement liés aux axes de progrès visés, plutôt que de piocher sans discernement dans toutes les métriques disponibles ¹⁵ ¹⁶.

Un bon tableau de bord qualité comportera souvent plusieurs catégories d'indicateurs équilibrées, par exemple : **indicateurs de résultats** (ex: PPM externe, satisfaction client), **indicateurs de processus internes** (ex: FPY, taux de défaut interne, audit process), et **indicateurs de pilotage** (ex: % d'actions correctives closes dans les délais, nombre d'améliorations Kaizen réalisées). Cette approche équilibrée évite de n'optimiser qu'un aspect au détriment des autres.

Sur la forme, le tableau de bord peut prendre la forme d'un **rapport** périodique ou, de plus en plus, d'un écran informatique dynamique (dashboards numériques). L'évolution des outils numériques permet aujourd'hui de réaliser des tableaux de bord *interactifs*, mettant à jour en temps réel les données et offrant des graphiques, jauges, codes couleur pour une interprétation rapide. Dans tous les cas, l'aspect visuel est crucial : des graphiques clairs, des tendances historiques montrées, des seuils d'alerte colorés, rendent le tableau de bord bien plus lisible qu'une liste de nombres brute ⁴⁰.

Enfin, notons que le tableau de bord qualité doit être **rattaché à la stratégie de l'entreprise** et à la politique qualité. Il ne s'agit pas juste de suivre des chiffres pour le plaisir, mais de vérifier si « *la politique qualité de l'entreprise est efficace* ». Par exemple, si la stratégie insiste sur la réduction des retours clients, le tableau de bord doit faire figurer un indicateur comme le taux de retours ou le PPM client, avec une cible claire. En ce sens, c'est un outil de *pilotage stratégique* autant qu'opérationnel.

En résumé, le tableau de bord qualité est un **instrument essentiel en environnement concurrentiel** pour le responsable qualité ⁴⁵. Sans lui, on conduirait la performance un peu à l'aveugle, en cherchant les informations dans des données éparées (« jouer à cache-cache avec les indicateurs » selon le témoignage d'un responsable cité) ⁴⁶. Avec lui, on dispose d'une *boussole* pour guider les actions et naviguer avec assurance vers l'amélioration de la qualité. C'est pourquoi l'ISO 9001 encourage implicitement sa mise en place (sans l'exiger formellement, elle demande le suivi et l'analyse des performances), et qu'on le retrouve dans toute entreprise qui structure sa démarche qualité.

La Business Intelligence (BI) et les outils décisionnels

L'essor des technologies de l'information a profondément transformé la manière de collecter, d'analyser et de visualiser les données de performance dans l'entreprise. En particulier, le domaine de la **Business Intelligence (BI)** – ou *informatique décisionnelle* en français – joue un rôle crucial dans la digitalisation des tableaux de bord et le pilotage par les données (*data-driven management*). Dans cette section, nous présentons d'abord le concept de BI et son fonctionnement général, puis nous zoomons sur l'outil **Power BI** de Microsoft, l'une des plateformes de Business Intelligence les plus utilisées actuellement, notamment pour créer des tableaux de bord interactifs.

Concept et fonctionnement de la Business Intelligence

La *Business Intelligence* désigne l'ensemble des **méthodes, processus et outils** permettant de transformer des données brutes en informations utiles pour appuyer la prise de décision dans l'entreprise ⁴⁷. Concrètement, la BI vise à collecter les données de différentes sources (bases de données opérationnelles, fichiers Excel, ERP, etc.), à les consolider et les structurer (généralement dans des *entrepôts de données* ou *data warehouses*), puis à les analyser et les restituer sous forme de rapports, graphiques, tableaux de bord, afin que les décideurs puissent comprendre la situation et agir en connaissance de cause.

Définition : Selon Talend, « *la Business Intelligence ou informatique décisionnelle est un ensemble de processus, de technologies, de compétences et d'applications utilisés pour transmettre des informations pertinentes aux responsables et managers. Elle vise à analyser des volumes de données considérables stockées dans des data warehouses ou datamarts et les convertir en renseignements exploitables* » ⁴⁷. L'objectif final est de **fournir la bonne information, au bon moment, aux bonnes personnes**, pour faciliter des décisions rapides et éclairées ⁴⁸.

