

# Les PMI-ETI en quête de productivité

La diffusion des technologies  
avancées dans l'industrie

**Vincent Charlet**  
**Matthieu Dussud**

Préface de Nicolas Dufourcq

McKinsey  
& Company



1

---

Les TIC accroissent la productivité  
des firmes depuis 1990

2

---

L'industrie 4.0 et le renouvellement des  
préoccupations autour de la productivité

3

---

L'adoption des technologies 4.0 par les  
PMI-ETI, en France et dans les pays voisins

4

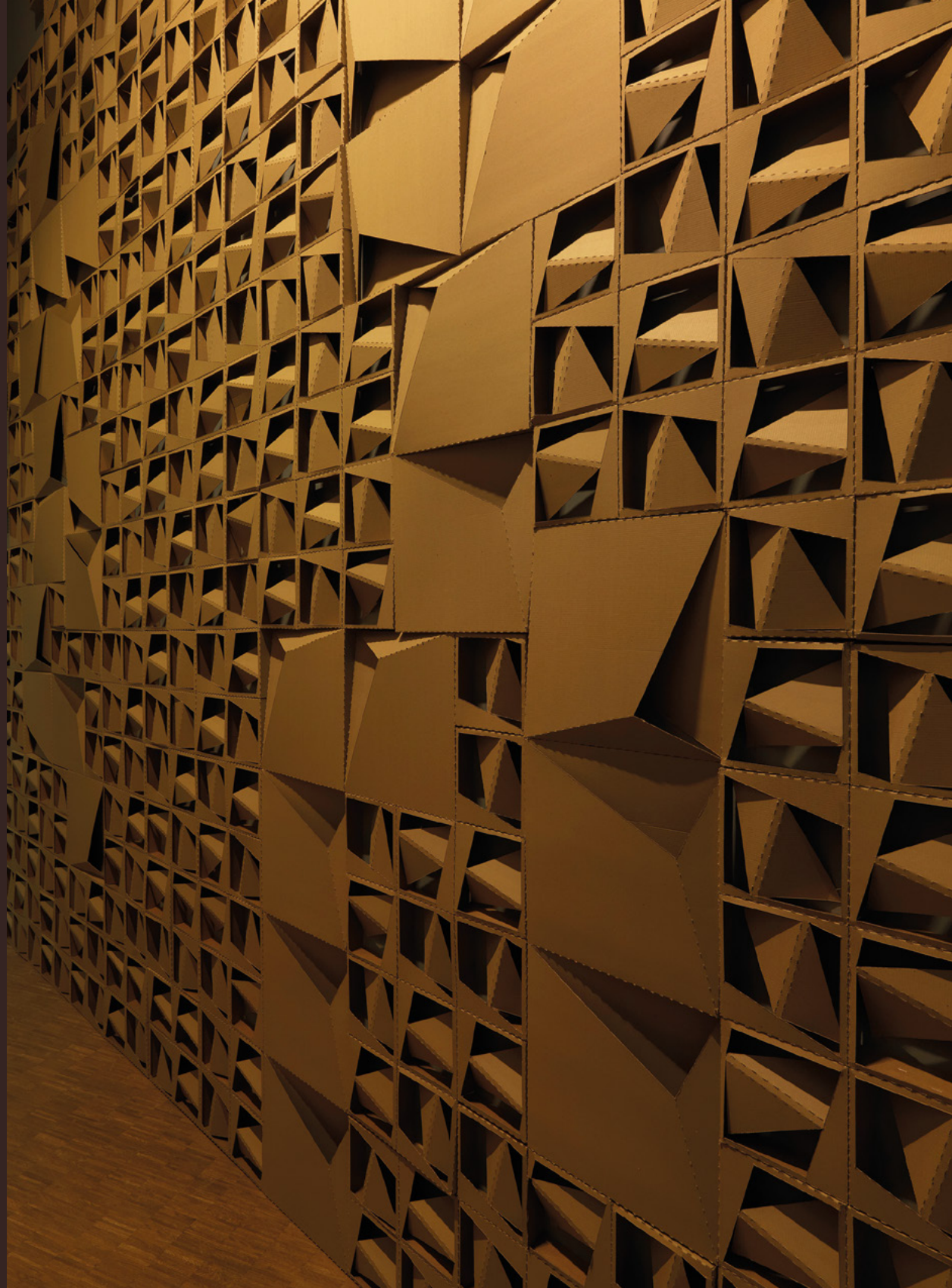
---

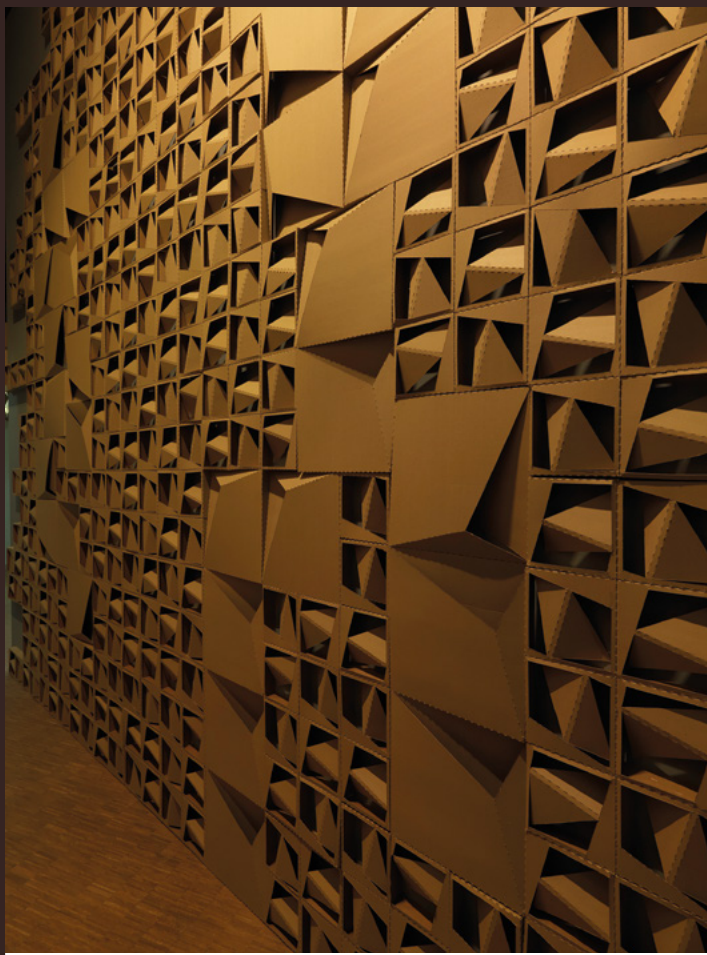
À la recherche des phénomènes à l'œuvre

5

---

Des difficultés supplémentaires pour les PMI





*Les Promesses du passé. Une histoire discontinue  
de l'art dans l'ex-Europe de l'est.*

Exposition au Centre Pompidou, galerie sud, espace 315  
(14 avril 2010 - 19 juillet 2010). MUS201005

Localisation : Paris,  
Centre Pompidou-MNAM/CCI-Bibliothèque Kandinsky  
© Centre Pompidou, MNAM-CCI Bibliothèque Kandinsky,  
Dist. GrandPalaisRmn / Georges Meguerditchian

# Les PMI-ETI en quête de productivité

La diffusion des technologies  
avancées dans l'industrie

Vincent Charlet  
Matthieu Dussud



Les Notes de La Fabrique

# Les PMI-ETI en quête de productivité

La diffusion des technologies  
avancées dans l'industrie

Vincent Charlet  
Matthieu Dussud

Les Notes de La Fabrique

La collection des *Notes* de La Fabrique rassemble des contributions écrites aux principaux débats en cours : emploi et dialogue social, compétitivité, comparaisons internationales...

Rédigées par des observateurs et des experts, et parfois avec le concours d'organisations partenaires, les *Notes* s'appuient soit sur une analyse collective préalable (typiquement, un groupe de travail), soit sur une expérience individuelle incontestable. Les *Notes* sont soumises au contrôle des membres du Conseil d'orientation de La Fabrique.

Vincent Charlet, Matthieu Dussud, *Les PMI-ETI en quête de productivité. La diffusion des technologies avancées dans l'industrie*. Les Notes de La Fabrique, Paris, Presses des Mines, 2026.

ISBN: 978-2-38542-807-5  
ISSN: 2495-1706

© La Fabrique de l'industrie  
81, boulevard Saint-Michel 75005 Paris  
info@la-fabrique.fr  
www.la-fabrique.fr

**Direction artistique:** Chloé Laforest  
**Couverture et mise en page:**

Corentin Echivard  
**Direction éditoriale:** Émilie Binois  
**Dépôt légal:** 2026  
Achevé d'imprimer en 2026  
par l'imprimerie Chirat

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et d'exécution réservés pour tous les pays.

# En tête

*Préface*

**D**EPUIS PLUS DE DIX ANS, la question de la productivité hante le débat économique français. Elle revient cycliquement, souvent sous la forme d'un diagnostic sévère, parfois comme un procès à charge contre nos entreprises, notre modèle social ou notre capacité collective à nous transformer. Ce rapport apporte un éclairage bienvenu, rigoureux et nuancé, qui mérite d'être lu avec attention - et surtout d'être pris au sérieux.

Son premier mérite est de rompre avec une idée reçue tenace : non, les entreprises industrielles françaises ne sont pas massivement « en retard » dans l'adoption des technologies numériques et industrielles avancées (les technologies « du futur » ou « 4.0 ») par rapport à leurs voisines européennes. Les comparaisons internationales présentées ici montrent une réalité plus contrastée, parfois même flatteuse. Elles précisent également qu'il faut veiller à ne pas surinterpréter des résultats d'enquête qui, par construction, sont toujours indicatifs à plusieurs points de pourcentage près.

Le deuxième mérite de ce travail est plus important encore : il nous met en garde contre une illusion de confort. Le risque principal auquel l'industrie française fait face n'est pas tant un retard hérité du passé qu'un décrochage possible à moyen terme. Les intentions d'investissement des entreprises françaises apparaissent moins dynamiques que celles de leurs concurrentes, et les signaux d'attentisme sont nombreux parmi les PME et ETI industrielles. Or, dans un monde où les trajectoires technologiques s'accélèrent, l'écart entre pionniers et retardataires surgit souvent brutalement.

C'est là un point fondamental. L'histoire économique montre que les vagues technologiques ne sanctionnent pas d'abord ceux qui partent de loin, mais ceux qui s'arrêtent trop tôt. Les technologies dites « 4.0 » - et plus récemment l'intelligence artificielle - ne récompensent pas seulement l'audace initiale ; elles exigent de la constance, de la profondeur, et une capacité à investir dans la durée. Ce rapport le montre très clairement : l'investissement technologique est un processus cumulatif, indissociable de transformations organisationnelles et de montées en compétences.

En tant que directeur général de Bpifrance, je mesure chaque jour à quel point cette réalité est exigeante pour les entreprises. Investir dans un contexte de volatilité géopolitique, de tensions sur les marges, de transition énergétique et de mutation des compétences n'a rien d'évident. L'attentisme est humain, parfois rationnel à court terme. Mais il devient dangereux lorsqu'il se généralise.

C'est pourquoi le message central de ce rapport doit être entendu : l'effort d'investissement doit s'intensifier, non pas dans une logique de rattrapage paniqué, mais dans une logique d'anticipation stratégique. Les entreprises françaises ont des atouts considérables : des savoir-faire industriels reconnus, une capacité d'ingénierie de haut niveau, des produits de qualité. Mais ces atouts ne produiront leurs effets que si nous continuons à investir, à expérimenter, à transformer.

L'étude insiste à juste titre sur un point souvent mal compris : la technologie ne produit pas de gains de productivité « clés en main ». Les entreprises qui réussissent sont celles qui articulent investissement matériel, transformation des processus et développement des compétences. Ce constat est au cœur de l'action que l'État mène depuis plusieurs années, et à laquelle Bpifrance contribue pleinement.

Heureusement, la France n'est pas restée inactive. Depuis plus d'une décennie, des politiques publiques ambitieuses ont été déployées pour soutenir l'investissement productif et la modernisation industrielle : programmes d'investissements d'avenir, plan France 2030, soutien à la robotisation, à la digitalisation, à l'industrialisation des innovations, accompagnement des transitions écologique et numérique... Ces politiques ont été renforcées, ciblées, adaptées aux réalités des entreprises.

Bpifrance est au cœur de cet écosystème. Chaque année, nous accompagnons des milliers d'entreprises industrielles, de la PME à la grande ETI, par le financement, la garantie, l'investissement en fonds propres, mais aussi par le conseil et l'accompagnement stratégique. Nous avons appris que l'argent seul ne suffit pas. C'est pourquoi nous avons développé des dispositifs d'accompagnement à la transformation, au management de l'innovation, à la montée en compétences, en lien étroit avec les régions et les filières.

Les résultats sont là. De nombreuses entreprises ont franchi un cap, modernisé leurs outils de production, renforcé leur positionnement à l'export, amélioré leur résilience. Mais ce rapport nous rappelle avec force que le chemin n'est pas terminé, et que l'effort doit être poursuivi, amplifié, partagé.

Ce rapport pointe également une spécificité française préoccupante : la proportion d'entreprises qui déclarent ne pas se sentir concernées par certaines technologies est bien plus élevée que chez nos voisins. Ce n'est pas un problème de lucidité individuelle ; c'est un signal collectif. Il nous oblige, pouvoirs publics, institutions financières, acteurs de l'accompagnement, à redoubler d'efforts pédagogiques, à mieux expliquer, à mieux démontrer, à mieux partager les retours d'expérience. La transformation industrielle ne se décrète pas ; elle se construit par la preuve.

La productivité n'est pas une question technocratique. Elle conditionne notre capacité à financer notre modèle social, à réussir la transition écologique, à maintenir une industrie forte sur le territoire, à offrir des emplois qualifiés et attractifs. Investir dans la modernisation industrielle, c'est investir dans la souveraineté économique du pays. Au demeurant, l'IA va actualiser la question de la productivité dans des proportions vertigineuses.

Ce rapport apporte des faits, des analyses, des mises en perspective précieuses. Il ne donne pas de recettes simplistes, et c'est tant mieux. Il appelle à un surcroît d'effort, de lucidité et de constance. C'est un message que je partage pleinement.

À nous désormais - entreprises, État, financeurs publics, partenaires sociaux - de transformer ces enseignements en actions concrètes. Le temps n'est pas à l'autosatisfaction, mais il n'est pas non plus au défaitisme. La France dispose des moyens de réussir sa transformation industrielle. Encore faut-il continuer à investir, aujourd'hui, pour ne pas décrocher demain.

**Nicolas Dufourcq**  
*Directeur général de Bpifrance*

# POUR RÉSUMER

## Synthèse

**V**oilà plus de trente ans que la productivité occupe une place centrale dans le débat économique en France et en Europe. Alors que les technologies numériques franchissent souvent plusieurs générations en une décennie, les gains de productivité ne cessent de ralentir, rendant toujours plus difficiles l'entretien de notre compétitivité extérieure et le maintien d'une croissance à long terme. La crise sanitaire de 2020 puis les chocs successifs liés à l'énergie, aux tensions géopolitiques et aux ruptures d'approvisionnement, ont particulièrement entamé la productivité de l'économie française : après une stagnation prolongée, plus marquée que dans les autres pays, elle semble s'être récemment redressée. Mais cette embellie reste fragile, inégale selon les secteurs, et insuffisante pour répondre aux défis de long terme.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent ouvrage, qui propose d'examiner les dynamiques de diffusion des technologies numériques industrielles avancées, communément regroupées sous le terme d'industrie « 4.0 ». Issu d'un travail conjoint de La Fabrique de l'industrie et de McKinsey, avec le concours d'Ipsos, ce livre s'appuie sur une enquête originale menée

1 200 PME et ETI

européennes interrogées p. 23

auprès d'environ 1 200 PMI et entreprises de taille intermédiaire, en France, en Allemagne et en Italie, concernant leur niveau d'équipement dans 14 technologies 4.0<sup>1</sup>. Il combine une revue approfondie de la littérature économique et des données empiriques inédites, afin de répondre à la question suivante : l'industrie française est-elle dans la course en matière d'équipements numériques, et quels sont les principaux facteurs qui facilitent ou, au contraire, qui freinent leur adoption ?

1— Le cloud, l'analytique avancée, le machine learning, l'IA générative, la réalité virtuelle, la réalité augmentée, la robotique, l'impression 3D, les jumeaux numériques, l'informatique quantique, les *cleantech*, l'Internet des objets, le stockage d'énergie et la cybersécurité.

## Technologies numériques et productivité : un paradoxe seulement en apparence

Le premier chapitre décrit le socle scientifique sur lequel s'appuie cette réflexion. Le contraste entre les progrès rapides de l'informatique et la stagnation de plus en plus marquée des gains de productivité a ouvert un débat au début des années 1990, souvent résumé sous le nom de « paradoxe de Solow ». En réalité, sans doute du fait de la célébrité de son auteur, la formulation de la question (« pourquoi observe-t-on des gains de productivité de plus en plus faibles alors que les technologies numériques se diffusent massivement ? ») a largement surpassé en notoriété les nombreuses réponses qui y ont été depuis apportées. De sorte qu'on ignore parfois qu'il n'y a, en réalité, pas de paradoxe de la productivité.

En réalité, il n'y a pas de

paradoxe de la productivité p. 27

Comme le montre ce chapitre introductif, les études empiriques convergent massivement sur plusieurs points essentiels. D'abord, sans l'ombre d'un doute, les technologies de l'information et de la communication (TIC) ont bien un effet positif sur la productivité des entreprises qui les adoptent. Certes, à l'échelle d'un pays entier, cet effet est un peu différé dans le temps, si bien qu'il aura fallu plusieurs années pour l'observer de manière robuste. Cela étant, il aura été plus rapide et plus important que celui des grandes révolutions technologiques précédentes, à savoir la vapeur puis l'électricité.

En revanche, il est important de retenir que cet effet ne survient pas de manière uniforme ni universelle. D'abord, cet effet est conditionnel : les TIC ne génèrent des gains durables de performance que lorsqu'elles sont combinées à des changements organisationnels (réorganisation des processus, nouvelles formes de coordination) et à une montée en compétences des salariés. On peut même affirmer que la productivité repose non pas sur la technologie seule mais sur ce triptyque : technique, organisation, compétences.

Un triptyque : technique,

organisation et compétences p. 31

Probablement pour cette raison, mais aussi en fonction d'effets cumulatifs propres à la technique elle-même, il en découle que les gains de productivité ne se diffusent pas uniformément dans les entreprises, quand bien même les technologies

*Une dispersion accrue*

**des performances entre entreprises** P. 34

sont *a priori* connues et accessibles par toutes. Les entreprises les mieux organisées, disposant d'un capital humain solide et d'une capacité d'investissement suffisante, ainsi que celles qui se sont engagées de bonne heure dans un processus de modernisation, tirent davantage profit des technologies, tandis que les autres peinent à en capter les bénéfices. Il en résulte une dispersion accrue des performances entre entreprises, au sein de chaque secteur d'activité, phénomène documenté dans les travaux portant sur les écarts de productivité (*productivity gap*).

Par ailleurs, un résultat important de la littérature est que les gains de productivité imputables aux TIC ont été sensiblement plus importants aux États-Unis que dans le reste du monde. Cet écart appelle deux commentaires. D'une part, il est quasiment intégralement imputable au secteur tertiaire : si les industries américaine et européenne ont suivi des trajectoires de productivité relativement comparables, il n'en va pas de

*Les États-Unis loin devant*

**dans le secteur tertiaire** P. 33

même du secteur des services, dont les gains de productivité ont été beaucoup plus rapides aux États-Unis. D'autre part, l'analyse des filiales européennes d'entreprises américaines démontre que ces dernières ont fait preuve d'un talent particulier – et notamment d'une meilleure performance organisationnelle – pour tirer parti de ces technologies en matière de productivité.

### Un débat réalimenté par la mobilisation mondiale en faveur de l'industrie « 4.0 »

Le deuxième chapitre de l'ouvrage s'attarde ensuite sur les technologies regroupées sous l'appellation d'industrie 4.0. Popularisé au début des années 2010, ce concept initialement forgé en Allemagne renvoie à l'intégration accrue du numérique dans les processus industriels et notamment dans les machines-outils : automatisation avancée, exploitation des données, interconnexion des machines, simulation et virtualisation des systèmes productifs.

Sa formalisation repose sur un double postulat. D'une part, l'exploitation des données produites par ces machines lors des phases de production et d'acheminement devrait permettre des gains substantiels de productivité. D'autre part, si les industriels ne s'emparent pas d'urgence de cette opportunité, ce sont leurs offreurs de services numériques (donc les GAFAM, pour simplifier) qui vont rapidement en capter la valeur, peut-être aussi en s'interposant entre les producteurs et leurs clients, un peu à l'image de ce qu'une startup comme Booking a réussi dans le secteur de l'hôtellerie. Les industriels allemands ont donc su convaincre leur gouvernement de lancer un vaste programme de soutien à l'investissement, sous le nom d'*Industrie 4.0*, gouvernement rapidement imité par ses homologues de l'OCDE.

Parmi les technologies faisant partie de ce « bouquet » de l'industrie du futur (appellation française de l'*Industrie 4.0* allemande), et étudiées dans la présente enquête, figurent notamment le *cloud computing*, l'analyse de données et l'intelligence artificielle, la robotique avancée, la fabrication additive, l'Internet des objets, les jumeaux numériques, la réalité virtuelle et augmen-

*Un concept né*

**en Allemagne en 2011** P. 38

tée, ainsi que les technologies de cybersécurité et d'efficacité énergétique. Chacune de ces technologies porte des promesses d'amélioration de la productivité : amélioration de la qualité, réduction des coûts, flexibilité accrue, personnalisation de la production, meilleure anticipation des pannes ou des besoins clients.

L'industrie 4.0 a fait la preuve de son utilité, en matière de productivité des entreprises, à peu près dans les mêmes termes et de la même manière que l'informatique avant elle. Si ses effets ont mis quelques années avant d'être observables, ils ne font aujourd'hui plus de doute. En particulier, ces technologies permettent aux entreprises de tirer un meilleur parti des chaînes de valeur dans lesquelles elles s'insèrent, de gérer de plus vastes gammes de produits et de services sans être pénalisées par le coût de cette complexité, etc. Par ailleurs, ses effets sont, comme pour le reste des TIC, cumulatifs et dépendants des choix organisationnels des entreprises. Il en résulte en particulier que l'accès aux technologies et à ses bénéfices en matière de productivité est généralement plus difficile pour les PMI que pour les plus grandes entreprises.

On peut craindre que les différentes crises des années 2020, respectivement du Covid puis des approvisionnements et de l'énergie, aient obéré la mobilisation autour de l'industrie du futur, du moins en Europe. En effet, le concept semble avoir perdu en popularité, et les politiques publiques associées ont pu être remplacées par des plans de relance et de sauvegarde de l'économie à plus faible visée technologique. On observe d'ailleurs en Allemagne des signes de désinvestissement dans le « 4.0 » de la part des entreprises. C'est pourquoi cet ouvrage propose un point d'étape sur ce sujet.

*Des indices récents de*

**désinvestissement en Allemagne** p. 44

### Une enquête comparative inédite menée auprès des PMI et ETI industrielles

Le cœur de cet ouvrage repose sur une enquête de grande ampleur menée en 2025 auprès de 1 198 entreprises industrielles de 10 à 5 000 salariés, en France, en Allemagne et en Italie. Quatorze technologies ont été analysées, regroupées en trois grandes familles : les technologies liées aux données et au calcul (cloud, analytique avancée, *machine learning*, IA générative), les technologies d'optimisation des processus productifs (réalité virtuelle, réalité augmentée, robotique, impression 3D, jumeaux numériques) et les technologies transverses (informatique quantique, *cleantech*, Internet des objets, stockage d'énergie et cybersécurité).

Les résultats montrent d'abord que l'adoption des technologies 4.0 reste limitée dans l'ensemble. À l'exception du cloud et de la cybersécurité, largement diffusés, la plupart de ces technologies avancées ne concernent qu'une minorité d'entreprises industrielles. L'intelligence artificielle générative, la réalité virtuelle ou encore les jumeaux numériques demeurent ainsi relativement peu répandus.

En termes comparatifs, l'enquête montre également que les taux d'adoption sont relativement similaires dans les trois pays étudiés, à technologie donnée. Naturellement, on peut observer au cas par cas des écarts, soit à la faveur soit à la défaveur de la France, mais ces résultats n'accréditent pas l'idée d'un retard généralisé, ni pour la France ni pour ses deux voisins. On peut d'ailleurs étendre ce constat au Royaume-Uni, qui vient de publier des enquêtes analogues et dont les résultats sont repris à titre comparatif.

Il faut noter à ce sujet que cet ouvrage, comme différentes enquêtes internationales comparables dont les résultats sont rappelés, consiste à relever un décompte binaire des entreprises équipées ou non équipées : cet indicateur ne dit donc rien de l'intensité de leur équipement (nombre de machines par unité de chiffre d'affaires, par exemple), ni de son niveau de modernité (âge du parc machine ou niveau de performance des robots...). Cela étant, les comparaisons détaillées dans le rapport montrent que ces résultats sont globalement robustes :

*Des écarts de taux d'équipement*

**à lire avec prudence** p. 54

les niveaux d'équipement des principales industries européennes sont donc assez voisins, du moins pour ce qui concerne les PMI-ETI entre 50 et 5 000 salariés.

Il convient en outre de préciser que, pour la plupart de ces enquêtes, même « lourdes » et coûteuses, il n'est pas rare que les échantillons d'entreprises industrielles, pour un pays ou un secteur donnés, représentent de l'ordre de 200 entreprises : statistiquement, cela entraîne que les réponses obtenues sont le plus souvent significatives à plus ou moins 6 voire 8 points de pourcentage près. Il est donc important de ne pas surinterpréter les écarts observés entre pays, même au sein d'une même enquête.

Les seuls segments technologiques sur lesquels on puisse parler aujourd'hui d'un probable retard français au regard de nos deux voisins sont ceux de l'Internet des objets, des *cleantechs* et du stockage d'énergie. Par ailleurs, notre enquête rapporte une possible avance française en matière d'équipement robotique, mais ce résultat est à interpréter avec précaution compte tenu des réserves méthodologiques rappelées ci-dessus (un rapport équivalent de la BEI aboutit plutôt à une parité d'équipement

*À secteur donné, les PMI-ETI françaises*

**ne sont pas sous-robotisées** p. 63

entre ces trois pays). En tout état de cause, la thèse d'un retard français en matière de robotique, souvent reprise et commentée, ne vaut que lorsqu'on dénombre non pas le

taux d'entreprises équipées mais le nombre de robots installés par salarié. En outre, cet écart entre la France et d'autres pays s'explique essentiellement par un effet de composition : les robots industriels étant installés principalement dans trois secteurs d'activité (la production de biens électroniques, l'automobile et la production de biens d'équipement), c'est parce que ces secteurs d'activité sont faiblement représentés au sein

de l'industrie française que celle-ci, et avec elle toute l'économie française, font apparaître un taux moyen de robots installés par salarié plus faible qu'ailleurs. Il est donc juste d'affirmer que, au sein de l'économie française, les secteurs d'activité les plus robotisés sont faiblement représentés; en revanche, à ce jour, à secteur donné et toutes choses égales par ailleurs, les entreprises françaises ne sont pas sous-robotisées au regard de leurs comparables, moyennant les précautions méthodologiques précédentes.

Cela étant, l'enquête montre aussi que les entreprises françaises se distinguent par des perspectives d'investissement à court ou moyen terme - c'est-à-dire d'ici 12 mois et d'ici 2030 respectivement - nettement plus faibles que les entreprises des deux pays voisins. De sorte que, s'il n'y a pas d'argument solide pour parler aujourd'hui d'un retard des entreprises industrielles françaises en matière d'équipement 4.0, ce rapport met en avant des résultats probants et significatifs laissant indiquer qu'un tel retard pourrait survenir dans les années qui viennent. Dans l'ensemble, que ce soit entre ces trois pays comme entre les différents secteurs d'activité de l'industrie française, les taux d'équipement dans chaque technologie vont plus souvent s'écarter les uns des autres que converger vers des valeurs moyennes. Autrement dit, la diffusion

des technologies indubitablement à l'œuvre, même si - ou puisque - elle s'annonce ralentie en France dans les années qui viennent, s'accompagne

d'un mouvement de dispersion entre entreprises, entre secteurs et entre pays en matière d'équipement. Ce résultat empirique est totalement cohérent avec la littérature recensée à ce jour.

En particulier, dans les deux tiers des technologies étudiées, la probabilité pour une entreprise française d'envisager un investissement d'ici 12 mois est le plus souvent 5 à 10 fois plus faible que pour son équivalente allemande. *A contrario*, la probabilité qu'elle n'envisage aucun investissement avant 2030 est fréquemment 2 à 3 fois plus élevée en France, et parfois nettement plus.

S'agissant des secteurs d'activité, on trouve régulièrement un ou deux secteurs plus avancés que les autres en matière d'équipement pour une technologie donnée. Le secteur pharmaceutique, mais aussi la métallurgie et l'aéronautique, figurent souvent parmi ceux-ci.

*Un déficit d'investissement en France*

à prévoir d'ici à 2030 p. 50

## Des écarts marqués selon la taille de l'entreprise, sa dynamique d'organisation et ses marchés

L'analyse approfondie des données révèle que les disparités entre entreprises, concernant leur niveau d'adoption des technologies aussi bien que leurs projets en la matière, sont régies par plusieurs paramètres.

Le premier est sans doute celui de la taille des entreprises, conformément à ce qui est observé dans la littérature. Quasiment sans exception, dans chacune des 14 technologies étudiées, et aussi bien concernant le taux d'équipement aujourd'hui constaté que les projets d'investissement envisagés à court ou moyen terme, les plus petites entreprises apparaissent systématiquement en retard par rapport aux plus grandes. Pour la plupart des technologies, les entreprises les plus petites (entre 50 et 100 salariés) ont respectivement 2, 3 voire 5, et 10 fois plus de chances que les plus grandes (respectivement entre 100 et 250, entre 250 et 1000 et entre 1000 et 5000 salariés) d'avoir répondu ne pas être équipées et ne pas envisager d'investissement à horizon 2030.

Un deuxième paramètre important est celui de l'existence, avérée ou à l'état de projet, d'un plan de transformation de l'entreprise à des fins d'amélioration de sa performance de production. Là encore, cette observation est conforme à la littérature.

Les taux de réponse que nous obtenons dans l'enquête confirment ce lien à plusieurs titres: les entreprises ayant déjà mené un plan de transformation sont plus équipées que celles qui ne l'ont pas fait, celles qui sont en train de mener un tel plan seront plus nombreuses à s'équiper d'ici douze mois, et celles qui n'envisagent pas de le faire sont surreprésentées parmi celles qui ne seront toujours pas équipées après 2030.

Le troisième paramètre est celui de la nature du marché servi, à commencer par le poids de l'export. Les entreprises qui réalisent la plus grande part de leur chiffre d'affaires sous forme d'exportations affichent systématiquement des taux d'équipement plus élevés ou des projets d'investissement plus fréquents que les autres. On observe un effet similaire, quoiqu'un peu moins net, au sujet des entreprises réalisant une grande part de leur activité au profit du secteur de la défense.

*Trois facteurs clés: la taille,*

**l'organisation et le marché** p. 73

Ces paramètres influençant le taux et les projets d'équipement, ainsi que nous l'avons rapporté, ont une validité quasi universelle : on en trouve des confirmations dans la littérature, et ce dans la plupart des pays. En revanche, notre enquête fait également ressortir deux particularités. D'une part, lorsque les dirigeants d'entreprises sont interrogés spontanément sur les principaux freins qui les empêchent d'investir dans la technologie, ils mentionnent en premier lieu un manque de ressources financières (cette réponse est même deux fois plus fréquente parmi les répondants français que chez leurs homologues allemands et italiens) et un accès difficile aux compétences nécessaires. Pourtant, pour une technologie 4.0 donnée, quand on interroge les entreprises qui disent ne pas souhaiter investir, alors ces deux arguments s'effacent derrière celui de la pertinence : la technologie citée serait superflue au regard de leur activité. C'est un premier paradoxe. La seconde particularité est cette fois spécifiquement française : c'est la forte proportion d'entreprises se déclarant ainsi non concernées par les technologies 4.0. De manière frappante, cette proportion est nettement plus élevée en France que chez nos voisins, et ce dans toutes les technologies étudiées.

On en vient donc à détecter l'existence d'un noyau d'entreprises « réfractaires », c'est-à-dire n'envisageant ni de plan de transformation pour améliorer leur performance ni de projet d'investissement dans les technologies 4.0, plus important

*Les entreprises « non concernées »,*

**une singularité française ?** P. 82

au sein de l'industrie française que chez nos voisins. Cela est à mettre en relation avec le fait que la proportion de dirigeants d'entreprises estimant spontanément « qu'être à la pointe de la technologie apporte un avantage concurrentiel majeur » est plus faible en France ; inversement, ils sont plus nombreux en France à estimer préférable d'attendre qu'une technologie ait fait la preuve de sa valeur et de son impact avant d'investir.

Les causes de ce phénomène restent à étudier, tout particulièrement dans la perspective où seraient envisagées de nouvelles mesures publiques incitatives à l'investissement dans le domaine de l'industrie 4.0.

# Merci

*Les auteurs remercient*

l'ensemble de leurs collègues de La Fabrique de l'industrie, du bureau parisien de McKinsey & Company et d'Ipsos qui ont prêté leur concours à la réalisation de cette enquête, puis à la préparation et à la valorisation du présent ouvrage, qui lui fait suite.

En particulier, Alain Imbert (McKinsey & Company) et Mathieu Gallard (Ipsos) sont intervenus de manière déterminante pour la conception, la conduite et l'interprétation de l'enquête menée auprès de 1 200 entreprises dans trois pays européens. Caroline Granier et Émilie Binois (La Fabrique de l'industrie) ont en outre donné de leur temps et de leur expertise pour assurer la justesse des traitements statistiques des réponses ainsi que la clarté et la cohérence de l'exposé des résultats. Que tous en soient ici très chaleureusement remerciés.

Les auteurs remercient également très sincèrement les entreprises qui se sont prêtées à cette enquête, et les experts sectoriels qui ont accepté d'apporter un regard critique sur les versions préliminaires de ce travail.

## POUR DÉBUTER

## 5 – Préface

## 8 – Synthèse

## 21 – Introduction

## 1

## CHAPITRE

**27 – Les TIC accroissent la productivité des firmes depuis 1990**

De la formulation à la résolution du « paradoxe de la productivité »

— Une efficacité sous condition : la mise au jour de facteurs liés

— Les effets de sélection et de réallocation

## 2

## CHAPITRE

**37 – L'industrie 4.0 et le renouvellement des préoccupations autour de la productivité**

À partir de 2012, l'émergence de l'industrie 4.0

— Cette fois encore, la technologie concourt à la productivité

— Industrie 4.0, emploi et organisation

— Le début de la fin de l'industrie 4.0 en Europe ?

## 3

## CHAPITRE

**47 – L'adoption des technologies 4.0 par les PMI-ETI, en France et dans les pays voisins**

La France et ses voisins : similitudes et disparités

— Le secteur pharmaceutique parmi les mieux équipés

— Un retard des entreprises françaises peu prégnant aujourd'hui, mais prévisible à court terme

— Des choix d'investissement hétérogènes parmi les secteurs d'activité en France

— Focus. Les méthodes de décompte et leur biais

— *Au-delà des incitations financières, proposer un accompagnement à la transformation : l'expérience des centres de compétences allemands de l'Industrie 4.0,* par Elena Prodi

## 4

## CHAPITRE

**73 – À la recherche des phénomènes à l'œuvre**

Les plus petites entreprises sont nettement moins équipées que les autres

— L'investissement dans les technologies 4.0 coïncide étroitement avec les plans de transformation des entreprises

— Les entreprises ouvertes à l'export sont les plus équipées

— *L'impact de la diffusion des technologies avancées sur la productivité et la compétitivité de l'industrie française,* par Daniel Richet

## 5

## CHAPITRE

**95 – Des difficultés supplémentaires pour les PMI**

« Être à la pointe de la technologie apporte un avantage concurrentiel majeur »

— Les contraintes financières à l'investissement

— La difficulté d'accès aux compétences, un obstacle moins important que les précédents

— L'évolution rapide des technologies et la préférence pour l'attentisme

— Technologies propres aux données

— Technologies permettant d'optimiser les processus

Technologies transverses  
— *Tout comme le lean, l'industrie 4.0 passe d'abord par de nouveaux comportements,* par Michael Valentin

# En jeu

Introduction

**D**ANS SON RAPPORT de 2025, le Conseil national de la productivité<sup>2</sup> constate la faiblesse des gains de productivité enregistrés en France, particulièrement depuis la pandémie de Covid. La productivité du travail par tête<sup>3</sup> s'est redressée entre fin 2019 et début 2024 aux États-Unis et dans la zone euro, mais pas en France. De même, la productivité par heure<sup>4</sup> y a baissé, alors qu'elle a augmenté ou est restée relativement stable dans les autres pays.