Les **composants typiques** d'une architecture BI incluent :

- Des outils d'**Extraction, Transformation, Chargement (ETL)** qui vont alimenter l'entrepôt de données à partir des sources variées, en assurant la qualité et l'homogénéité des données.
- Un **entrepôt de données (data warehouse)** central ou des *data marts* dédiés, où les données historisées sont organisées (souvent par thèmes : ventes, production, qualité...) et optimisées pour l'analyse.
- Des outils d'**analyse et de reporting** : requêteurs, outils OLAP (analyse multidimensionnelle), outils de data visualisation et de création de tableaux de bord.
- Des interfaces utilisateur (applications BI) par lesquelles les managers peuvent consulter les rapports, naviguer dans les données, et éventuellement effectuer des analyses ad hoc.

Appliquée au domaine de la qualité, la BI va par exemple permettre de **centraliser toutes les données qualité** (mesures de production, résultats de contrôle, indicateurs calculés, retours clients, etc.) dans un référentiel unique, et de construire des analyses plus poussées : tendances de la qualité dans le temps, comparaison entre différentes usines, corrélations entre paramètres de process et taux de défauts, etc. Grâce à ces analyses, l'organisation adopte une démarche *pilotée par la donnée (data-driven)*, ce qui est un des principes de la qualité (décisions fondées sur des preuves tangibles plutôt que sur l'intuition).

La Business Intelligence se matérialise souvent par des **tableaux de bord informatisés** (dashboards), consultables via un navigateur web ou une application dédiée. Ces tableaux de bord BI offrent plusieurs avantages sur les tableaux de bord « manuels » sous Excel : *mise à jour automatique* (dès que les données sources sont rafraîchies, les indicateurs se recalculent), *interactivité* (possibilité de filtrer par période, par produit, de cliquer pour avoir le détail...), et *visualisation avancée* (graphiques dynamiques, alertes visuelles, etc.). En outre, la BI moderne intègre parfois des capacités de *data discovery* (exploration libre des données par l'utilisateur) et même d'*analytics* plus poussées comme la détection d'anomalies ou la prévision.

En somme, la Business Intelligence constitue une surcouche décisionnelle à l'infrastructure informatique : là où les systèmes transactionnels gèrent les opérations (production, ventes, achats...), la BI vient puiser dans leurs données pour fournir une **information agrégée et pertinente** à des fins de pilotage stratégique et tactique ⁴⁸. Aujourd'hui, adopter la BI est quasi indispensable pour les entreprises de taille significative, car le volume de données à traiter dépasse les capacités humaines simples et la réactivité requise impose des systèmes automatisés de reporting.

Power BI : un outil de BI pour la visualisation des données

Microsoft Power BI est une solution logicielle de Business Intelligence développée par Microsoft, réputée pour sa capacité à créer des **rapports interactifs et visualisations de données** de manière conviviale. Lancé commercialement en 2015, Power BI s'est imposé comme l'un des outils leaders sur le marché des plateformes d'analytique et de BI, au point d'être reconnu leader du Magic Quadrant de Gartner depuis de nombreuses années.

D'après la définition de Wikipédia, « *Microsoft Power BI est une solution d'analyse de données de Microsoft. Il permet de créer des visualisations de données personnalisées et interactives avec une interface suffisamment simple pour que les utilisateurs finaux créent leurs propres rapports et tableaux de bord* » ⁴⁹. Techniquement, Power BI est un **ensemble de services et d'applications** qui fonctionnent conjointement pour connecter des sources de données variées, les transformer, et les présenter sous forme visuelle ⁵⁰.

Les composants principaux de Power BI incluent :

- **Power BI Desktop** : application Windows qui sert d'atelier de création de rapports. C'est là que l'analyste connecte les données, construit les modèles, crée les graphiques et organise le tableau de bord.
- **Le service Power BI (Power BI Service)** : plateforme en ligne (cloud) où les rapports peuvent être publiés, partagés et consultés via un navigateur. C'est également là que s'effectue la mise à jour planifiée des données.
- **Power BI Mobile** : applications mobiles (iOS, Android) pour consulter les tableaux de bord sur smartphone ou tablette.
- **Passerelles Power BI** : modules à installer sur site pour assurer la liaison sécurisée entre les données locales de l'entreprise (bases SQL, fichiers locaux) et le service cloud Power BI, permettant des actualisations automatiques.
- **Power BI Embedded** : service pour intégrer les visualisations Power BI dans des applications tierces.

L'un des points forts de Power BI est sa capacité à se connecter à une multitude de **sources de données** : fichiers Excel, bases de données SQL Server, Oracle, SAP, mais aussi des services cloud (Azure, SharePoint, etc.) et même des API web. Il offre un moteur de préparation des données (Power Query) pour nettoyer et transformer les données avant analyse. Ensuite, on peut modéliser les données, créer des mesures calculées (via le langage DAX), et enfin concevoir des visuels. Power BI fournit de nombreux visuels standard (graphiques barres, courbes, camemberts, tableaux, jauges...) et permet d'en ajouter d'autres via sa place de marché de visuels personnalisés ⁵¹.