Il semble, d'après les analyses les plus récentes, que la productivité française a depuis retrouvé son rythme de progression pré-Covid. Celui-ci demeure tout de même relativement faible, sous la barre symbolique de 1% par an<sup>5</sup>. Même si cette difficulté française à renouer avec la productivité est en partie le pendant d'une amélioration du taux d'emploi, il n'en demeure pas moins que notre économie suit, depuis cette pandémie, une trajectoire de croissance plus faible qu'auparavant, ce qui constitue une singularité. Une des manifestations les plus tangibles en est que l'écart de revenu par habitant ne cesse de s'accroître entre la France et les États-Unis (Bunel *et al.*, 2025).

Tous ces faits sont connus, à défaut d'être parfaitement expliqués, et font notamment l'objet de plusieurs observations et recommandations par Mario Draghi dans son célèbre rapport de 2024. Tant le rapport Draghi pour l'économie européenne que celui du CNP pour l'économie française concluent à l'importance de renouer avec l'innovation au sens large, et plus particulièrement avec l'investissement dans des technologies innovantes à même de renforcer la productivité des entreprises qui les adoptent.

2— Voir Valla & Durré (2025). Le CNP a été créé en France en 2018 à la suite d'une recommandation du Conseil de l'Union européenne.

3— Définie par l'Insee comme le rapport entre la valeur ajoutée (autrement dit le PIB, à l'échelle nationale) mesurée en volume et le volume de travail mesuré par le nombre de personnes en emploi (dénombrées en personnes physiques).

4— Définie par l'Insee comme le rapport entre la valeur ajoutée (autrement dit le PIB, à l'échelle nationale) mesurée en volume et le volume de travail mesuré par le nombre d'heures travaillées.

5— Selon Coquet & Heyer (2025), la progression tendancielle des gains de productivité en France était de + 0,9 % par an avant la pandémie. Après plusieurs années d'atonie, elle se serait redressée à + 1,3 % par an depuis début 2023, ce qui reste insuffisant pour avoir atteint fin 2024 son niveau de 2019. Dans l'ensemble, la « panne » française de la productivité autour des années Covid représente un recul de 5 % dont rien n'indique qu'il pourra être rattrapé.

Une hypothèse sous-jacente des auteurs de ces rapports est que les entreprises françaises et européennes ont spontanément tendance à trop peu investir dans ces technologies. C'est la raison pour laquelle ils imaginent volontiers des politiques publiques destinées à les y encourager. Toutefois, ces recommandations sont émises dans un contexte qui rend délicate leur mise en application. Les marges de manœuvre des entreprises sont étroites, ce qui les contraint à procéder à des arbitrages.

Il faut aussi compter avec de nouvelles priorités politiques, perceptibles dans le monde entier. On se souvient que des initiatives en faveur de l'investissement productif ont été prises en France et dans de nombreux pays à partir de 2012, pour encourager les entreprises industrielles des différentes filières à s'engager dans la transition dite de l'industrie 4.0 ou de l'industrie du futur (déploiement de la 5G et de l'Internet des objets, de la réalité virtuelle et augmentée, du machine learning, etc.). Or ces politiques publiques, désignées en France sous l'intitulé de « la nouvelle France industrielle », semblent marquer le pas, du moins en Europe et aux États-Unis. Elles n'ont manifestement pas résisté aux alternances politiques, à la pandémie de Covid et aux mesures prioritaires de relance adoptées pour y répondre, ni enfin au nouveau contexte géopolitique marqué par la montée des tensions internationales et par la crise énergétique européenne, autant d'événements incitant les décideurs à raisonner en termes de souveraineté industrielle dans un monde hostile plutôt qu'en termes de compétitivité dans un monde ouvert.

Il est par exemple saisissant de constater que l'irruption de l'IA générative dans notre quotidien, aussi bien à la maison qu'au bureau, s'accompagne d'une résurgence d'un vieux débat sur le chômage technologique, que l'on peut résumer en une question : « Lesquels de nos emplois risquent d'être remplacés par l'IA ? » L'idée, pourtant attestée dans la littérature économique, que l'adoption accélérée de nouvelles technologies tend à soutenir la croissance et la création de nouveaux emplois a décidément bien du mal à s'implanter dans l'esprit des décideurs, des électeurs et des travailleurs.

Pour toutes ces raisons, la période semble propice à un état des lieux : après avoir rappelé comment et à quelles conditions les TIC apportent des gains de productivité, peut-on dire où en sont les entreprises industrielles françaises, et notamment les entreprises de petite et moyenne taille, en matière d'investissement dans ces différentes technologies de l'industrie du futur ? Dans un monde en constante évolution, les responsables des filières industrielles et les décideurs publics ont régulièrement besoin de disposer d'un décompte fiable, exhaustif et complet sur ce sujet. Or ce relevé de situation n'a pas été effectué en France depuis un certain temps ; et il n'est pas beaucoup plus facile de disposer d'un panorama fiable dans d'autres pays européens.

C'est le propos de cet ouvrage que de rassembler des éléments utiles à cette réflexion. Il découle d'une enquête lancée conjointement par La Fabrique de l'industrie et le bureau parisien de McKinsey & Company, et réalisée par Ipsos auprès de 800 PMI et ETI françaises, 200 allemandes et 200 italiennes dans le courant de l'été 2025. Ces entreprises sont interrogées sur leur niveau d'équipement et leurs motivations concernant quatorze technologies 4.0 : quatre qui concernent l'usage des données (le cloud, l'analytique avancée, le machine learning et l'IA générative), cinq qui ont trait à l'optimisation des processus (la réalité virtuelle, la réalité augmentée, la robotique, l'impression 3D et les jumeaux numériques) et enfin cinq transversales (l'informatique quantique, les *cleantech*, l'Internet des objets, le stockage d'énergie et la cybersécurité).

Cet ensemble de données permet de mieux comprendre les mécanismes à l'œuvre déterminant leur choix d'adopter ou non une technologie, en fonction de paramètres comme leur secteur d'activité, leur histoire, l'efficacité de leur organisation... Cette enquête représente, par son extensivité et la richesse des informations collectées, un matériau inédit pour appréhender le niveau de compétitivité du tissu industriel français, et plus largement ouest européen, et pour mieux envisager les actions à mener ensuite.

Le premier chapitre de cet ouvrage est consacré à une revue de la littérature sur l'adoption des technologies d'information par les entreprises et sur le lien que cela entretient avec l'amélioration de leur productivité. Le deuxième chapitre porte une attention particulière sur les technologies de l'industrie 4.0 à cet égard. Le troisième chapitre propose un regard d'ensemble sur les taux d'adoption des diverses technologies de la part des entreprises, selon les résultats de l'enquête. Le quatrième chapitre explore les différents phénomènes causaux que l'on peut mettre au jour pour expliquer ces taux d'équipement. Le cinquième, enfin, entre dans le détail des résultats propres à chacune de ces technologies et affine ainsi ces premières observations.

**Note au lecteur :** cet ouvrage repose sur



le traitement d'une grande quantité de données, qu'il n'aurait pas été possible de reproduire sans alourdir la lecture de façon dommageable. Le lecteur peut s'y référer en consultant les annexes accessibles par ce QR Code. Toutes les annexes appelées dans le présent ouvrage peuvent être consultées dans ce fichier.



Chapitre

## Les TIC accroissent la productivité des firmes depuis 1990

*Dans un article célèbre datant de 1987, le Prix Nobel Robert Solow a ouvert un champ de recherche en économie sur le décalage alors jugé « paradoxal » entre les investissements privés dans les TIC et le ralentissement continu des gains de productivité dans les données macroéconomiques. Avec le recul, on peut affirmer que ce paradoxe n'en est pas un. Les TIC concourent à la productivité des entreprises, mais sous certaines conditions et de manière hétérogène.*

### DE LA FORMULATION À LA RÉOLUTION DU « PARADOXE DE LA PRODUCTIVITÉ »

Cela fait près de quarante ans que la recherche en économie travaille à comprendre et à documenter le lien entre l'investissement des entreprises en technologies de l'information et de la communication (TIC) et leur productivité. La première réponse positive et convaincante à cette question est apportée en 1993 par Brynjolfsson & Hitt (1993, 1996) : en étudiant 367 grandes entreprises entre 1987 et 1991, les auteurs montrent que leurs investissements en TIC ont eu un effet positif et significatif sur leur productivité. Plus

précisément, le produit marginal du capital informatique constaté atteint 81%, en moyenne sur l'échantillon, ce qui est supérieur ou égal au produit marginal des autres formes de capital<sup>6</sup>. De même, les dépenses en salaires relatives aux systèmes d'information sont au moins aussi productives que les autres. Ce travail marque la première réponse empirique à ce qui était appelé jusque-là « paradoxe de la productivité » ou encore « paradoxe de Solow », formulé par son auteur six ans plus tôt (cf. encadré).

Reste alors à expliquer pourquoi le paradoxe avait prospéré jusqu'à cette date, autrement dit pourquoi les autres chercheurs qui avaient tenté de

<sup>6</sup>— Le produit marginal du capital désigne le supplément de production obtenu par l'emploi d'une unité supplémentaire de capital.

## LE PARADOXE DE LA PRODUCTIVITÉ FORMULÉ PAR ROBERT SOLOW

Hors-champ

**O**N PEUT DATER LE DÉBUT de ce questionnement scientifique à l'expression par Robert Solow (1987) du «paradoxe de la productivité» qui porte parfois son nom. La pique fameuse du professeur du MIT («We can see the computer age everywhere except in the productivity statistics»), quelques mois seulement avant de recevoir le prix Nobel d'économie, est en réalité adressée à deux confrères de Berkeley, Cohen et Zysman, dont il commente le dernier livre dans une chronique de la *New York Times Book Review*. Cohen & Zysman (1987) ont en effet commis un ouvrage dans lequel ils dénoncent le mythe d'une économie américaine qui deviendrait – serait devenue ou pourrait devenir – «post-industrielle», ce sur quoi Solow leur donne raison. Ce faisant, ils hasardent une série de conjectures indiquant que les nouvelles technologies informatiques seront de nature à bouleverser les avantages comparatifs des grandes économies et permettront à l'industrie américaine de reprendre son leadership face à ses concurrentes ouest-allemande, coréenne ou japonaise. C'est là un des points faibles de leur argumentation, selon Solow, pour qui cette hypothèse optimiste purement spéculative ne fait que souligner le décalage, «embarrassant pour tout le monde», entre un sentiment partagé qu'une révolution technologique est en marche, de nature à changer radicalement nos «vies productives», et l'érosion persistante des gains de productivité dans les statistiques macroéconomiques.

mettre en évidence un tel apport des TIC à la productivité, dont l'intuition était dans tous les esprits, n'y étaient pas encore parvenus. Plusieurs hypothèses sont avancées, souvent mais pas toujours cohérentes entre elles. *Primo*, comme tous ont utilisé le même modèle, c'est que le résultat positif de Brynjolfsson & Hitt tient à leur échantillon, plus récent et plus ample que les précédents. En d'autres termes, le paradoxe de la productivité

aurait selon eux pris fin au tournant des années 1990; ils conjecturent alors de possibles phénomènes de propagation ou d'accumulation entrant dans la relation entre TIC et productivité, qui seront confirmés peu après (*cf.* encadré ci-après). *Secundo*, toujours selon Brynjolfsson & Hitt (1996), le recours aux TIC ne fait pas qu'accélérer la production : il concourt également à améliorer la qualité et la diversité des produits. Les TIC créent de la valeur

pour les consommateurs, parfois aussi pour les producteurs<sup>7</sup>, sous des formes dont les données nationales sur la productivité rendent parfois difficilement compte. Il est donc possible que leur effet soit survenu plus tôt mais passé inaperçu. *Tertio*, en examinant en détail les travaux antérieurs, Brynjolfsson (1993) note que leur incapacité à identifier le bénéfice des investissements en TIC relève autant d'un déficit méthodologique – et tout particulièrement d'une difficulté à mesurer précisément l'étendue des changements apportés par ces technologies dans le fonctionnement quotidien des entreprises<sup>8</sup> – que d'une mauvaise gestion de ces nouveaux outils par leurs développeurs et utilisateurs. *Quarto*, Willcocks & Lester (1996), qui reprennent à leur compte ces observations, ajoutent que la plupart de ces travaux antérieurs portaient sur des entreprises américaines de services : une meilleure attention aux phénomènes en cours dans certains secteurs manufacturiers aurait peut-être conduit plus rapidement à une appréciation positive.

Depuis, bien d'autres travaux ont confirmé l'existence d'un rendement positif des TIC sur la productivité. Dans une analyse macroéconomique, Stiroh (2002) montre ainsi que les secteurs intensifs en TIC ont connu une amélioration significative de leur productivité dans les années 1990. À la lisière des travaux par secteur, Swafford *et al.* (2008) remarquent que le niveau d'intégration des TIC améliore la capacité d'une entreprise à tirer parti de la flexibilité de sa chaîne de valeur, et par là même l'agilité et la performance économique de la chaîne de valeur tout entière. Dans l'ensemble, Cardona *et al.* (2013) confirment à l'issue d'une revue de littérature que la majorité des études empiriques concluent à un effet positif et significatif de ces technologies sur la productivité<sup>9</sup>. Ceccobelli *et al.* (2012) ajoutent qu'elles jouent également un rôle dans la formation des «clubs de convergence» entre pays<sup>10</sup>.

7 – Hitt & Brynjolfsson (1996) notent toutefois que cette valeur créée pour les usagers ne s'est pas traduite par un surcroît de profitabilité des entreprises.

8 – À ce sujet, voir aussi Brynjolfsson & Hitt (2000).

9 – C'est un avis majoritaire, certes, mais pas unanime : Hajli *et al.* (2015) estiment en effet que les données les plus récentes – notamment celles postérieures au pic d'investissement à l'approche de l'an 2000 – font état d'une corrélation positive de l'acquisition de capital TIC avec la croissance du PIB mais pas nécessairement avec la productivité du travail ou multifactorielle. À tout le moins, cette ambiguïté indique que certaines entreprises bénéficient des investissements TIC, tandis que d'autres n'en tirent pas profit. Ce point est traité dans les deux paragraphes suivants.

10 – Dans le modèle de croissance néoclassique, le progrès technique est exogène et se diffuse instantanément. La croissance de chaque pays est alors uniquement déterminée par l'accumulation de capital, moyennant des rendements décroissants : la croissance d'une économie est d'autant plus vive qu'elle est pauvre, de sorte que tous les pays convergent théoriquement vers un même niveau d'équilibre à long terme du capital par tête. Au contraire, dans un modèle de croissance endogène, le progrès technique est déterminé par le comportement des acteurs économiques et, quoi qu'il se diffuse progressivement, peut être plus ou moins efficacement approprié. Ces modèles prévoient donc que des inégalités internationales de développement puissent se maintenir, les pays aux caractéristiques similaires ayant tendance à converger au sein de sous-ensembles, appelés clubs. (Baumol, 1986)

## LES TIC : UNE GENERAL PURPOSE TECHNOLOGY (GPT) PLUS RAPIDE ET INFLUENTE QUE LES PRÉCÉDENTES

Hors-champ

**C**RAFTS (2002, 2004) CONDUIT UN TRAVAIL D'HISTORIEN qui l'amène à établir que les TIC appartiennent à la famille rare des technologies à usage général (*General Purpose Technologies*, ou GPT), à l'instar de la machine à vapeur ou de l'électricité. Comparant les effets de ces trois inventions déterminantes, il relève notamment trois points. D'une part, le surcroît de productivité imputable aux TIC est nettement supérieur à celui que l'on peut attribuer aux deux précédentes. D'autre part, les TIC et leurs usages possibles se sont diffusés plus rapidement, le temps de latence se trouvant considérablement réduit entre la première invention marquante (machine à vapeur de Watt, premier microprocesseur) et la manifestation de ses effets macroéconomiques. Troisièmement et enfin, le rendement privé de ces GPT, pour les investisseurs ayant soutenu l'émergence de nouvelles activités disruptives, est considérablement inférieur à leur rendement social, approprié par les usagers. Et Crafts de conclure : « Le véritable paradoxe de la productivité concernant les TIC est de se demander pourquoi les économistes en espéraient davantage et plus vite encore. »

Hu & Quan (2005) précisent quant à eux que le sens de la causalité est conforme à l'intuition et que, dans la plupart des secteurs, ce sont bien les investissements en TIC qui génèrent un supplément de productivité (même si un effet positif de rétroaction est également décelable). Enfin, Ng & Ng (2016) établissent que le taux de pénétration des TIC est l'un des quatre paramètres expliquant le déclin relatif de la productivité totale des facteurs des pays de l'OCDE à l'égard des États-Unis<sup>11</sup>.

### UNE EFFICACITÉ SOUS CONDITION : LA MISE AU JOUR DE FACTEURS LIÉS

Très vite après ces premières découvertes, les travaux de recherche ont également montré que les gains de productivité permis par les TIC n'apparaissent pas par enchantement et qu'ils étaient au contraire conditionnés à d'autres facteurs clés.

On peut résumer ces différentes observations en affirmant que le déploiement des nouvelles technologies, la qualité organisationnelle de l'entreprise et la qualité de son capital humain sont trois facteurs fortement interreliés de sa performance.

Comme on l'a vu plus haut, c'était déjà une conclusion de Brynjolfs-son & Hitt eux-mêmes (*op. cit.*) : si les bénéfices des TIC sont devenus détectables tardivement, c'est en partie parce que les entreprises ne savent pas toujours utiliser efficacement les équipements dans lesquels elles investissent. Bartelsman & Doms (2000), après avoir analysé divers travaux empiriques sur données longitudinales, concluent que la croissance de la productivité des entreprises est associée à quatre principales variables que sont l'utilisation des technologies, certes, mais aussi la capacité managériale, l'amélioration du capital humain et la qualité de la régulation. Ils confirment donc que l'efficacité des TIC dépend de l'écosystème organisationnel dans lequel elles s'intègrent<sup>12</sup>. Un peu plus tard, Bresnahan *et al.* (2002) montrent à nouveau, sur des données d'entreprises américaines, que l'accroissement de la demande en travailleurs qualifiés découlant de l'investissement en TIC est plus prononcé de la part des entreprises qui investissent concomitamment

dans la réorganisation de leurs lieux de travail. Cette complémentarité est confirmée par Bartel *et al.* (2007) qui étudient de près le fonctionnement des usines dans un secteur manufacturier précis (la fabrication de vannes) : ils observent que l'adoption de nouveaux équipements performants à base de TIC améliore l'efficacité à toutes les étapes du processus de production et qu'elle coïncide avec l'augmentation des compétences requises de la part des opérateurs, ainsi qu'avec l'adoption de nouvelles pratiques en matière de ressources humaines pour soutenir ces compétences.