Pour l'utilisateur final, l'expérience est assez intuitive : on interagit avec des tableaux de bord *dynamiques*. Par exemple, en cliquant sur un segment d'un graphique, on peut filtrer tout le rapport pour n'afficher que les données correspondantes. On peut aussi avoir des *segments de filtre* (par date, par usine, par produit) pour affiner l'affichage. L'interface est conçue pour être utilisable même par des non-informaticiens, ce qui démocratise l'accès à l'analyse de données dans l'entreprise ⁵².

Dans le contexte de la qualité, Power BI peut être utilisé pour créer un **tableau de bord qualité digital**. On pourra y voir en temps réel les KPI tels que le PPM, le FPY, etc., avec des graphiques montrant l'évolution mensuelle, des comparaisons entre ateliers, des diagrammes de Pareto des défauts, etc. Grâce à la connectivité, ces données peuvent être rafraîchies automatiquement chaque jour ou même instantanément si l'infrastructure le permet. On peut imaginer une salle de pilotage qualité affichant sur grand écran un *dashboard Power BI* où les voyants passent au vert ou rouge selon les indicateurs atteints, offrant ainsi un **pilotage visuel en temps réel**.

Power BI offre par ailleurs des fonctions de collaboration utiles : commentaires sur les rapports, abonnements mail pour envoyer automatiquement un tableau de bord chaque semaine, export PDF/PPT, intégration avec Teams ou SharePoint pour partager l'information dans les flux de travail existants ⁵³.

En résumé, **Power BI facilite la création et le partage des tableaux de bord** en rendant la donnée vivante. Selon la description de Microsoft, c'est « *une plateforme unifiée pour la visualisation des données* », permettant de *connecter, transformer et visualiser* les données très simplement ⁵⁰. Son ergonomie permet aux décideurs de manipuler directement l'information sans toujours dépendre du service informatique ⁵². C'est donc un outil précieux dans une démarche de transformation digitale de la fonction qualité, car il outille le responsable qualité d'un système d'information de pilotage puissant, relié aux données de l'entreprise, et apte à fournir des **analyses en un clic**.

Digitalisation, Qualité 4.0 et automatisation de la décision

Les progrès technologiques récents – souvent englobés sous l'appellation *Industrie 4.0* – ont ouvert de nouvelles perspectives pour la fonction qualité. On parle aujourd'hui de **digitalisation de la qualité** et de **Qualité 4.0** pour décrire l'intégration des technologies numériques avancées dans les pratiques de management de la qualité. Cette section aborde les notions de digitalisation et transformation digitale appliquées à la qualité, le concept émergent de Qualité 4.0, ainsi que le rôle que jouent les outils BI et l'automatisation dans l'aide à la décision en matière de qualité.

Digitalisation et transformation numérique de la qualité

La **digitalisation** (ou *numérisation*) désigne le fait de convertir des processus traditionnellement manuels ou analogiques vers des processus pilotés par les technologies digitales. Dans le contexte de la qualité, cela peut signifier : remplacer des formulaires papier de contrôle par des enregistrements sur tablette, utiliser des capteurs IoT pour suivre automatiquement des paramètres de qualité machine, dématérialiser le système documentaire qualité, etc. La **transformation numérique** (ou *transformation digitale*) va au-delà : c'est l'adoption globale des technologies digitales pour *transformer en profondeur* le fonctionnement de l'organisation, ses modèles opérationnels et parfois son modèle économique. Appliquée à la qualité, la transformation digitale signifie que la fonction qualité repense ses méthodes en s'appuyant massivement sur les données, la connectivité et l'automatisation.