Si le rendement du capital TIC varie en fonction de l'amélioration du capital humain de l'entreprise, c'est notamment parce que l'automatisation exerce un effet ambivalent sur la demande de travail, mis au jour notamment par Autor *et al.* (2003). Ces derniers montrent en effet que le capital informatique se substitue au travail pour les tâches obéissant à des règles explicites, qu'elles soient cognitives ou manuelles, tandis qu'il le complète pour les tâches de résolution de problèmes complexes et de communication. En conséquence, ainsi que les auteurs l'observent entre 1960 et 1998, l'automatisation est associée à une réduction de la demande de travail routinier de la part des entreprises, qu'il soit manuel

<sup>11</sup>— Les trois autres facteurs identifiés sont le niveau d'équipement en machines, l'ouverture à l'économie mondialisée et la qualité institutionnelle.

<sup>12</sup>— Concernant cette fois le niveau absolu de la productivité, Carnevali *et al.* (2020) confirment empiriquement les facteurs déterminants suivants : la taille du marché, le coût relatif du travail, le coût absolu du travail et les investissements passés.

ou intellectuel, et à une augmentation de la demande de travail sur des tâches non routinières. Ils ajoutent que ce changement explique 60% de la déformation de la demande de travail au profit de travailleurs diplômés entre 1970 et 1998 – pour moitié au sein du même poste et à dénomination inchangée.

D'un autre côté, le lien entre le rendement des TIC et la qualité organisationnelle des entreprises peut être éclairé par diverses contributions. D'une part, Willcocks & Lester (*op. cit.*) avancent que les effets positifs des TIC sur la productivité sont peut-être devenus détectables au tournant des années 1990 précisément parce que le mouvement de contraction économique et d'intensification de la compétition mondiale de cette période a forcé les entreprises – américaines notamment – à tirer le meilleur parti de leurs achats passés. La même année, Brynjolfsson & Hitt (*op. cit.*) vont jusqu'à écrire que «*les restructurations et les opérations de réduction de coûts [...] sont souvent nécessaires pour concrétiser les bénéfices potentiels des systèmes d'information*» et que celles-ci n'ont été accomplies que récemment.

Bloom *et al.* (2012) apportent une précision importante. Si la croissance de la productivité s'est accélérée après 1995 aux États-Unis et non en Europe, en particulier dans les secteurs utilisant intensivement les technologies de l'information, c'est manifestement parce que les

entreprises américaines ont su mieux s'organiser pour en tirer profit. Ils observent en effet que les multinationales américaines opérant en Europe ont, grâce aux TIC, davantage amélioré leur productivité que les multinationales non américaines – en particulier dans les secteurs responsables de l'accélération de la productivité aux États-Unis. Preuve supplémentaire: les entreprises rachetées par des multinationales américaines ont elles aussi accru la productivité de leurs investissements informatiques, mais pas celles rachetées par des multinationales non américaines. Les auteurs, combinant leurs observations avec une enquête de terrain, concluent que cet avantage tient à des pratiques de gestion des talents plus aguerries au sein des entreprises américaines. Cardona *et al.* (*op. cit.*) complètent cette observation tout en la nuancant, un an et demi plus tard: l'effet favorable exercé par les TIC sur la productivité est effectivement plus fort aux États-Unis qu'en Europe si l'on raisonne au niveau des États, mais cette différence disparaît si l'on raisonne à l'échelle des entreprises. Or ils constatent également que les TIC exercent leur effet de «*technologie à usage général*» (GPT – voir encadré précédent), c'est-à-dire favorable à la survenue d'autres innovations, là encore de manière plus prononcée aux États-Unis qu'en Europe. La différence entre les deux rives de l'Atlantique tiendrait donc aux externalités imputables aux TIC, qui transformeraient davantage les activités productives aux États-Unis.

Ceccobelli *et al.* (*op. cit.*) confirment à la même période que les TIC ont un effet transformateur qui les distingue en tant que GPT, et qui s'exprime à condition que des processus organisationnels et commerciaux soient infléchis.

## LES EFFETS DE SÉLECTION ET DE RÉALLOCATION

Les travaux recensés au paragraphe précédent ont expliqué pourquoi l'effet bénéfique des TIC ne survenait pas nécessairement. D'autres travaux ont également mis en évidence qu'il n'apparaissait pas identiquement dans toutes les entreprises ni dans tous les secteurs.

Dès 1997, Gouyette & Perelman montrent que l'industrie et les services ont des comportements différents à cet égard. Plus précisément, en voulant tester l'hypothèse de convergence sur un ensemble de secteurs et de pays membres de l'OCDE entre 1970 et 1987, ils observent non seulement que les gains annuels de productivité sont très faibles dans les activités de services, mais en outre que l'investissement en capital tend à exercer sur la productivité un effet positif dans l'industrie et défavorable dans le tertiaire. Une décennie

plus tard, Inklaar *et al.* (2007) soulignent que les différences de productivité entre économies avancées, tant en niveau qu'en progression, relèvent essentiellement des services marchands et non des industries manufacturières: c'est parce que les services en Australie et au Canada ont suivi un fort mouvement de rattrapage, à partir de niveaux relativement bas par rapport aux États-Unis, que ces deux pays ont pu bénéficier de gains de productivité notables, et c'est au contraire parce que leur secteur tertiaire n'a pas suivi la progression constatée aux États-Unis que les pays d'Europe continentale ont décroché par rapport à ces derniers, alors qu'ils avaient en 1997 des niveaux similaires de productivité agrégée. Or, concluent les auteurs, s'il y a bien un point sur lequel les États-Unis se distinguent, c'est sur leur niveau de capital en TIC, nettement plus élevé qu'ailleurs. À la même période, van Ark *et al.* (2008) parviennent à des conclusions convergentes: le différentiel de productivité qui s'est ouvert entre les États-Unis et l'Europe à partir du milieu des années 1990 est grandement imputable aux services marchands, sur lesquels les pouvoirs publics sont invités à se pencher en priorité<sup>13</sup>. Il tient notamment à une plus faible part, en Europe, des secteurs producteurs de TIC et, comme

13 – Les travaux sur l'effet des TIC sur la productivité des services publics sont plus rares. Signalons tout de même ce papier de Brown (2015), qui relève que le déploiement, pourtant important, d'équipements et solutions TIC au sein des services de police a un apport très faible voire nul sur leur productivité mesurée à l'aune du taux d'élucidation des crimes.

cela a été souligné au paragraphe précédent, à un effet plus faible de ces dernières sur la productivité totale des facteurs. Un récent rapport de la BEI (Banque européenne d'investissement) apporte à ce constat une illustration convaincante, montrant que le retard européen dans l'équipement des services est particulièrement persistant (Revoltella, 2019).

Citons également le travail de Bock & Gelman (2024), qui décomposent pour chaque secteur les raisons de l'écart croissant de productivité entre les entreprises françaises et les entreprises américaines. Les auteurs écrivent notamment : « Parmi les secteurs qui ont connu les plus grandes différences de croissance de la productivité, on trouve ceux qui sont les plus intensifs en TIC. [...] Le manque d'investissement dans les TIC par travailleur n'est pas seulement supporté par les secteurs producteurs de TIC, mais aussi par d'autres secteurs qui utilisent ces technologies. [...] Les investissements dans les TIC par travailleur ne sont pas suffisants pour générer des gains de productivité pour l'ensemble de l'économie s'ils restent concentrés dans quelques secteurs. Pour que ces investissements profitent pleinement à l'économie, les secteurs non producteurs de TIC doivent intégrer pleinement ces nouvelles technologies. Sinon, des goulets d'étranglement risquent d'apparaître : les secteurs à la traîne freinent la productivité globale, même si les secteurs de pointe continuent de progresser. »

Cela étant posé, les résultats de la recherche invitent aussi à dépasser cette première grille de lecture sectorielle pour appréhender plus complètement la distribution hétérogène des niveaux et des gains de productivité. Dans un domaine voisin, celui des effets du commerce international sur la productivité des entreprises, le modèle théorique de Melitz (2003) explique pourquoi on peut trouver des entreprises à des niveaux de productivité différents au sein d'un même secteur ; pourquoi ce sont les entreprises les plus productives qui survivent, en étant les seules à s'aventurer à l'export au moyen d'un investissement plus élevé, quand les moins productives sont progressivement sorties du marché pour la raison opposée ; et comment les gains de productivité sectoriels proviennent notamment de la réallocation des ressources entre ces deux groupes d'entreprises, au profit des plus efficaces. On peut être tenté de conjecturer que les TIC exercent sur les entreprises un effet similaire. Or, précisément, Andrews *et al.* (2015) dressent un tableau saisissant des écarts de productivité qui se sont accentués au sein de chaque secteur et de chaque pays, entre les entreprises les plus productives (*i.e.* à la « frontière mondiale ») et les autres (les « retardataires ») : « Les firmes à la frontière mondiale, écrivent-ils, sont devenues relativement plus productives pendant la décennie 2000, enregistrant des gains annuels de la productivité du travail de 3,5% en moyenne dans le secteur manufacturier, contre

seulement 0,5% en moyenne pour les autres entreprises. Le contraste est encore plus prononcé dans le secteur tertiaire. Faute de données, on ne sait dire si ces progressions sont plus lentes que par le passé, mais il est intéressant de noter que les gains de productivité des entreprises à la frontière sont restés robustes après 2004, année à partir de laquelle ils ont commencé à ralentir dans les économies avancées, notamment aux États-Unis. Surtout, cet écart grandissant depuis le début du siècle entre les gains de productivité des entreprises à la frontière et ceux des autres suggère que la capacité des secondes à apprendre des premières a diminué. » Les auteurs y voient la conséquence d'une diffusion, très inégale selon les entreprises, des technologies pourtant réputées non rivales et donc appropriables par tous les agents économiques au même moment. La même année, Kuusi (2015) observe justement que le capital en TIC joue un rôle important, et jusque-là sous-estimé, dans l'apparition de ces « configurations leaders-suiveurs » en matière de productivité. De Loecker *et al.* (2020) complètent cette analyse en montrant que la hausse moyenne du pouvoir de marché et de la rentabilité des entreprises américaines depuis 1955 provient, là encore, d'un mouvement de réallocation au profit des entreprises à plus forte marge, qui concentrent l'essentiel des gains obtenus.

Pour conclure, le fameux « paradoxe de Solow » sur la productivité des économies avancées a reçu depuis 1993 de nombreuses réponses convaincantes que l'on peut résumer de la manière suivante. *Primo*, si l'on compare les TIC aux grandes GPT qui les ont précédées dans l'histoire récente, à savoir la vapeur et l'électricité, les gains imputables aux premières, pour autant que l'on parvienne à les mesurer de manière fiable, ont été à la fois plus importants et plus rapides que ceux apportés par les secondes. Il n'était pas anormal qu'ils mettent quelques années à se propager. *Secundo*, les bénéfiques microéconomiques des TIC sur la productivité des entreprises ne font plus de doute aujourd'hui, tout comme il est certain qu'ils ne découlent pas de manière nécessaire de l'acte d'investissement en lui-même. La rentabilité de ce dernier est en effet largement conditionnée à deux autres dimensions : la qualité de l'organisation - et donc en pratique de la réorganisation - de l'entreprise et l'élévation des compétences des salariés. *Tertio*, alors que ces technologies sont connues de tous et théoriquement libres d'accès, divers effets cumulatifs aboutissent au fait que l'amélioration de la productivité imputable aux TIC se concentre à l'extrémité déjà favorisée de la distribution, creusant l'écart avec les entreprises retardataires, parmi lesquelles les PME sont surreprésentées.

# 2

Chapitre

## L'industrie 4.0 et le renouvellement des préoccupations autour de la productivité

*La vague récente d'amélioration des technologies de production, baptisée «industrie 4.0», a offert un prolongement naturel aux questionnements antérieurs sur le lien entre technologie et productivité, avant que l'intelligence artificielle ne le fasse à son tour. Comme pour l'informatique avant elles, ces innovations créent de nouvelles perspectives de productivité tout en requérant des investissements coordonnés en technologies, compétences et organisation.*

### À PARTIR DE 2012, L'ÉMERGENCE DE L'INDUSTRIE 4.0

Au milieu des années 2010, le président fondateur du Forum économique mondial de Davos publie un ouvrage entièrement consacré à la thèse selon laquelle nos économies auraient entamé une «quatrième révolution industrielle» (Schwab, 2017). Celle-ci serait fondée sur la *data*, comme les précédentes l'ont été respectivement sur la vapeur, l'électricité et l'informatique. Que cette thèse soit loin de convaincre les historiens, qui contestent plus complètement

l'idée même qu'un ensemble d'événements mérite d'être appelé «révolution industrielle», quelle que soit la période que l'on veuille désigner par là (Hélin, 1991; Jarrige, 2015), importe peu ici. Le fait notable est que, dans son livre, Schwab entérine une idée circulant alors abondamment dans les milieux économiques et industriels: une nouvelle vague de technologies numériques serait en passe de «révolutionner» l'efficacité et l'agencement des méthodes de production (Roblek *et al.*, 2016; Diez-Olivan *et al.*, 2019). Ce bouquet de technologies (impression 3D, jumeaux numériques, cloud...) <sup>14</sup> est désigné par différentes

<sup>14</sup>— Dans les chapitres qui suivent, nous exploitons les résultats d'une enquête menée auprès de PMI-ETI de 50 à 5000 salariés et concernant les quatorze technologies suivantes: le cloud, l'analytique avancée, l'apprentissage automatique (machine learning), l'intelligence artificielle générative, la réalité virtuelle, la réalité augmentée, la robotique, l'impression 3D, les jumeaux numériques, l'informatique quantique, les technologies propres (*cleantech*), l'Internet des objets, le stockage d'énergie et la cybersécurité.

appellations d'un pays à l'autre : *advanced manufacturing*, «industrie du futur» ou encore *Industrie 4.0* (Bidet-Mayer, 2016). Cette dernière expression a été popularisée depuis l'Allemagne, pionnière en la matière, après que la chancelière Angela Merkel a lancé officiellement en 2011 un programme national portant ce nom et rassemblant les parties prenantes de l'industrie allemande pour esquisser un scénario de modernisation et maintenir ainsi son leadership mondial dans les biens d'équipement haut de gamme (*ibid.*).

Le terme «industrie 4.0» correspond donc davantage à une intuition et à un plan d'action, partagés dans les années pré-Covid par les décideurs économiques de nombreux pays avancés, qu'à une définition stabilisée (la liste des technologies ainsi désignées varie fréquemment d'un document à l'autre) ou à un jalon historique reconnu. De nombreux États ont, à la suite de l'Allemagne, lancé des initiatives parallèles pour encourager la diffusion de ces technologies dans le tissu productif et ne pas perdre cette nouvelle bataille technologique (*ibid.*)<sup>15</sup>. Comme souvent en pareil cas, les décideurs publics et privés, architectes de ces programmes nationaux

de soutien, avaient notamment à cœur que la majorité des PMI ne restent pas à l'écart d'un mouvement de transformation capitaliste par nature, et de ce fait plus spontanément envisagé au sein des grandes entreprises.

Très logiquement, cette décennie de mobilisation en faveur de l'adoption par les PMI de solutions 4.0 a renouvelé les termes de la réflexion économique sur le lien entre TIC et productivité, hétérogène et différé pour les uns, paradoxalement indétectable pour les autres. Acemoglu *et al.* (2014) s'emparent assez tôt du sujet, relevant qu'un «paradigme de plus en plus influent» postule l'existence de gains de productivité particulièrement importants du fait de ces nouvelles technologies numériques. Ils admettent qu'il existe quelques faisceaux d'indices attestant une reprise des gains de productivité dans les secteurs manufacturiers fortement utilisateurs de TIC aux États-Unis; mais ils s'étonnent que le poids de ces derniers dans l'ensemble de la production industrielle américaine soit paradoxalement en repli. Les gains de productivité enregistrés sont donc la résultante d'une diminution de l'emploi plus rapide encore que celle de la production.

15 – «L'initiative française en faveur de l'industrie du futur s'inscrit dans le projet de la "Nouvelle France industrielle". Lancé le 12 septembre 2013 par le président de la République et le ministre du Redressement productif Arnaud Montebourg, ce projet est le résultat d'un travail préparatoire d'un an mené par le Conseil national de l'industrie (CNI). [...] Depuis le mois de mai 2015, la Nouvelle France industrielle est entrée dans sa deuxième phase afin de faire gagner le projet en lisibilité et de le mettre plus en phase avec les grands défis d'avenir. Concrètement, cela s'est traduit par une réorganisation des 34 plans initiaux en neuf "solutions" et un programme transversal intitulé "Industrie du futur". L'ambition de ce dernier a été élargie: outre la modernisation de l'outil productif, son objectif est aujourd'hui d'accompagner la transformation numérique des entreprises.» In Bidet-Mayer (2016).

## CETTE FOIS ENCORE, LA TECHNOLOGIE CONCOURT À LA PRODUCTIVITÉ

Comme dans le cas précédent, les preuves d'un effet positif des TIC sur la productivité vont parvenir avec un léger décalage temporel. Par exemple, Ghobakhloo & Fathi (2019) ont dû étudier pendant cinq ans les essais, les échecs puis les succès d'une entreprise manufacturière dans le déploiement de solutions 4.0 avant de pouvoir conclure, certes sur la base d'un cas unique, que les bénéfices d'un tel investissement étaient perceptibles. Büchi *et al.* (2020) parviennent à généraliser cet enseignement en montrant que le nombre d'opportunités commerciales obtenues par les entreprises augmente avec leur degré d'ouverture aux technologies 4.0, que l'on parle du nombre de technologies mobilisées ou du nombre d'étapes de la chaîne de valeur où elles sont déployées<sup>16</sup>. Opazo-Basáez *et al.* (2021) élargissent encore la focale et constatent, sur un échantillon de 426 entreprises manufacturières espagnoles, que les technologies 4.0 leur permettent d'augmenter très substantiellement la largeur optimale de leur chaîne de valeur, c'est-à-dire le nombre d'entreprises étrangères avec lesquelles elles peuvent interagir et dont elles peuvent tirer des enseignements avant que les coûts de coordination ne finissent par l'emporter sur les gains de productivité obtenus grâce à ces échanges.

16 – Cet effet est d'ailleurs maximal pour les entreprises locales de petite taille.



Les preuves d'un effet positif des TIC sur la productivité vont parvenir avec un léger décalage temporel.



Venturini (2022) obtient quant à lui une confirmation du fait que les technologies 4.0 peuvent être assimilées à des GPT: l'accumulation d'un stock de connaissances liées à ces technologies 4.0 exerce un effet positif sur la productivité, de sorte que cette «quatrième révolution industrielle» pourrait avoir contribué à hauteur de 3 voire 8% à l'augmentation de la productivité entre 1990 et 2014.