Selon une définition proposée par PwC, la digitalisation ne se réduit pas à l'adoption de technologies, il faut aussi en considérer la **finalité** en termes d'impacts organisationnels et de création de valeur ⁵⁴. Pour la qualité, la finalité est claire : *accroître l'efficacité du management de la qualité, sa réactivité et sa capacité prédictive* grâce aux outils digitaux, tout en améliorant la conformité et en réduisant les coûts de non-qualité. La transformation digitale de la qualité se manifeste par plusieurs évolutions :

- **Captation accrue de données** : avec l'Internet des Objets (IoT), il est désormais possible de capter en continu d'innombrables données de production (température, vibrations, mesures dimensionnelles automatiques, etc.). Ces données alimentent des bases exploitables par la BI ou l'analytics. Par exemple, chaque produit peut embarquer un identifiant (RFID, code-barres) qui permet de tracer son historique exact de production et de contrôle. On parle de *traçabilité numérique totale*.
- **Communication en temps réel et transverse** : les systèmes qualité digitalisés permettent d'alerter instantanément les bonnes personnes en cas de problème (ex: déclenchement automatique d'un email ou d'une notification lorsqu'un défaut critique est détecté sur ligne). De plus, les informations circulent mieux entre départements via des plateformes partagées : la production, la qualité, le maintenance voient les mêmes données mises à jour en temps réel, ce qui *brise les silos*.
- **Automatisation des tâches répétitives** : la digitalisation permet d'automatiser certaines tâches de contrôle ou de reporting. Par exemple, un *MES (Manufacturing Execution System)* peut automatiquement bloquer une machine et générer un rapport de non-conformité dès qu'une mesure hors tolérance est lue, sans intervention humaine. Ou bien un logiciel peut compiler chaque nuit les indicateurs qualité de la veille et les mettre à disposition dans un tableau de bord BI à jour le matin, éliminant le travail manuel de consolidation de données.
- **Outils collaboratifs et mobilité** : les applications qualité modernes offrent des tableaux de bord accessibles sur mobile, des workflows de traitement des problèmes intégrés (par exemple, un

QR code scanné sur une pièce défectueuse ouvre un formulaire numérique d'enregistrement de l'incident, assigné automatiquement à un responsable, avec suivi de résolution). Ceci augmente la réactivité et la rigueur du traitement des non-conformités.

En somme, la **qualité digitalisée** vise une **gestion en temps réel et pro-active**. Là où historiquement on constatait les problèmes a posteriori dans des rapports papier, la transformation numérique fait tendre la qualité vers un système nerveux : capter – transmettre – réagir instantanément. Un autre aspect clé est l'exploitation des **données historiques** accumulées, via des analyses avancées, pour identifier des tendances ou des causes invisibles à l'œil nu. C'est ce qui mène au concept de *Qualité 4.0*.

La Qualité 4.0

Par analogie avec *Industrie 4.0* (la « quatrième révolution industrielle » intégrant automatisation, IoT, données massives et intelligence artificielle), on appelle **Qualité 4.0** l'évolution de la fonction qualité grâce à ces mêmes technologies. En termes simples, « *la Qualité 4.0, c'est l'intégration des nouvelles technologies (IoT, IA, Big Data, automatisation) au cœur des processus qualité* » ⁵⁵ .

Concrètement, la Qualité 4.0 se caractérise par plusieurs axes technologiques appliqués à la qualité :

- **Connectivité et IoT** : Les équipements de production, instruments de mesure et même les produits eux-mêmes deviennent connectés. Ils remontent des données en continu vers des systèmes d'information. Cela permet un suivi en temps réel de la qualité. Par exemple, une machine-outil connectée peut envoyer chaque pièce mesurée dans une base de données qualité ; si une dérive est détectée, un système de contrôle peut ajuster automatiquement la machine ou alerter un technicien. L'IoT assure également une **traçabilité fine** : chaque produit peut être suivi individuellement tout au long de sa vie (utile en cas de rappel ou d'analyse de panne sur le terrain).
- **Big Data et cloud** : La qualité 4.0 implique de gérer des volumes massifs de données (mesures capteurs, logs machines, données clients, etc.). Les technologies Big Data et cloud computing offrent le stockage et la puissance de calcul nécessaires pour analyser ces données. Par exemple, agréger des millions de mesures dimensionnelles pour calculer des tendances de dérive ou corrélérer avec les lots de matière première. Le *cloud* permet de centraliser ces données et d'y appliquer des algorithmes intensifs.
- **Intelligence Artificielle et Machine Learning** : C'est un pivot de la Qualité 4.0 (voir section suivante). Les algorithmes de machine learning peuvent détecter des motifs complexes dans les données, invisibles à l'œil humain, et ainsi **prédire les problèmes de qualité** avant qu'ils ne surviennent. On passe d'une qualité réactive à une qualité *prédictive*. Par exemple, un modèle IA peut apprendre à partir des historiques que lorsque telle combinaison de paramètres de process se produit, le risque de défaut augmente de 80 % – il peut alors émettre une alerte préventive pour ajuster le process. L'IA peut aussi être utilisée en vision industrielle pour l'inspection automatique de pièces, surpassant parfois les contrôles humains en vitesse et en fiabilité.
- **Automatisation et robotisation** : La Qualité 4.0 s'appuie sur la robotisation des contrôles (bras robotisés pour tester des échantillons, drones pour inspecter des infrastructures...), sur des systèmes autonomes qui s'auto-règlent en fonction des mesures qualité (par exemple des fours pilotés automatiquement pour rester dans des plages optimales), et sur la généralisation des *poka-yoke* numériques (dispositifs anti-erreur intégrés). L'objectif est de réduire l'erreur humaine et de rendre le système **auto-adaptatif**.

- **Intégration horizontale et verticale** : La Qualité 4.0 connecte entre eux les différents systèmes d'information (ERP, MES, LIMS de laboratoire, PLM de conception...) pour avoir une vision qualité unifiée. Elle intègre aussi la qualité dans toute la chaîne de valeur, y compris chez les fournisseurs et dans l'usage client (on parle de *feedback loop* en boucle fermée). Par exemple, les données de performance en service (pannes, retours) sont rapatriées et analysées pour améliorer la conception future des produits.

Les bénéfices attendus de la Qualité 4.0 sont une **amélioration globale de la maîtrise de la qualité** : moins de défauts (car anticipés et évités), une réactivité accrue (détection instantanée et interventions rapides), une vision plus complète (grâce aux données massives) et in fine une satisfaction client améliorée. Cela ne remplace pas les principes de base de la qualité, mais les amplifie. Par exemple, on fait toujours du PDCA, mais avec des outils 4.0 on peut passer les boucles beaucoup plus vite et avec plus de données objectives.

Il faut noter que la Qualité 4.0 requiert aussi un aspect *humain* : les professionnels de la qualité doivent acquérir de nouvelles compétences (analyse de données, compréhension des algorithmes, gestion de projets digitaux). La culture d'entreprise doit évoluer pour faire confiance aux données et aux systèmes automatisés. Il y a aussi des défis en termes de **fiabilité des données** (garbage in, garbage out – la qualité des analyses dépendra de la qualité des données collectées) et de sécurité (cybersécurité des systèmes industriels connectés).

En résumé, la Qualité 4.0 est la rencontre de la tradition de la qualité (démarche rigoureuse, méthodes structurées) avec les technologies de l'Industrie 4.0. C'est un tournant majeur pour la fonction qualité dans l'industrie moderne, permettant d'aller vers une qualité *intelligente et connectée* de bout en bout

56 .

Rôle de la BI et de l'automatisation dans l'aide à la décision

Dans cette transformation digitale de la qualité, les outils de **Business Intelligence (BI)** et plus largement l'**automatisation** jouent un rôle central pour l'**aide à la décision**. En effet, face à la masse de données générées (par les capteurs IoT, par les systèmes transactionnels, par les retours clients, etc.), il est impensable de s'en remettre à des analyses manuelles classiques. La BI et l'analytics deviennent les « yeux » et le « cerveau » du système qualité digital.

BI pour la visualisation et le monitoring : Comme évoqué, les tableaux de bord BI (tels que Power BI) permettent de suivre en temps réel les indicateurs et de naviguer dans les données. Ils deviennent le poste de pilotage du responsable qualité. Dans un contexte Qualité 4.0, ces tableaux de bord peuvent être enrichis de données en provenance directe des machines (via des API ou des data lakes). Par exemple, un dashboard peut afficher en direct le nombre de pièces produites depuis minuit et le nombre de non-conformités détectées, avec comparaison instantanée aux seuils. La BI offre également la possibilité de **croiser des données hétérogènes** : par exemple, corrélérer des données de production (vitesses, températures) avec les résultats de contrôle qualité, pour identifier quel paramètre influence tel défaut. Ce type d'analyse décisionnelle guide les ingénieurs dans leurs décisions (doit-on abaisser telle température de consigne pour réduire le taux de rebuts ? etc.).

Automatisation des alertes et des actions : L'un des apports du numérique est de pouvoir configurer des *alertes automatiques*. Un système BI couplé à l'atelier peut envoyer un e-mail/sms ou afficher une alerte dès qu'un KPI dépasse un certain seuil (par ex, un PPM interne journalier qui franchit un seuil critique). Mieux, on peut automatiser des **actions correctives** immédiates : par exemple, si le taux de défauts sur une machine dépasse X%, un ordre de maintenance préventive est automatiquement généré dans le système de GMAO (Gestion de maintenance). On parle ici de *pilotage en boucle fermée*.