Naturellement, on trouve aussi dans la littérature des travaux portant sur les effets de telle ou telle technologie spécifique. Delic & Eysers (2020) mettent par exemple en évidence, concernant le secteur automobile européen, que l'usage de l'impression 3D est associé à un surcroît de flexibilité et de performance de la *supply chain*. Edquist *et al.* (2021) établissent quant à eux qu'un accroissement de 10 points de pourcentage (pp) du nombre de connexions IoT (*Internet of Things*, Internet des objets) par habitant est associé à une progression de la productivité globale des facteurs de l'ordre de 0,23 pp. Al-Gumaei *et al.* (2018), pour leur part, explorent les interactions entre certaines des technologies du «panier 4.0»: leur enquête de terrain montre en effet les complémentarités observables entre le cloud, le big data et l'IIoT (*Industrial IoT*) et l'intérêt qu'il y aurait à envisager des développements conjoints en la matière.

Tout en confirmant les bénéfices que les entreprises peuvent en tirer, Ghadge *et al.* (2020) soulignent

toutefois que l'implantation de solutions 4.0 au sein d'une chaîne de valeur complète ne va pas de soi. Pour finir, Benassi *et al.*, (2020) relèvent, en observant des entreprises ayant déposé des brevets dans les technologies 4.0, que cet effort est significativement corrélé à la productivité des firmes mais pas à leur profitabilité, comme si les bénéfices économiques de ces innovations tardaient à survenir. À l'opposé, Bai *et al.* (2022), analysant 563 annonces d'investissement en technologies 4.0 en Chine, notent qu'elles sont suivies de réactions positives des marchés financiers et d'une amélioration des performances financières des entreprises.

## INDUSTRIE 4.0, EMPLOI ET ORGANISATION

Cette littérature récente aborde notamment deux questions plus spécifiques. La première concerne l'accueil mitigé, pour ne pas dire inquiet, qu'a reçu dans le grand public cet engouement pour de nouvelles technologies de production. Nombreux étaient alors les articles et reportages de presse à évoquer le risque du chômage technologique et plus particulièrement du remplacement des emplois par des robots (Charlet & Dehnert, 2017). À ce sujet, les résultats de la recherche sont partagés. Graetz & Michaels (2018) analysent la diffusion des robots industriels dans 17 pays de l'OCDE (1993-2007), ayant contribué selon eux à hauteur de 0,36 point de pourcentage (soit

15% du total) à la croissance annuelle de la productivité du travail: ils obtiennent que cet accroissement du nombre de robots industriels n'a pas significativement réduit l'emploi total, mais qu'il a pesé à la baisse, de manière importante, sur la part relative des emplois peu qualifiés. De manière congruente, Autor *et al.* (2015) observent sur des données américaines (entre 1980 et 2007) que l'automatisation a joué en faveur d'une polarisation de l'emploi (entre qualifiés et non qualifiés, d'abord dans l'industrie puis dans les métiers tertiaires) et non d'une réduction du volume de l'emploi, contrairement à la mondialisation.

Toutefois, Acemoglu & Restrepo (2020) constatent quant à eux un effet négatif des robots industriels sur l'emploi et les salaires et un effet positif sur la productivité<sup>17</sup>. Ils ajoutent que l'effet des robots sur l'emploi total américain est resté limité du simple fait que ceux-ci ne sont pas très nombreux aux États-Unis: si les projections de certains cabinets se réalisent et que leur nombre vient à quadrupler, les conséquences macroéconomiques n'en seront que plus sensibles. Sur des données européennes, cette fois,

Chiacchio *et al.* (2018) relèvent aussi un tel effet négatif<sup>18</sup>, que Aghion *et al.* (2019) confirment peu après dans le cas français (entre 1994 et 2014). Dans un papier antérieur, Acemoglu & Restrepo (2018) montrent également que les robots ont davantage tendance à se substituer aux travailleurs d'âge intermédiaire (36-55 ans) et qu'un changement démographique renforçant la part de ces derniers dans la population locale se traduit par une hausse du taux d'adoption des robots et automates industriels.

Felice *et al.* (2022), de leur côté, après avoir observé 21 secteurs industriels dans 31 pays de l'OCDE entre 2009 et 2017, concluent à un effet positif de l'adoption de la fabrication additive sur l'emploi manufacturier, cet effet étant cependant variable d'un secteur à l'autre.

La deuxième question a trait aux conditions initiales permettant un déploiement réussi de solutions 4.0 dans les entreprises et la concrétisation de leurs effets sur la productivité. Sur ce point, Bettiol *et al.* (2020, 2021) démontrent empiriquement le lien très étroit entre une expérience préalable dans l'installation de solutions à base de TIC et l'adoption

17 – « Un robot supplémentaire pour mille travailleurs réduit la part agrégée de l'emploi dans la population de 0,34 point de pourcentage et les salaires agrégés de 0,5%. Si, en outre, nous nous concentrons uniquement sur les baisses de l'emploi dans l'industrie manufacturière fortement robotisée, et supposons que les pertes d'emplois dans d'autres secteurs sont dues à la demande locale [...], les chiffres sont de 0,18 point de pourcentage pour l'emploi et 0,25% pour les salaires. »

18 – « Nous constatons qu'un robot supplémentaire pour mille travailleurs réduit le taux d'emploi de 0,16 à 0,20 point de pourcentage. Ainsi, un effet de substitution significatif domine [l'effet de productivité]. Cet effet de substitution est particulièrement évident pour les travailleurs détenteur d'un niveau d'éducation intermédiaire et pour les jeunes cohortes. »



Les investissements en TIC améliorent l'adoption ultérieure de technologies avancées, générant des effets cumulatifs.



des technologies 4.0. Leur analyse de 1229 entreprises italiennes révèle notamment des correspondances spécifiques entre groupes technologiques. Cette «dépendance de sentier» suggère que les investissements en TIC au sein d'une entreprise améliorent sa capacité d'absorption et donc l'adoption ultérieure de technologies plus avancées, générant des effets cumulatifs sur la productivité. En cela, elle fait très directement écho au fait que les TIC ont bien les attributs des *General Purpose Technologies* (GPT), comme cela a été souligné précédemment. Ce lien entre investissements passés et futurs suggère aussi qu'il est probablement plus difficile pour une PME que pour une grande entreprise d'accéder aux technologies 4.0 et à leurs bénéfices en matière de productivité. C'est très exactement la conclusion à laquelle parviennent Masood & Sonntag (2020), qui déplorent, à l'issue d'une enquête conduite auprès de PME britanniques, que ces technologies soient souvent pensées par et pour les grandes entreprises. Les plus petites, qui aimeraient pouvoir bénéficier elles aussi de l'amélioration qu'elles offrent en matière de flexibilité, de maîtrise des coûts, d'efficacité et de qualité, en sont souvent privées faute de moyens financiers et de compétences disponibles - Agostini & Nosella (2019) montrent d'ailleurs comment le capital social d'une PME et l'implication de son management renforcent la propension à s'équiper en technologies 4.0. C'est à cette fin que Ghobakhloo

& Fathi (*op. cit.*) proposent une approche «lean digital» à l'attention des petites entreprises, après avoir observé que la transition vers l'industrie 4.0 peut commencer par la digitalisation ciblée de certaines opérations. Dans le même esprit, Burgmann *et al.* (2022) montrent que le développement d'offres par abonnement et souscription permet aux PME de dépasser ces coûts d'entrée dans l'industrie 4.0, certes au prix d'une dépendance accrue aux fournisseurs de solutions. Matt *et al.* (2021), à l'issue de leur enquête de terrain en Vénétie, pointent les atouts des écosystèmes de PME pour favoriser une intégration réussie de l'industrie 4.0. De manière complémentaire, Prodi *et al.* (2022) soulignent le rôle bénéfique des organisations intermédiaires, par exemple des «centres de compétences» allemands, capables d'accélérer l'adoption des technologies 4.0 par les PME précisément parce qu'ils adoptent une acception élargie des transformations en question.

### LE DÉBUT DE LA FIN DE L'INDUSTRIE 4.0 EN EUROPE ?

Que reste-t-il aujourd'hui de cette mobilisation? On peut en effet se demander si la crise du Covid, la crise énergétique, l'instabilité géopolitique ou encore le retour des barrières tarifaires n'ont pas eu raison des efforts en faveur de l'industrie 4.0. On note à tout le moins,

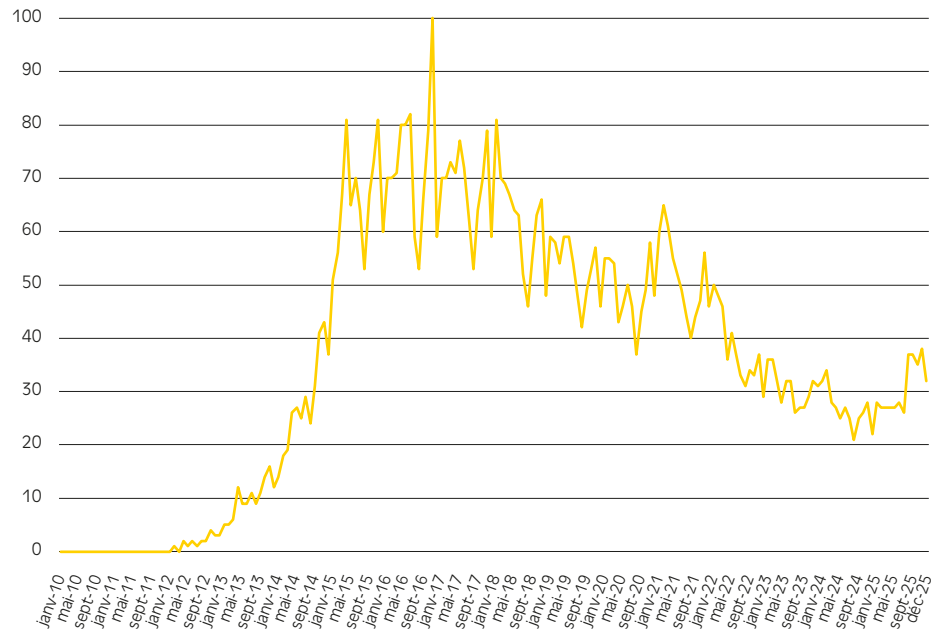
par une rapide analyse sur Google Trends, que l'engouement pour cette notion n'a cessé de fléchir depuis un pic en 2016-2017 (*cf.* figure 2.1).

Cet essoufflement ne se limite d'ailleurs pas aux requêtes sur le moteur de recherche: Lerch *et al.* (2026) montrent en effet, après avoir décorqué les données d'entreprise du *German Manufacturing Survey* en 2015, 2018 et 2022, que le rythme d'adoption de l'industrie 4.0 a considérablement diminué en Allemagne entre 2018 et 2022 (passant de + 12% à + 5%). À l'origine de ce ralentissement, ils repèrent notamment une concentration dans un très petit nombre d'entreprises des progrès accomplis dans le numérique, quand la majorité des entreprises se contente de stagner. À cela s'ajoute, ce qui est plus inquiétant, un mouvement inédit de «dé-numérisation» principalement dans des PME. De leur côté, Hoffmann *et al.* (2025) soulignent à quel point les industries «traditionnelles» aux États-Unis (ici, la forge) ont encore aujourd'hui beaucoup de progrès à accomplir et à espérer de la mise en application de ce bouquet de technologies.

Une lecture possible de ces événements est que les promesses portées par les premières campagnes enthousiastes en faveur de l'industrie 4.0 ont pu déboucher sur des déceptions une fois accomplies les phases de mise en œuvre.

fig. 2.1

### Évolution de l'intérêt des internautes pour le terme « Industrie 4.0 » selon Google Trends



Source: Google.

C'est notamment ce que relatent Permin *et al.* (2025) à l'issue de leur travail d'enquête auprès des équipementiers allemands, dans lequel ils révèlent que seule une mince fraction d'entre eux ont su se réorganiser pour tirer le meilleur parti de leurs investissements matériels, alors qu'on promettait à l'Allemagne de l'ordre de 100 milliards d'euros de valeur ajoutée supplémentaire il y a dix ans à peine. Les auteurs en concluent que la première des priorités est d'améliorer la formation managériale des

ingénieurs en mécanique. Il y a bien eu des effets positifs à cette vague d'équipements: Dachs *et al.* (2019) montrent ainsi que le niveau d'équipement 4.0 des entreprises industrielles d'Europe rhénane (Allemagne, Suisse, Autriche) augmente leur propension à relocaliser leurs activités dans leur pays d'origine, mais cela reste un phénomène marginal (représentant 4% des entreprises concernées), bien loin des premières conjectures esquissées au lancement de la campagne nationale par la chancelière.

Plus que jamais, l'hétérogénéité des entreprises demeure un facteur clé pour expliquer pourquoi les investissements en TIC génèrent des résultats variables selon les contextes organisationnels et sectoriels. En outre, à la lumière des événements passés, il ne serait pas surprenant que les technologies les plus récentes - et notamment l'IA générative - engendrent elles aussi des effets macroéconomiques détectables sur la productivité plusieurs années seulement après l'engouement médiatique qui entoure les investissements colossaux qu'elles suscitent. Troisièmement et enfin, ainsi que le démontrent Capello *et al.* (2022), les emplois libérés par les secteurs devenus plus productifs viennent parfois, dans certaines régions européennes, grossir les rangs des activités les moins productives, réduisant d'autant l'effet du progrès technique sur la productivité agrégée.

Tous les éléments sont donc en place pour que des observateurs hâtifs estiment, sur la base de données récentes, que le « paradoxe de la productivité » n'est pas soldé. C'est d'ailleurs ce qu'ont écrit Hajli *et al.* (*op. cit.*) en 2015; c'est surtout ce que concluent Brynjolfsson *et al.* (2019) de l'absence d'effets visibles de l'intelligence artificielle, pourtant sous la plume d'un des premiers chercheurs à avoir su répondre à l'énigme soulevée par Robert Solow. La récente attribution du prix Nobel d'économie à Philippe Aghion permet pourtant de braquer le projecteur

sur des travaux très contemporains apportant déjà de premiers éléments de réponse favorables, sur la productivité (Aghion & Bunel, 2024) et même sur l'emploi en France (Aghion *et al.*, 2025), aux conditions rappelées ci-dessus.

Si les apports de ces technologies à la productivité des entreprises ne font plus de doute, il est tout aussi incontestable que le taux d'équipement ou même la rapidité de pénétration de telle ou telle technologie au sein du tissu productif n'est pas une donnée suffisante pour anticiper et soutenir la compétitivité d'une industrie donnée. Dit autrement, les nombreux classements qui circulent, par exemple sur le nombre de robots industriels installés dans différents pays, sont insuffisamment informatifs si leurs lecteurs ne s'interrogent pas en même temps sur les efforts des entreprises en matière de réorganisation ou sur leur accès aux compétences et ressources financières.

C'est tout l'objet de l'enquête, dont les résultats sont présentés dans les chapitres suivants, que de proposer cette perspective élargie.

# 3

Chapitre

## L'adoption des technologies 4.0 par les PMI-ETI, en France et dans les pays voisins

*Les technologies 4.0 font l'objet de préférences hétérogènes d'un secteur à l'autre, plus encore que d'un pays à l'autre. Les entreprises françaises se distinguent non par leur retard d'équipement actuel, mais par leurs projets d'investissement d'ici à 2030 nettement plus faibles que leurs voisines.*

### LA FRANCE ET SES VOISINS : SIMILITUDES ET DISPARITÉS

La première étape de l'état des lieux consiste à interroger les entreprises<sup>19</sup> sur leur équipement dans chacune des quatorze technologies étudiées (cf. paragraphe suivant). La question qui leur est adressée ici est binaire : « Votre entreprise est-elle équipée ou ne l'est-elle pas ? », indépendamment donc de l'ampleur de cet effort d'équipement (nombre de services centralisés sur le cloud, nombre de robots installés, niveau de génération des protections en cybersécurité...).

Lors de la préparation de l'enquête, ces quatorze technologies ont été regroupées *a priori* en trois familles. Les quatre premières concernent la connectivité, l'usage des données et la puissance de calcul : ce sont le cloud, l'analytique avancée,

le machine learning et l'IA générative. Les cinq technologies suivantes concernent l'interaction homme-machine et l'optimisation des processus : la réalité virtuelle, la réalité augmentée, la robotique, l'impression 3D et les jumeaux numériques. Enfin, les cinq dernières technologies relèvent de domaines transversaux : l'informatique quantique, les *cleantech*, l'Internet des objets, le stockage d'énergie et la cybersécurité.

Le premier tableau ci-après (figure 3.1) présente les taux de réponses positives des entreprises visées, c'est-à-dire des PME et ETI industrielles de 50 à 5 000 salariés en France, en Allemagne et en Italie. Plus le taux se rapproche de 0, plus la case vire au noir. Plus la réponse s'approche de 100 %, plus elle tend au contraire vers le jaune vif. Le blanc correspond à la valeur médiane de 50 %. Sur la partie droite du tableau, les données issues de notre enquête ont été complétées par

<sup>19</sup> – Le lecteur peut se référer à l'annexe 1 pour accéder aux résultats essentiels de l'enquête.

fig. 3.1

### Taux de réponses positives à la question « Votre entreprise est-elle équipée ? »

	Fra	All	Ita	RU*	RU**
Le cloud	63	46	46	67	65
L'analytique avancée	18	23	17	32	
L'apprentissage automatique ( <i>machine learning</i> )	11	13	6		24
L'intelligence artificielle générative	23	17	9	30	35
La réalité virtuelle	12	10	8		16
La réalité augmentée	8	10	6		16
La robotique	44	16	21	33	31
L'impression 3D	33	29	25	26	44
Les jumeaux numériques	8	9	4		20
L'informatique quantique	3	1	1		
Les technologies propres ( <i>cleantech</i> )	17	51	50		
L'Internet des objets	17	52	41	25	29
Le stockage d'énergie	15	66	47		
La cybersécurité	80	58	61		54

**Légende des couleurs:** ■■■■  
0 10 20 30 40 50 60 80 70 90 100

**Sources:** Enquête Ipsos pour La Fabrique de l'Industrie et McKinsey, auprès de 1 198 PMI-ETI en Allemagne, France et Italie, en juin-juillet 2025.

(\*) Massini et al. (2025). Enquête menée auprès de 3 175 entreprises britanniques, dont 10 % industrielles, entre mars et mai 2024. Les chiffres présentés correspondent aux entreprises manufacturières déclarant un usage élevé ou modéré de ces technologies.

(\*\*) Make UK, & Autodesk. (2024). Enquête menée auprès de 151 entreprises industrielles britanniques entre juillet et août 2024. Les chiffres présentés correspondent aux entreprises manufacturières déclarant utiliser ou avoir introduit avec succès ces différentes technologies.

des mesures tirées d'autres travaux et portant sur le cas du Royaume-Uni, selon des méthodes analogues.