Aide à la décision par l'IA : De plus en plus, l'aide à la décision passe par l'**intelligence artificielle** intégrée aux outils BI ou MES. Par exemple, certains logiciels BI proposent des fonctionnalités d'analyses automatiques des causes (exploration de corrélations, détection d'anomalies) et peuvent formuler des insights du type : « *l'augmentation du taux de défauts est statistiquement liée à tel fournisseur ou tel lot de matière* ». Ces systèmes basés sur les données accélèrent le travail d'analyse que le décideur aurait mis beaucoup de temps à réaliser manuellement. Finalement, la décision reste humaine (par ex : arrêter d'utiliser ce fournisseur), mais elle a été *assistée* par l'automatisation de l'analyse.

Qualité 4.0 et décision proactive : On passe grâce à tout cela d'une posture réactive (agir après coup) à une posture proactive/prédictive. L'aide à la décision consiste de plus en plus à *prévenir* les problèmes plutôt qu'à les corriger. Les décisions peuvent être prises plus tôt dans le cycle (par ex, ajuster un process en amont dès qu'un signe de dérive apparaît, avant même de produire du rebut).

En définitive, le couple *BI + automatisation* outille la **gouvernance de la qualité** dans l'entreprise digitale. On peut imaginer un futur proche où, dans une usine « intelligente », un grand nombre de micro-décisions seront prises automatiquement par le système (réglages machines, tri automatique, etc.), tandis que les humains superviseront via des tableaux de bord consolidant ces informations et n'interviendront que pour les décisions stratégiques ou non programmables. Nous n'en sommes qu'aux prémices, mais les effets se font déjà sentir : plus de données et d'analyses disponibles conduisent à des décisions plus rapides et plus précises ⁵⁷ .

Approches prédictives et Machine Learning pour la qualité

Pour conclure ce chapitre théorique, il est important d'introduire les méthodes de **prédiction** et l'utilisation du **Machine Learning** (apprentissage automatique) appliquées à la qualité, qui constituent l'un des aspects les plus innovants de la Qualité 4.0. L'idée générale est de tirer parti des données massives collectées et des algorithmes intelligents pour *anticiper* les problèmes de qualité plutôt que de simplement les subir ou les constater a posteriori. On parle souvent de **qualité prédictive** (*predictive quality* en anglais) ou de **contrôle qualité prédictif**.

Qualité prédictive – définition : C'est une approche avancée du management de la qualité qui utilise des techniques d'analyse de données, de modélisation statistique et de machine learning pour **prédire les défauts ou dérives de processus avant qu'ils ne se produisent**, de sorte à pouvoir prendre des mesures préventives ^{58 59} . Autrement dit, on passe d'une qualité réactive (détecter et corriger les défauts) à une qualité pro-active (prédire et empêcher les défauts).

Plusieurs applications du Machine Learning en qualité se dessinent :

- **Maintenance prédictive des équipements :** Un équipement en mauvais état est une cause fréquente de non-qualité (pannes, fabrications hors tolérances, etc.). Le machine learning permet d'analyser les signaux machines (bruit, courant, température...) pour prédire une panne ou une dérive. En anticipant, on entretient la machine juste à temps, évitant qu'elle ne produise des pièces défectueuses. Cette approche est un volet de la qualité car elle assure la capacité du procédé à rester dans le vert.
- **Prédiction des défauts de production :** En collectant les données de procédé (réglages, conditions environnementales, caractéristiques matières, etc.) et en les croisant avec les résultats qualité (pièce OK vs NOK), on peut entraîner des modèles de classification ou de régression qui **prédisent la qualité d'une pièce** en fonction des paramètres. Par exemple, un algorithme pourrait prédire l'occurrence d'un défaut de soudure en fonction de la température,

de la vitesse de soudage et de l'humidité ambiante. Si la probabilité de défaut calculée dépasse un seuil, le système peut ajuster la vitesse ou alerter l'opérateur, évitant que le défaut ne survienne réellement ⁶⁰. Des études ont montré la viabilité de tels modèles de machine learning pour prédire la conformité produit à partir de données process ⁶¹.

- **Détection d'anomalies en temps réel** : Des algorithmes non supervisés peuvent apprendre le comportement « normal » d'un processus (profil de capteurs, distribution de mesures...) et signaler toute *anomalie* sortant de l'ordinaire, qui pourrait être le signe d'un problème naissant. Par exemple, une dérive lente mais continue d'une dimension critique pourrait passer inaperçue aux contrôles individuels, mais un algorithme d'anomalie sur la série de mesures la repérera et la signalera avant que la pièce ne devienne hors tolérance.
- **Prédiction de la satisfaction client ou de la fiabilité** : Au-delà de la production, le ML peut servir à prédire des indicateurs qualité plus larges, comme le risque qu'un client fasse une réclamation (via des modèles utilisant les données de service, de usage produit) ou la durée de vie restante d'un composant (modèles de survie basés sur les données terrain). Cela permet d'agir, par exemple en rappelant préventivement un lot de produits avant qu'ils ne tombent en panne massivement.

La mise en œuvre du Machine Learning en qualité suit généralement une méthodologie : *collecte de données historiques, préparation des données, choix et entraînement d'un modèle* (régression, arbre de décision, réseau de neurones...), *évaluation de la précision*, puis *déploiement* dans l'environnement opérationnel. Un indicateur souvent utilisé est la **précision de prédiction**, qui mesure la fiabilité du modèle à prédire correctement la qualité ⁶². Un bon modèle de prédiction de défaut pourrait atteindre par exemple 90% de précision, ce qui est précieux mais implique aussi 10% d'erreurs (faux positifs ou faux négatifs) qu'il faut gérer prudemment dans la prise de décision.

Les bénéfices potentiels de la qualité prédictive sont énormes : *réduction drastique des rebuts et retouches* (car on évite de produire du non conforme), *amélioration continue plus rapide* (on comprend mieux les facteurs influents de la qualité grâce aux modèles), *satisfaction client accrue* (moins de défauts livrés, plus de fiabilité). Pecan AI résume cela en disant que le contrôle qualité prédictif peut réduire les défauts, améliorer la constance des produits et in fine booster la satisfaction client ⁶⁰.

Cependant, il existe des défis à surmonter : disposer de suffisamment de **données de qualité** (il faut des données représentatives des situations défectueuses, ce qui n'est pas toujours le cas si les défauts sont rares), assurer la **pérennité des modèles** (ils peuvent perdre en efficacité si le processus change – on parle de *dérive du modèle* lorsque ses prédictions se dégradent parce que la réalité évolue ⁶³), et convaincre les équipes de faire confiance aux recommandations de l'IA (nécessité d'explicabilité des modèles dans certains cas, pour comprendre *pourquoi* telle prédiction est faite).

Malgré ces défis, de nombreuses entreprises industrielles explorent activement ces solutions prédictives. On peut citer l'exemple de fabricants automobiles utilisant le ML pour anticiper les défauts de peinture en analysant température/humidité/viscosité, ou de l'électronique où l'IA contrôle la qualité visuelle des circuits imprimés.

En conclusion, l'intégration du Machine Learning dans la démarche qualité représente une extension naturelle de l'amélioration continue vers l'**amélioration anticipative**. Elle concrétise la vision d'une qualité 4.0 où, grâce aux données et à l'intelligence artificielle, l'entreprise peut non seulement *faire face* aux problèmes de qualité, mais de plus en plus *prendre de l'avance* sur eux. C'est un domaine en plein développement, soutenu par les progrès rapides de l'IA, et qui promet de redéfinir dans les années à

venir la façon dont on garantit la qualité dans les systèmes de production. Les chapitres suivants du mémoire aborderont la mise en pratique de ces concepts au sein de l'entreprise LEONI Tunis – Mateur Nord, à travers le développement d'un dashboard KPI qualité intégrant ces dimensions de digitalisation et de pilotage intelligent de la performance qualité.

Sources citées :

- 【12】 Wikipédia – *Partie par million (qualité)* 64
- 【17】 Akwel Automotive – *Customer Specific Requirements* (formule IPB) 19
- 【18】 Scribd – *Non Quality Costs* (données sur coûts de non-qualité) 22
- 【24】 Wikipédia – *Qualité Totale (TQM)* 1
- 【25】 Qualitéperformance.org – *Lexique Zéro Défaut* 4
- 【32】 Formation-continue.collegedeparis.fr – *La méthode 5S* 6 7
- 【34】 Strategik – *Comprendre l'approche processus* 8
- 【39】 Kaizen.com – *Comprendre l'amélioration continue (PDCA)* 12 13
- 【43】 Tulip.co – *Rendement au premier passage (FPY)* 65 35
- 【47】 CQO at Work – *Tableau de bord qualité efficace* 40 41
- 【50】 Talend – *Guide complet de la Business Intelligence* 47 48
- 【53】 Wikipédia – *Microsoft Power BI* 49
- 【54】 Wikipédia – *Microsoft Power BI (fonctionnalités)* 50 66
- 【59】 Pecan AI – *Unlocking Predictive Quality Control* 58 59
- 【60】 LinkedIn Post – *Patrick C., Qualité 4.0 définition* 55