Une première observation est que la plupart des réponses se situent sous ce seuil médian de 50 % (les cases étant alors colorées dans des tons gris ou noir). Deux technologies font exception à cette règle: le cloud et, surtout, la cybersécurité. Vient ensuite un groupe de trois technologies (les *cleantech*, l'Internet des objets et le stockage d'énergie), dont le point commun est de présenter des taux de réponse assez faibles en France,

autour de 15 à 17 %, mais nettement plus élevés chez nos deux voisins, entre 40 et 66 %. *A contrario*, il existe deux autres technologies, la robotique et l'impression 3D, pour lesquelles les taux de réponse des entreprises françaises sont sensiblement supérieurs à ceux relevés en Allemagne et en Italie. C'est également vrai, dans une moindre mesure, pour l'IA générative. Pour toutes les autres technologies, les taux de réponses positives dépassent rarement le seuil de 10 % quand ils ne se situent pas nettement plus près de 0, comme dans le cas de l'informatique quantique.

Les résultats des deux enquêtes conduites au Royaume-Uni tendent à conforter nos propres observations. Comme le rappelle l'encadré ci-après, les taux de réponse obtenus sont à assortir d'une marge d'incertitude: pour notre population de 800 entreprises françaises interrogées, celle-ci varie typiquement entre 2 et 3,5 points de pourcentage; pour les populations de 200 entreprises italiennes ou allemandes interrogées, ces marges oscillent entre 4 et 7 points de pourcentage.

### LE SECTEUR PHARMACEUTIQUE PARMIS LES MIEUX ÉQUIPÉS

Le tableau suivant (figure 3.2) présente également les taux de réponses positives des entreprises interrogées, mais cette fois uniquement pour l'échantillon des répondants français, regroupés selon leur secteur d'activité. On retrouve dans ce tableau le caractère désormais répandu du cloud et de la cybersécurité, ainsi que des taux de réponses positives, sinon toujours majoritaires du moins plus élevés qu'en ce qui concerne les autres technologies, pour la robotique et l'impression 3D.

Les regroupements sectoriels sont élaborés à partir de la nomenclature européenne des activités (NACE), respectivement: Industries alimentaires (C10-12), Industries de process (C19-20, C22-23), Industrie pharmaceutique (C21), Métallurgie (C24), Produits informatiques (C26-28),

Industrie automobile (C29), Industrie aéronautique et spatiale (C30.3, C33.16Z, C26.51A), Autres matériels de transport (C30, à l'exception de C30.3), Autres industries manufacturières (C13-18, C25, C31-33) et Production et distribution d'électricité, de gaz, de vapeur et d'air conditionné (D35).

On observe également dans ce tableau des spécificités sectorielles. Le secteur de la pharmacie, par exemple, présente souvent des taux de réponses positives supérieurs aux autres secteurs. Le secteur automobile affiche des taux de réponses positives comparativement élevés concernant la robotique et l'impression 3D – dans ce dernier cas, moyennant un taux fidèlement conforté par Delic & Eyers (2020) dans leur enquête auprès de 124 entreprises européennes du secteur – sans pour autant se distinguer s'agissant des autres technologies. L'aéronautique et le spatial se différencient surtout par leur niveau de recours à l'IA générative et aux jumeaux numériques.

On voit donc se dessiner, derrière le vocable commun de « technologies du futur » ou « 4.0 », un ensemble de technologies assez disparates: certaines concernent désormais la majorité des entreprises, quand d'autres ne touchent encore qu'une minorité, soit du fait de particularités nationales, soit du fait de spécificités sectorielles. Certaines enfin sont littéralement émergentes et n'en sont qu'au tout début de leur diffusion au sein du tissu productif.

fig. 3.2

### Taux de réponses positives des PMI-ETI françaises à la question « Votre entreprise est-elle équipée ? »

	Pharmacie	Métallurgie	Prod. électronique	Autres transports	Aérospatial	Automobile	Ind. de process	Énergie	Divers	Ind. alimentaires
Le cloud	92	86	70	64	72	54	67	53	59	57
L'analytique avancée	8	12	22	27	26	7	18	50	18	13
L'apprentissage automatique ( <i>machine learning</i> )	17	11	14	4	-	6	11	25	12	8
L'intelligence artificielle générative	46	28	36	38	46	20	22	24	19	18
La réalité virtuelle	49	10	15	35	-	6	11	-	10	9
La réalité augmentée	40	11	10	15	14	6	5	-	9	2
La robotique	35	58	45	27	35	65	52	24	41	40
L'impression 3D	17	44	51	42	35	58	38	24	31	13
Les jumeaux numériques	18	6	13	4	16	4	5	-	9	5
L'informatique quantique	9	-	3	-	-	6	1	-	5	3
Les technologies propres ( <i>cleantech</i> )	18	13	16	37	27	21	21	20	14	16
L'Internet des objets	8	9	24	25	12	12	20	26	16	14
Le stockage d'énergie	11	36	10	22	37	13	10	-	12	22
La cybersécurité	100	92	84	68	65	87	83	100	76	78

**Légende des couleurs :**  0 10 20 30 40 50 60 80 70 90 100

**Source :** Enquête Ipsos pour La Fabrique de l'Industrie et McKinsey, menée auprès de 1 198 PMI-ETI en Allemagne, France et Italie, en juin-juillet 2025.

### UN RETARD DES ENTREPRISES FRANÇAISES PEU PRÉGNANT AUJOURD'HUI, MAIS PRÉVISIBLE À COURT TERME

Maintenant que nous avons présenté les taux d'équipement statiques relevés en 2025, il est important de les mettre en perspective en essayant de retracer des cinétiques d'adoption pour chacune des technologies, dans les trois pays étudiés puis dans les dix secteurs d'activité français analysés.

Pour ce faire, nous exploitons les différentes modalités de réponse à la question « votre entreprise est-elle équipée en telle technologie ? ». Les personnes interrogées pouvaient y répondre de plusieurs manières. Dans le premier cas, (« oui, mon entreprise est déjà équipée »), nous avons arbitrairement considéré l'année 2023 comme une date plausible à laquelle les entreprises étaient déjà équipées (soit deux ans avant la date de l'enquête). Dans le deuxième cas, (« l'entreprise devrait être équipée d'ici à douze mois »), nous avons considéré les entreprises comme

équipées en 2026 (soit douze mois à compter de la date d'enquête). Dans le troisième cas (« mon entreprise sera équipée d'ici à 2030 »), nous les avons considérées comme équipées en 2030. Enfin, dans le quatrième cas possible (« nous n'envisageons pas d'investir dans cette technologie avant 2030 »), nous avons arbitrairement reporté à 2035 la date plausible d'équipement.

Cette mise en perspective chronologique est importante car elle permet de mieux comprendre ce qu'est - ou n'est pas - le « retard français » dont on entend parfois parler en matière d'équipement 4.0.

Les résultats sont présentés dans la figure 3.3 ci-après. Il en ressort que, si les PMI-ETI françaises peuvent parfois être en retard sur leurs voisines en matière d'équipement, ce n'est sans doute pas là où on le dit le plus souvent. De nombreux commentateurs soulignent en effet régulièrement que l'industrie française est pénalisée par un parc machine vieillissant et un nombre de robots par salarié plus faible qu'ailleurs. Nous reviendrons plus loin sur ces deux points particuliers. Ce que révèle surtout notre enquête, c'est un retard d'équipement particulièrement manifeste dans les technologies de stockage d'énergie et les *cleantech*, ainsi que dans le domaine de l'Internet des objets. Non seulement ce décalage est déjà observable à l'heure où ces lignes sont imprimées, mais il devrait se maintenir, voire s'aggraver

à moyen terme si l'on tient compte des perspectives d'investissement exprimées par les entreprises.

Le dernier graphique de ce tableau (figure 3.3.o) montre en abscisse que, pour une majorité des technologies étudiées, les écarts entre pays auront tendance à s'accroître plutôt qu'à se résorber. En ordonnée, il apparaît sur ce même graphique que l'ampleur moyenne du progrès accompli sur la période étudiée se situe autour de 35 points de pourcentage dans une majorité de technologies, ce qui témoigne d'un rythme d'équipement soutenu.

*A contrario*, on observe deux technologies pour lesquelles les réponses obtenues laissent supposer une avance, notable et durable, des entreprises françaises sur leurs concurrentes immédiates : l'IA générative et l'informatique quantique. Mais, dans ce dernier cas, les taux d'équipement restent beaucoup plus faibles que pour les autres technologies étudiées.

Pour les neuf autres technologies, l'industrie française aura perdu du terrain tout au long de cette période (2023-2035), soit parce qu'elle aura perdu son avance initiale, soit parce qu'elle se sera laissé distancer. C'est en effet leur frilosité en matière d'investissement et leurs perspectives d'équipement très réduites à horizon 2030 qui distinguent le plus clairement les entreprises françaises dans cette enquête.

## DES RÉSULTATS CONFORTÉS PAR DES SOURCES EXTERNES

**L**ES ENQUÊTES ET ARTICLES PORTANT sur l'équipement des PMI et ETI en technologies 4.0 présentent parfois des résultats hétérogènes ou contre-intuitifs. Il est donc important de s'assurer que nos résultats sont confortés, totalement ou partiellement, par plusieurs sources étrangères.

Soulignons pour commencer que, dans un rapport récent intitulé *Technology Adoption Review* (UK Government, 2025), le gouvernement britannique rapporte que «le secteur [manufacturier] est encore lent à adopter des technologies éprouvées. Seuls 7 % des fabricants britanniques interrogés en 2024 se considéraient comme très informés sur les applications d'IA et 8 % du total avaient réussi à introduire l'IA et l'apprentissage automatique dans leurs activités. Le Royaume-Uni accuse également un retard sur les autres nations du G7 en matière d'adoption de la robotique, avec 74 % des PME britanniques du secteur opérant sans robots.» Ces chiffres sont assez cohérents avec ceux que nous avons nous-mêmes mis au jour.

Toujours au Royaume-Uni, les enquêtes conduites respectivement par Make UK & Autodesk (2024) et par Massini *et al.* (2025) permettent d'introduire des repères comparatifs dans les deux colonnes de droite de la figure 3.1. Ces valeurs complémentaires montrent au passage que le Royaume-Uni n'est pas spécialement en retard par rapport à ces trois voisins d'Europe continentale, contrairement à la préoccupation dont fait état son gouvernement.

La Banque européenne d'investissement mène par ailleurs des enquêtes régulières auprès des entreprises, et les interroge à cette occasion sur leur niveau d'équipement dans certaines technologies 4.0. Nous avons reproduit dans la figure ci-contre les réponses obtenues de la part des entreprises manufacturières, relativement aux quatre technologies renseignées dans l'enquête de la BEI (2025), en les comparant à nos propres résultats.

### Comparaison des taux d'équipement des entreprises avec les résultats de la BEI

	Robo- tique	Big data/ AI	Impres- sion 3D	Internet des objets
France (notre enquête)	48	29/26	37	33
France (BEI)	59	36	30	34
Allemagne (notre enquête)	20	33/26	38	53
Allemagne (BEI)	59	53	50	49
Italie (notre enquête)	26	25/12	31	48
Italie (BEI)	51	33	32	54

**Sources :** European Investment Bank (2025) ; enquête Ipsos pour La Fabrique de l'Industrie et McKinsey, menée auprès de 1 198 PMI-ETI en Allemagne, France et Italie, en juin-juillet 2025.

**Note 1 :** la BEI présente ses taux de réponse positive sur la base des répondants ayant préalablement indiqué connaître la technologie concernée. Nous avons opéré le même redressement pour une meilleure comparabilité des résultats, ce qui explique que les données présentées dans ce tableau diffèrent de celles de la figure 3.1.

**Note 2 :** l'enquête de la BEI est réalisée sur un échantillon de 12 000 entreprises de toutes tailles dans l'Union européenne. Les populations d'entreprises manufacturières interrogées sont respectivement de 213, 186 et 214 en France, Allemagne et Italie, contre 798, 200 et 200 dans notre enquête.

Cette comparaison appelle les remarques suivantes. *Primo*, les enquêtes présentent des résultats différents dans le domaine de la robotique : les taux d'équipement indiqués par la BEI sont globalement plus élevés que ceux que nous obtenons, de sorte que les trois pays apparaissent quasiment à parité dans le premier cas quand nos chiffres suggèrent une avance française. *Secundo*, les résultats de la BEI sont également plus élevés que les nôtres dans les domaines du big data et de l'intelligence artificielle, conduisant l'institution européenne à diagnostiquer une assez large avance allemande que nous n'observons pas de notre côté. *Tertio*, la BEI rapporte également une avance allemande en matière d'impression 3D, puisqu'elle observe un taux d'équipement supérieur au nôtre en Allemagne et inférieur au nôtre en France. *Quarto*, les données apparaissent cohérentes dans le domaine de l'Internet des objets, les deux enquêtes confortant le retard des entreprises françaises sur leurs voisines allemandes et italiennes.

Comme on le voit, des enquêtes rapprochées portant sur les mêmes questions et populations d'entreprises peuvent aboutir à des réponses sensiblement différentes. Dans sa notice méthodologique, la BEI rappelle en effet que les résultats fondés sur des échantillons comportent par définition une marge d'erreur. Il paraît donc sage, en comparant les résultats des différents pays, de les considérer comme des ordres de grandeur indicatifs à plus ou moins 6 à 8 points de pourcentage.<sup>20</sup>

En étendant ce travail de confrontation de nos résultats à d'autres travaux, on en vient assez vite à soulever une question spécifique. En effet, concernant le taux d'adoption des différentes technologies, on trouve plusieurs types de littérature : des articles académiques, des enquêtes menées par des cabinets de conseil et des articles de presse spécialisée produits à partir de sondages «rapides». Sans surprise, les taux d'équipement présentés par ces

20 – Dans l'enquête de la BEI, et dans le cas particulier des sous-populations d'entreprises manufacturières qui comportent autour de 200 individus, un taux de réponse de 30 % (ou de 70 %) doit être interprété moyennant une marge d'incertitude de plus ou moins 8,6 points de pourcentage en France, 7,2 points en Allemagne et 5,8 points en Italie. Un taux de réponse de 50 % est entaché d'une marge d'incertitude de plus ou moins 9,4 points de pourcentage en France, 7,8 points en Allemagne et 6,3 en Italie (incertitudes au seuil de 95 %).

derniers sont nettement plus élevés que les autres. Ainsi par exemple, pour le cas de l'impression 3D, Errera (2022) fait état d'un taux d'équipement de 74 % en France et de 67 % en Allemagne, quand nos chiffres sont respectivement de 37 % et 38 %. De même, il estime que 6 % seulement des entreprises françaises envisagent de ne pas s'équiper, contre 37 % dans notre propre enquête. La lecture de l'enquête réalisée sur ce sujet par le gouvernement britannique (DSIT, 2025), présentant des chiffres nettement plus proches des nôtres, nous conforte dans l'idée que certaines enquêtes rapides sont à considérer avec prudence : 17 % des PME indiquent avoir adopté l'impression 3D dans la région de Manchester, contre 11 % dans l'ensemble du Royaume-Uni (les chiffres étant respectivement de 20 % et 16 % pour les entreprises de toutes tailles).

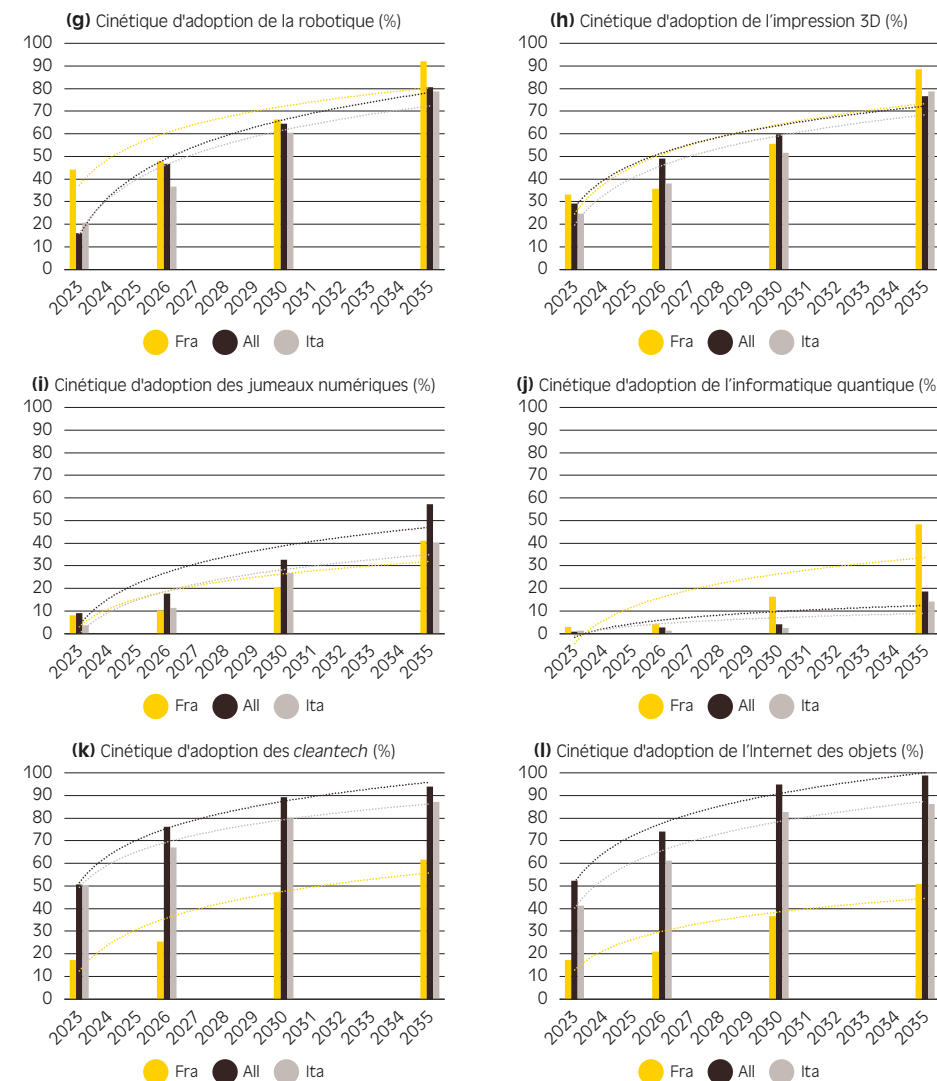
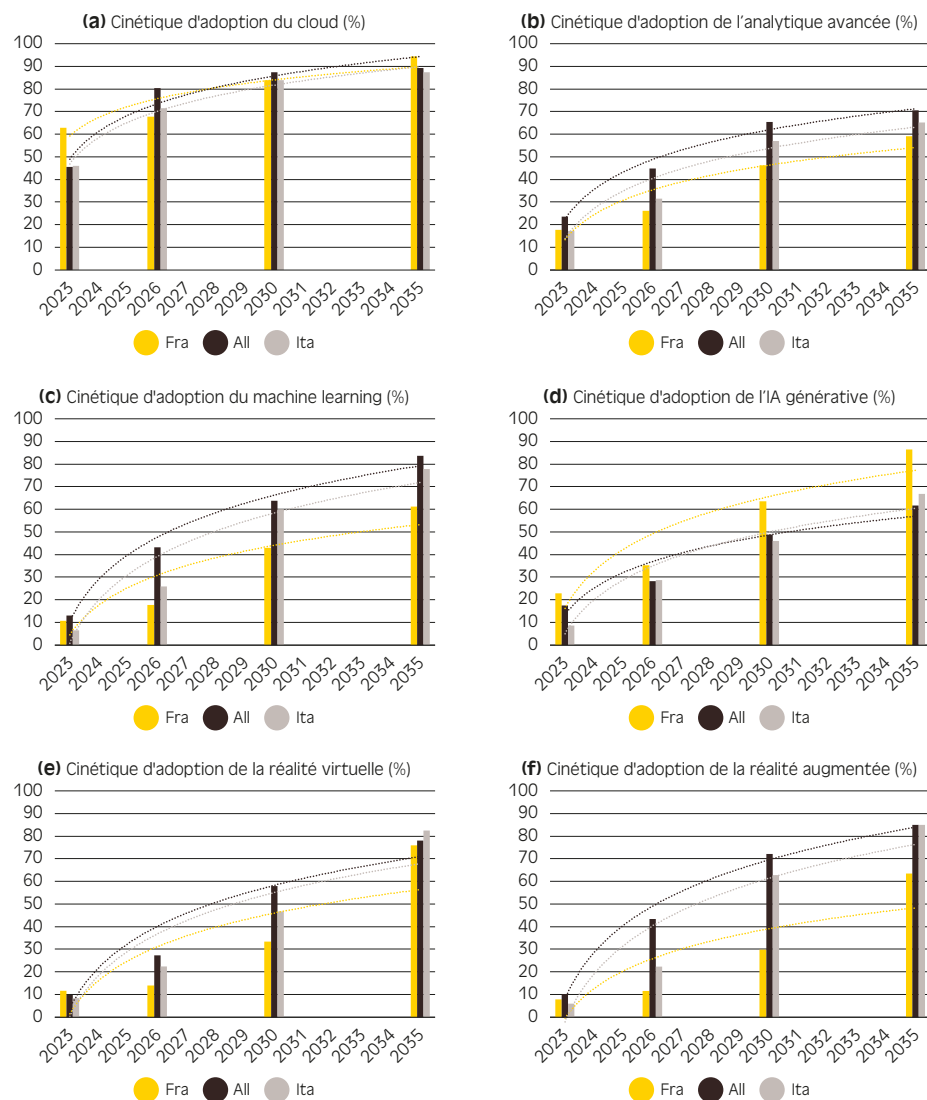
On observe le même décalage entre les sources, au sujet du machine learning et de l'IA. S'il faut en croire des billets de blog tels que Shrimali (2024) ou Ramirez (2025), le taux d'adoption du machine learning par les entreprises serait de 78 % dans le monde et de 72 % in Europe, le second article allant jusqu'à affirmer que, pour 72 % des entreprises étasuniennes, le «ML» est désormais intégré aux opérations IT standard et pas seulement une expérimentation au titre de la R&D. Or, dans notre enquête, les taux d'adoption indiqués, beaucoup plus prosaïques, oscillent autour de la barre des 10 %... La seconde enquête britannique susmentionnée (Make UK & Autodesk, 2024) tend à conforter nos propres observations. De son côté, IBM (2024) confirme que les taux d'adoption du machine learning, même au sein des plus grandes entreprises, sont aujourd'hui nettement plus réduits que ceux relatifs à l'IA générative.