1 2 **Qualité totale — Wikipédia**
https://fr.wikipedia.org/wiki/Qualit%C3%A9_totale

3 **Zéro défaut (théorie) - Wikipédia**
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Z%C3%A9ro_d%C3%A9faut_\(th%C3%A9orie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Z%C3%A9ro_d%C3%A9faut_(th%C3%A9orie))

4 5 **Zéro défaut | Qualité performance**
<https://www.qualiteperformance.org/lexique/zero-defaut>

6 7 **La méthode 5S pour être efficace et productif dans son organisation**
<https://formation-continue.collegedeparis.fr/actualites/la-methode-5s-pour-etre-efficace-et-productif>

8 9 10 **Comprendre l'Approche Processus**

<https://www.strategik.net/blog-iso-9001/comprendre-approche-processus/>

11 12 13 14 **Comprendre l'amélioration continue | Article KAIZEN**

<https://kaizen.com/fr/publications/amelioration-continue-excellence-operationnelle/>

15 16 38 42 45 **Tableau de bord qualité - Piloter.org**

<https://www.piloter.org/mesurer/exemples/tableau-de-bord-qualite.htm>

17 64 **Partie par million — Wikipédia**

https://fr.wikipedia.org/wiki/Partie_par_million

18 **La valeur PPM comme indication de l'amélioration du procédé - Minitab**

<https://support.minitab.com/fr-fr/minitab/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/capability-analysis/supporting-topics/capability-metrics/ppm/>

19 **CUSTOMER SPECIFIC REQUIREMENTS**

<https://akwel-automotive.com/wp-content/uploads/2019/03/AKWEL-CUSTOMER-SPECIFIC-REQUIREMENTS.pdf>

20 21 **Stellantis ex-FCA: 10 Must-Know Updates for Automotive Suppliers**

<https://www.automotivequal.com/10-changes-you-need-to-know-when-working-with-stellantis-ex-fca/>

22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 **Non Quality Costs | PDF | Quality (Business) | Quality Management**

<https://www.scribd.com/document/357353065/Non-Quality-Costs>

34 35 36 37 65 **Rendement au premier passage : Prendre des mesures pour améliorer le rendement Tulip**

<https://tulip.co/fr/blog/first-pass-yield-taking-steps-to-improve-throughput/>

39 **Outil 13. Le tableau de bord qualité | Cairn.info**

<https://shs.cairn.info/la-boite-a-outils-de-la-qualite-4e-ed--9782100805976-page-50?lang=fr>

40 41 43 44 46 **Améliorez votre gestion avec un tableau de bord qualité effi**

<https://www.cqo-at-work.com/blog/amelioriez-votre-gestion-avec-un-tableau-de-bord-qualite-efficace>

47 48 57 **Business Intelligence : définition, enjeux et outils | Talend**

<https://www.talend.com/fr/resources/guide-business-intelligence/>

49 50 51 52 66 **Microsoft Power BI — Wikipédia**

https://fr.wikipedia.org/wiki/Microsoft_Power_BI

53 **Qu'est-ce que Power BI ? - Guide du débutant sur ... - DataCamp**

<https://www.datacamp.com/fr/blog/all-about-power-bi>

54 **Vers la qualité 4.0 - Apports croisés de la fonction qualité et de la transformation digitale**

https://parcourscroises.com/uploads/1/119/file/1523973554interclubs%20-%20qualite%204.0_ebook.pdf

55 56 **Industrie 4.0 : technologies, enjeux en entreprise, où en est-on ? | Patrick CANCELLIER**

https://fr.linkedin.com/posts/patrickcancellier_industrie-40-technologies-enjeux-en-entreprise-activity-7262509529743994882-zOqy

58 59 60 **Unlocking the Power of Predictive Quality Control | Pecan AI**

<https://www.pecan.ai/blog/unlocking-predictive-quality-control/>

61 **[PDF] Machine Learning Methods for Quality Prediction in Manufacturing ...**

<https://www.imse.iastate.edu/files/2021/03/SankhyeSidharth-CC.pdf>

62 **What is Prediction Quality and how is it calculated for the different ...**

<https://www.pi.exchange/knowledgehub/what-metrics-are-used-to-calculate-prediction-quality>

63 En route vers le cycle de vie des modèles ! - Quantmetry
<https://www.quantmetry.com/blog/premier-etape-cycle-vie-modeles/>