Il en va de même concernant le recours à la réalité virtuelle ou augmentée : les enquêtes conduites au Royaume-Uni présentent des taux d'adoption très proches des nôtres (entre 8 et 16 %), assez loin des 34 % recensés par MGR (2025) auprès de 250 *top factories* dans le monde.

L'explication la plus probable à ce décalage, outre les marges d'erreur propres à chaque résultat d'enquête comme on l'a rappelé ci-dessus, tient sans doute à une habitude de la part des fournisseurs de technologies (qui peuvent être les annonceurs des blogs professionnels) de s'adresser en premier lieu à leurs clients et prospects, plus enclins à s'équiper.

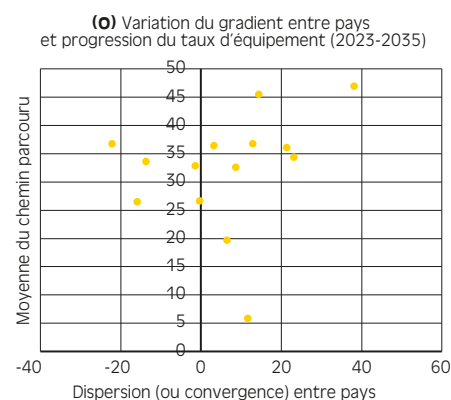
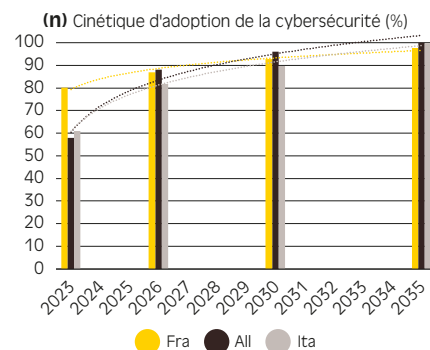
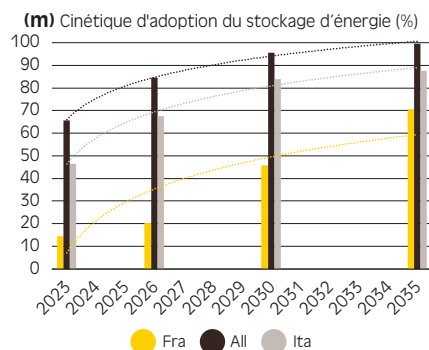
fig. 3.3

### Cinétique d'adoption des 14 technologies 4.0 en France, Allemagne et Italie (2023-2035)



Pour illustrer ce point, on reproduit dans la figure 3.4 ci-après certains résultats de la régression multinomiale détaillée dans l'annexe 2. Dans neuf technologies sur quatorze, on y lit que les entreprises françaises sont nettement (et très significativement)

moins susceptibles d'envisager un investissement dans les douze mois à venir que leurs comparables allemandes; elles sont au contraire nettement plus susceptibles de ne pas en prévoir avant 2030.



### DES CHOIX D'INVESTISSEMENT HÉTÉROGÈNES PARMIS LES SECTEURS D'ACTIVITÉ EN FRANCE

La figure 3.5 ci-après présente, dans le même esprit, la répartition des choix d'investissement des PMI-ETI françaises, dans chacune des quatorze technologies 4.0 et chacun des dix secteurs étudiés. Elle confirme les disparités importantes dans les dynamiques d'adoption de ces équipements. Le cloud et la cybersécurité montrent une convergence rapide vers un niveau d'équipement élevé. D'autres technologies comme les jumeaux numériques et l'informatique quantique restent en retrait, tant en matière d'équipement actuel que de projections d'investissement,

**Source:** Enquête Ipsos pour La Fabrique de l'Industrie et McKinsey, menée auprès de 1 198 PMI-ETI en Allemagne, France et Italie, en juin-juillet 2025

malgré quelques exceptions sectorielles (aérospatial et transports pour les jumeaux numériques; pharmacie, métallurgie et aérospatial pour l'informatique quantique).

La pharmacie se distingue à nouveau comme un secteur plutôt en avance sur les autres en matière d'adoption de l'IA générative, de la réalité virtuelle ou augmentée, de l'impresion 3D ou encore des *cleantech*.

fig. 3.4

### Extraits des résultats de la régression logistique multinomiale<sup>21</sup> présentée en annexe 2

	Cloud	Anal. av.	Mach. lear.	IA gén.	RV	RA	Robot.	Imp 3D	Jum. num.	Info quant.	Cleantech	IoT	Sto. En.	Cybersécu.
Pour chaque technologie ci-dessus, et toutes choses égales par ailleurs, les entreprises françaises ont... plus de chances que leurs comparables allemandes d'envisager un investissement d'ici à douze mois.														
Multiple	0,12	0,18	0,14	-	0,10	0,13	0,05	0,11	0,21	-	-	-	-	0,13
Significativité	***	***	***	-	***	***	***	***	**	-	-	-	-	***
Pour chaque technologie ci-dessus, et toutes choses égales par ailleurs, les entreprises françaises ont... plus de chances que leurs comparables allemandes de n'envisager aucun investissement avant 2030.														
Multiple	2,6	2,4	-	-	-	2,8	0,5	1,76	-	-	6,79	9,37	30,21	0,23
Significativité	.	*	-	-	-	*	*	*	-	-	***	***	***	**

**Seuils de significativité:**  
 (\*\*\*) = « effet très fortement significatif, au seuil de 1 % »;  
 (\*\*) = « effet fortement significatif, au seuil de 1 % »;  
 (\*) = « effet significatif au seuil de 5 % »;  
 (.) = « effet à la limite de la significativité, au seuil de 10 % ».

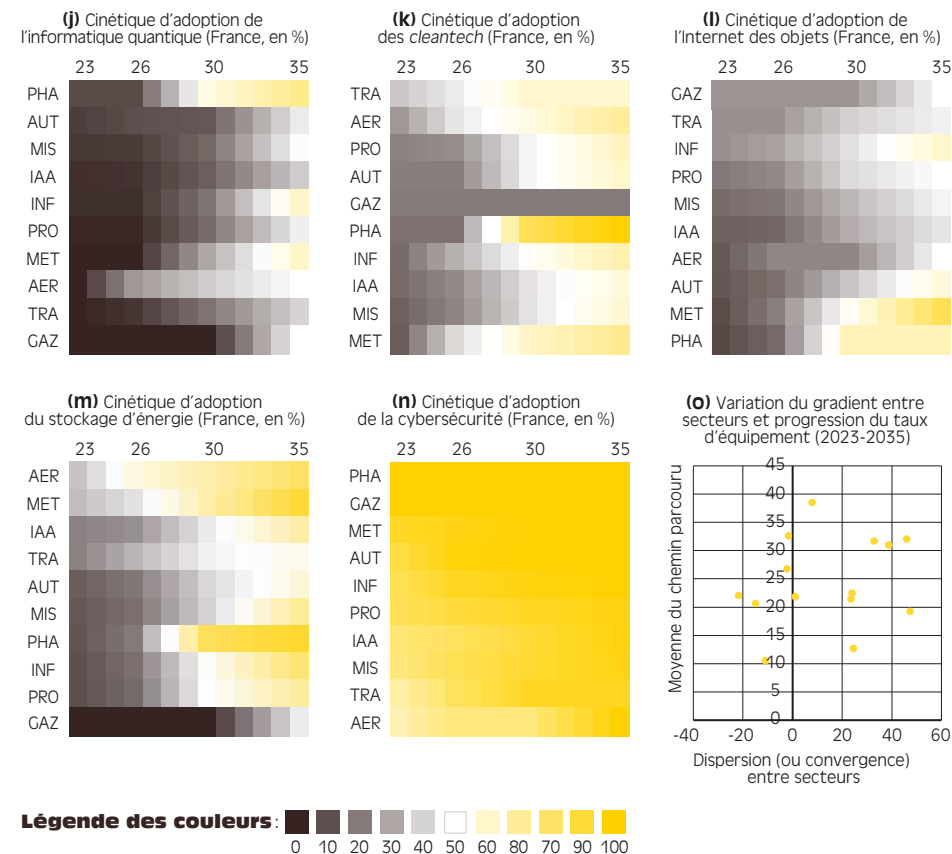
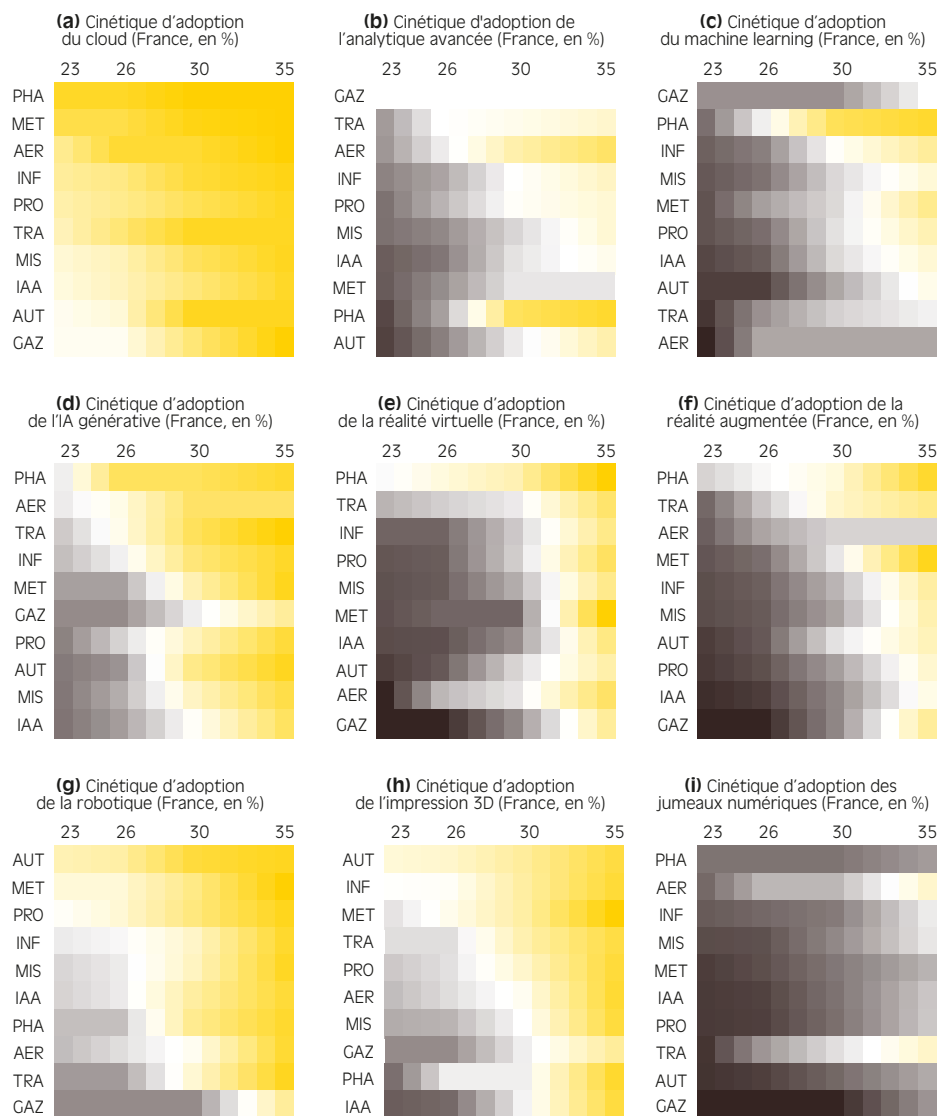
**Source:** Enquête Ipsos pour La Fabrique de l'Industrie et McKinsey, menée auprès de 1 198 PMI-ETI en Allemagne, France et Italie, en juin-juillet 2025.

**Note de lecture:** dans le domaine du cloud (première colonne), les entreprises françaises ont une probabilité 0,12 fois plus élevée (donc 8,3 fois plus faible) que les entreprises comparables allemandes d'avoir répondu qu'elles envisageaient d'investir d'ici douze mois. Ce premier effet est très fortement significatif (la probabilité d'avoir obtenu les mêmes réponses à l'enquête dans l'hypothèse d'une absence d'effet est inférieure à 1%). Elles ont par ailleurs une probabilité 2,6 fois plus élevée que ces mêmes entreprises allemandes d'avoir répondu qu'elles n'envisageaient aucun investissement dans cette technologie avant 2030. Ce deuxième effet est quant à lui faiblement significatif (la probabilité d'avoir obtenu les mêmes réponses à l'enquête en l'absence de tout effet se situe entre 5% et 10%).

<sup>21</sup>— Le principe de la régression logistique multinomiale est d'appliquer une transformation logistique (*logit*) à des variables catégorielles (sous la forme  $\log\left(\frac{p(Y=k)}{p(Y=réf)}\right)$ ), afin de pouvoir conduire une régression linéaire. Les coefficients de la régression (ou plus précisément les exponentielles de ces coefficients) sont des rapports de probabilité (*odds ratios*) que la variable dépendante prenne une valeur k plutôt qu'une valeur de référence.

fig. 3.5

### Cinétique d'adoption des 14 technologies 4.0 en France, par secteur (2023-2035)



Source: Enquête Ipsos pour La Fabrique de l'Industrie et McKinsey, menée auprès de 1 198 PMI-ETI en Allemagne, France et Italie, en juin-juillet 2025

À la fin de ce tableau (figure 3.5.o), nous avons présenté comme précédemment, pour chaque technologie, l'évolution du gradient d'équipement entre secteurs et la moyenne des progressions sectorielles de ces taux d'équipement entre 2020 et 2035.

Là encore, les cas de dispersion (*i.e.* d'accroissement du gradient entre les taux d'équipement) sont plus fréquents que les cas de convergence. Autrement dit, les disparités déjà

observées en matière d'équipement semblent destinées à s'accroître. Par ailleurs, la progression moyenne des taux d'équipement entre 2023 et 2035 est sensiblement plus faible pour ces secteurs français (autour de 20 points de pourcentage, figure 3.5.o) que pour les industries allemande et italienne (autour de 35 points, figure 3.3.o). Cela reflète à nouveau la frilosité des entrepreneurs français concernant leurs investissements à consentir à court terme.

# FOCUS

## Les méthodes de décompte et leur biais

**O**N PEUT MOBILISER DIFFÉRENTES MÉTHODES DE COMPTAGE pour renseigner le niveau d'adoption des technologies par de grandes populations d'entreprises.

L'approche suivie dans notre enquête est binaire : le représentant d'une entreprise interrogée déclare si celle-ci est ou n'est pas équipée. Cela est efficace pour apprécier la popularité des différentes technologies au sein des PMI-ETI et la fréquence avec laquelle elles envisagent d'investir.

On pourrait juger souhaitable de raisonner sur les montants investis, prédicteurs possibles des gains de productivité espérés des entreprises. Toutefois, les données financières de ces dernières ne peuvent pas être appariées avec des résultats d'enquête comme les nôtres sans se heurter au secret statistique et à l'anonymat des répondants.

Autre approche possible, certaines enquêtes renseignent les volumes des technologies installées (typiquement, le nombre de robots par salarié, souvent commenté dans le cas français). Mais ces nombres d'appareils ou de licences en place sont difficiles à obtenir par enquête auprès d'un échantillon assez large pour être représentatif, et montrent deux autres limites. La première est qu'ils n'indiquent pas le niveau de qualité du capital productif, dont on ne peut donc pas connaître les performances intrinsèques (numéro de génération d'un logiciel, âge moyen du parc machine, etc.). Pour lever cette difficulté, plusieurs auteurs (Dell *et al.*, 2014; Bergeaud *et al.*, 2017) recalculent dans leurs articles les âges moyens du parc machine installé, donnée qui n'est pas aisément accessible dans des bases publiques (et qui va de toute façon bien au-delà des seules technologies 4.0). Ces papiers sont maintenant un peu anciens mais ils concluent, autour des années 2010, à l'augmentation continue de l'âge moyen du parc machine et plus largement du capital productif installé en France comme dans la zone euro, au Japon et aux États-Unis, du fait du ralentissement des investissements

fig. a

### Robots installés pour 1 000 salariés

	Robots pour 1 000 salariés		Robots pour 1 000 salariés dans l'industrie		Robots pour 1 000 salariés dans les secteurs industriels de l'auto, l'électro et les machines	
	Installations 2024	Stock 2024	Installations 2024	Stock 2024	Installations 2024	Stock 2024
Chine	0,38	2,62	1,19	8,18	15,02	103,18
Japon	0,65	6,59	4,28	43,33	11,61	117,55
USA	0,20	2,30	2,58	29,71	9,27	106,69
Corée	1,14	14,57	6,99	89,56	15,86	203,11
Allemagne	0,59	6,11	3,60	37,20	9,35	96,61
Inde	0,01	0,08	0,13	0,77	0,97	5,60
Italie	0,34	3,95	2,24	25,70	9,51	109,37
Taiwan	0,50	7,99	1,94	30,76	8,10	128,35
Mexique	0,14	1,46	0,72	7,57	1,72	18,25
Espagne	0,25	..	2,42	..	13,83	..
France	0,16	2,01	1,74	21,99	11,29	142,35

Sources : IFR, OCDE, CEIC Data.

de la part des entreprises. La France n'y apparaît pas dans une situation singulière au regard des autres économies avancées.

La deuxième difficulté posée par les indicateurs de nombres de machines installées est qu'ils sont relativement sensibles aux biais de composition sectoriels. Reprenons ici le cas des robots industriels. Selon le dernier communiqué de presse de l'IFR (*International Federation of Robotics*)<sup>22</sup>, 542 000 robots industriels ont été mis en place dans le monde en 2025, principalement dans trois secteurs d'activité. Le premier secteur utilisateur est celui de la production de biens électriques et électroniques (28 % des cas référencés), suivi de très près par l'automobile (27%) et les biens d'équipement (19%).

Sur la base du nombre de robots installés par salarié, tous secteurs confondus, il est fréquent de lire que la France serait «en retard» en matière d'équipement robotique. Or si l'on tient compte du fait que ces robots sont essentiellement implantés dans les trois secteurs manufacturiers mentionnés ci-dessus, qui sont sous-représentés au sein de l'économie française, alors le positionnement de la France ne présente ni retard ni décrochage (*cf.* figure a).

Le travail de Castellani *et al.* (2022) apporte une confirmation très nette que le taux d'équipement appréhendé comme une mesure d'intensité est sujet à cet effet de composition. Dans leur cas, ils calculent un taux de consommation nette (*i.e.* production + importations - exportations) exprimé en dollars constants PPA pour 1000 salariés<sup>23</sup>, pour les équipements incorporant trois technologies : les robots industriels, la fabrication additive et l'Internet des objets. Ayant étudié la constitution de stocks d'équipements entre 2009 et 2018, ils mettent en lumière une concentration spécifique au cœur de l'Europe, et notamment en Allemagne, Autriche, Hongrie et République tchèque. Balland & Boschma (2021), qui travaillent sur le potentiel de déploiement de l'ensemble des technologies 4.0, parviennent à un tableau plus équilibré, à quoi Corradini *et al.* (2021) apportent une hypothèse d'explication : en Europe, la distribution spatiale des robots et de l'impression 3D tend à être très polarisée quand celle des big data et de l'IoT, moins spécifique à l'industrie, est plus homogène.

<sup>22</sup>— Dossier de presse du 25 septembre 2025 : « World Robotics 2025 ».

<sup>23</sup>— Les auteurs reprennent ici la méthode de Caselli & Coleman (2001) sur l'adoption des ordinateurs.

fig. b

### Population d'entreprises et valeur ajoutée brute (2023)

	IAA	PRO	PHA	MET	INF	AUT	AER	TRA	MIS	GAZ	Ensemble
<b>Entreprises 50 à 5000 salariés</b>											
France (pop)	1 118	1 029	95	1 066	483	216	44	58	1 473	73	5 655
France (%)	19,8%	18,2%	1,7%	18,9%	8,5%	3,8%	0,8%	1,0%	26,0%	1,3%	100,0%
Allemagne (pop)	2 931	3 451	179	4 372	2 114	554	64	128	3 347	721	17 861
Allemagne (%)	16,4%	19,3%	1,0%	24,5%	11,8%	3,1%	0,4%	0,7%	18,7%	4,0%	100,0%
Italie (pop)	1 156	1 654	163	2 125	832	338	38	181	2 746	145	9 378
Italie (%)	12,3%	17,6%	1,7%	22,7%	8,9%	3,6%	0,4%	1,9%	29,3%	1,5%	100,0%
<b>Valeur ajoutée brute (2023)</b>											
France (Mds€)	49,6	42,7	15,5	5,1	36,9	14,2	22,3	89,9	72,6	348,7	
France (%)	14,2%	12,2%	4,5%	1,5%	10,6%	4,1%	6,4%	25,8%	20,8%	100,0%	
Allemagne (Mds€)	60,4	120,2	25,7	27,8	232,0	155,9	16,9	160,3	98,3	897,5	
Allemagne (%)	6,7%	13,4%	2,9%	3,1%	25,8%	17,4%	1,9%	17,9%	11,0%	100,0%	
Italie (Mds€)	36,7	47,9	11,3	11,0	71,5	19,4	12,0	121,8	36,1	367,7	
Italie (%)	10,0%	13,0%	3,1%	3,0%	19,4%	5,3%	3,3%	33,1%	9,8%	100,0%	

Source : Eurostat. Traitements La Fabrique de l'industrie.

fig. c

### Taux de réponse positive à la question « votre entreprise est-elle équipée? », technologie par technologie

	France	Allemagne	Allemagne (dans l'hypothèse fictive de réponses identiques aux entreprises françaises dans chaque secteur)	Italie	Italie (dans l'hypothèse fictive de réponses identiques aux entreprises françaises dans chaque secteur)
Le cloud	63	46	68	46	68
L'analytique avancée, ou <i>advanced analytics</i>	18	23	17	17	17
L'apprentissage automatique, ou <i>machine learning</i>	11	13	11	6	11
L'intelligence artificielle générative	23	17	24	9	24
La réalité virtuelle	12	10	11	8	11
La réalité augmentée	8	10	8	6	9
La robotique	44	16	47	21	47
L'impression 3D, ou <i>additive manufacturing</i>	33	29	35	25	36
Les jumeaux numériques	8	9	7	4	7
L'informatique quantique	3	1	2	1	2
Les technologies propres, ou <i>cleantech</i>	17	51	17	50	16
L'Internet des objets, ou <i>Internet of Things</i>	17	52	16	41	16
Le stockage d'énergie	15	66	18	47	18
La cybersécurité	80	58	84	61	83

**Source :** Enquête Ipsos pour La Fabrique de l'Industrie et McKinsey, menée auprès de 1 198 PMI-ETI en Allemagne, France et Italie, en juin-juillet 2025.

**Lecture du tableau :** pour la première technologie, 45,5 % des entreprises allemandes ont répondu qu'elles étaient équipées. Si on applique les taux de réponse positive relevés, secteur par secteur, auprès des entreprises françaises à la structure sectorielle de la population des entreprises allemandes de 50 à 5 000 salariés, alors le taux moyen fictif de réponse positive devrait être de 68 %. L'écart relevé dans l'enquête entre les taux moyens de réponse en France et en Allemagne (respectivement 63 % et 46 %) n'est donc pas imputable à un biais de composition sectorielle entre les deux pays mais bien à des réponses différentes entre les deux pays à secteur donné.

Notre méthode de décompte « binaire » est en apparence plus frustrante que celle du nombre de machines installées mais elle est aussi beaucoup moins sensible à ces effets de composition sectorielle, comme le montrent les figures b et c. En effet, puisqu'on se limite aux entreprises de plus de 50 et de moins de 5 000 salariés, les répartitions sectorielles des populations d'entreprises sont extrêmement proches en France, en Italie et en Allemagne, plus encore que si l'on raisonne en valeur ajoutée (*cf.* figure b).

De ce fait, la correction qui consiste à appliquer les poids sectoriels des populations d'entreprises observées en Allemagne et en Italie aux taux de réponse des entreprises françaises aboutit à un biais de composition très réduit (*cf.* figure c). Tout se passe comme si les écarts de réponse relevés dans l'enquête - par exemple 22 points de plus en France qu'en Allemagne sur le taux de réponse positive concernant l'équipement en cybersécurité - reflètent fidèlement les réponses des entreprises et non un effet de distorsion sectorielle.

# Point de vue

par **Elena Prodi**

## Au-delà des incitations financières, proposer un accompagnement à la transformation : l'expérience des centres de compétences allemands de l'Industrie 4.0

### **Elena Prodi**

Chercheuse titulaire à l'université San Raffaele de Rome, chercheuse associée au CIMET – Centre national d'études économiques appliquées d'Italie

DANS DE NOMBREUX PAYS, l'adoption des technologies 4.0 a été principalement encouragée par des interventions politiques basées sur des incitations, visant à soutenir les investissements des entreprises. Ces politiques ont généralement pris la forme de subventions, de crédits d'impôt ou de dispositifs spécifiques d'amortissement, laissant les entreprises en grande partie libres de décider quelles technologies adopter, selon leur propre appréciation. Bien que ces mesures aient contribué à une augmentation globale des niveaux d'investissement, elles ont également généré une incertitude et une certaine désorientation de la part des entreprises. En particulier, une grande part de ces dernières – notamment parmi les petites et moyennes entreprises – ont eu du mal à identifier des gains tangibles d'efficacité et de productivité associés aux différentes technologies numériques, et à comprendre quelles solutions seraient les plus adaptées à leur processus de production, à leur structure organisationnelle et à leur modèle économique. Dans ce contexte, l'absence de directives structurées a souvent limité l'efficacité des incitations purement monétaires, réduisant leur capacité à favoriser une transformation numérique significative et durable. En effet, bien que les subventions et incitations fiscales restent un outil de politique publique largement utilisé, elles sont souvent mobilisées par des entreprises qui auraient de toute façon entrepris ces investissements.

### **Les bénéfices d'un accompagnement complet et structuré**

Dans cette perspective, l'expérience allemande des « centres de compétences Industrie 4.0 » offre un enseignement éclairant, tant pour les entreprises que pour les décideurs : l'adoption réussie de technologies de fabrication avancées ne se réduit pas à de pures incitations financières. Les preuves empiriques à cet égard (Prodi *et al.*, 2022) confirment le rôle crucial des politiques complémentaires soutenant les entreprises tout au long de leur parcours de transformation numérique. Plutôt que de se concentrer exclusivement sur la réduction du coût d'adoption des technologies, le gouvernement allemand a en effet mis en place un réseau de « centres de compétences ». Tirant parti de la collaboration entre acteurs publics et privés, ces centres ont aidé les PME à comprendre comment et pourquoi

certaines technologies de l'industrie 4.0 étaient importantes pour elles, compte tenu de leurs spécificités.

Un point central du retour d'expérience de ces centres de compétences est que les entreprises améliorent le bénéfice de leur investissement à l'issue d'un parcours structuré de transformation, qui intègre le choix de technologies, le changement organisationnel et la formation des salariés. En effet, le déploiement efficace des technologies 4.0 nécessite souvent une réorganisation des processus internes, de nouveaux mécanismes de coordination et la mise à niveau des compétences des travailleurs, ainsi que l'adoption de nouveaux modèles managériaux et organisationnels, afin de générer des gains de productivité. En ce sens, la transformation numérique est intrinsèquement un processus sociotechnique : les gains de productivité émergent de l'interaction entre technologies, ressources humaines et pratiques organisationnelles, plutôt que de la technologie seule.

Les centres de compétences allemands ont tenté de jouer le rôle d'initiateurs d'un tel processus sociotechnique, en se plaçant comme intermédiaires entre les objectifs politiques et la réalité des entreprises. Grâce à des services de conseil, des projets de démonstration et des évaluations personnalisées, ils aident les entreprises et notamment les PME à identifier les technologies les plus pertinentes. Ce rôle d'orientation est particulièrement important face à la grande diversité de solutions regroupées sous le label « Industrie 4.0 ». Les entreprises peinent souvent à naviguer dans cette complexité et à évaluer les retours attendus des différentes technologies, surtout lorsque les pressions commerciales à court terme dominent la prise de décision stratégique.

### **L'accompagnement débute par la sensibilisation**

Nos travaux soulignent également l'importance de politiques publiques visant à sensibiliser les entreprises, ces dernières pouvant sous-estimer les bénéfices potentiels des technologies numériques. Elles sont en effet nombreuses à se concentrer sur leur fonctionnement habituel sans prêter une attention

suffisante aux possibilités d'améliorer leur productivité, leur flexibilité ou leur résilience grâce aux technologies 4.0. À cet égard, les centres de compétences contribuent non seulement au transfert de technologie mais aussi au processus d'apprentissage qui façonne les choix stratégiques des entreprises.

Enfin, l'observation du cas allemand suggère que les différences de taux d'adoption entre secteurs doivent être interprétées avec prudence. La pertinence et même l'effet sur la productivité de certaines technologies varient intrinsèquement d'un secteur à l'autre, en raison de différences dans leurs processus de production, leurs configurations organisationnelles et leur positionnement sur le marché. Certaines technologies peuvent révéler une applicabilité limitée ou des rendements marginaux dans certains contextes. De ce fait, des taux d'adoption plus faibles n'indiquent pas nécessairement des retards ou des faiblesses, mais peuvent refléter une hétérogénéité structurelle des besoins technologiques et des trajectoires d'innovation spécifiques au secteur. Reconnaître explicitement cette dimension peut aider à éviter des interprétations politiques trop homogènes et soutenir des politiques industrielles plus ciblées et contextuelles.

Dans l'ensemble, l'expérience des centres de compétences allemands démontre que favoriser l'adoption de l'industrie 4.0 nécessite de dépasser une attention trop étroitement centrée sur les incitations monétaires, au profit d'approches politiques intégrées combinant orientation technologique, soutien organisationnel et formation de la main-d'œuvre. Ce n'est qu'à travers de telles stratégies de transformation globales que les entreprises peuvent pleinement réaliser le potentiel de productivité des technologies numériques.

# 4

Chapitre

## À la recherche des phénomènes à l'œuvre

*On exploite à présent les données descriptives dont nous disposons pour comprendre les choix des entreprises d'adopter ou non telle ou telle technologie. Les effets de la taille des entreprises, de leur effort de réorganisation et de leur ouverture à l'export sont manifestes.*

### LES PLUS PETITES ENTREPRISES SONT NETTEMENT MOINS ÉQUIPÉES QUE LES AUTRES

Les méthodes générales d'analyse, utilisables sur l'ensemble des données, ne conduisant à aucun résultat probant (*cf.* encadré), il faut tester un à un l'effet des différents paramètres connus sur le niveau d'adoption des technologies par les entreprises. C'est l'objet des paragraphes suivants. On convoquera en tant que de besoin les résultats d'une régression multinomiale dont la présentation complète fait l'objet de l'annexe 2 à ce rapport.

Notre enquête confirme empiriquement une hypothèse forte de la littérature rappelée au chapitre 1 : le taux d'équipement et la propension à s'équiper se répartissent très inégalement selon la taille des

entreprises. Comme le montre la figure 4.1 ci-après, cet effet est perceptible quasiment sans exception pour chacune des quatorze technologies, aussi bien concernant le taux d'équipement aujourd'hui constaté que les projets d'investissement envisagés à court ou moyen terme. L'enquête de Massini *et al.* (*op. cit.*) le confirme pour les PMI-ETI britanniques.

On observe certes ponctuellement (par exemple pour la robotique ou l'impression 3D) un taux d'équipement actuel un peu inférieur dans les entreprises de plus de 1000 salariés par rapport à celles de la tranche de 250 à 1000 salariés. Des données complémentaires seraient nécessaires pour comprendre les raisons de ces résultats inhabituels, qui peuvent tenir à une connaissance du terrain plus parcellaire de la part des répondants dans les entreprises de très grande taille.

## L'ÉCHEC DES ANALYSES SYSTÉMIQUES

**U**N PREMIER ENSEMBLE D'ANALYSES SYSTÉMIQUES, conduites sur l'ensemble des données, a produit des résultats négatifs<sup>24</sup>. Cela signifie qu'il n'est pas possible de dégager des comportements tendanciels de la part de sous-groupes repérables d'entreprises face aux différentes technologies ni, ce qui revient au même, des similitudes entre divers sous-ensembles de ces technologies au regard des caractéristiques des entreprises qui les adoptent.

Puisque ces technologies ne sont donc pas adoptées en même temps par des acteurs de même type, cela suggère l'existence de phénomènes spécifiques marqués, soit de dépendance sectorielle, soit de dépendance à d'autres variables (taille, âge, ouverture à l'export, etc.) qu'il faut mettre au jour.

Pour les mêmes raisons, il n'est pas possible non plus d'établir de corrélation univoque et significative entre les taux d'équipement des entreprises et les variations nationales ou sectorielles de la productivité (cf. figure ci-contre). Calculer un coefficient de corrélation entre deux séries de nombres est évidemment toujours possible, mais ces tentatives aboutissent à des coefficients de signe et d'ampleur très variables, si bien que cette analyse descriptive n'apparaît pas robuste. Le premier chapitre l'a montré : les technologies 4.0 apportent indubitablement un supplément de productivité aux entreprises qui les adoptent, sous certaines conditions, mais la démonstration de cet effet réclame un outillage économétrique et un accès aux caractéristiques financières des entreprises, qui sortent du cadre de la présente étude.

Quoi qu'il en soit, les disparités entre entreprises d'un même pays ou d'un même secteur, face au choix d'investir dans telle ou telle technologie 4.0, sont trop marquées pour autoriser des conclusions généralisantes.

<sup>24</sup> – En particulier, l'analyse des covariances et l'analyse en composantes multiples des réponses ne procurent aucun résultat utile (dans le cas de l'ACM, par exemple, les deux premières dimensions expliquent péniblement 6% de la variance des observations).

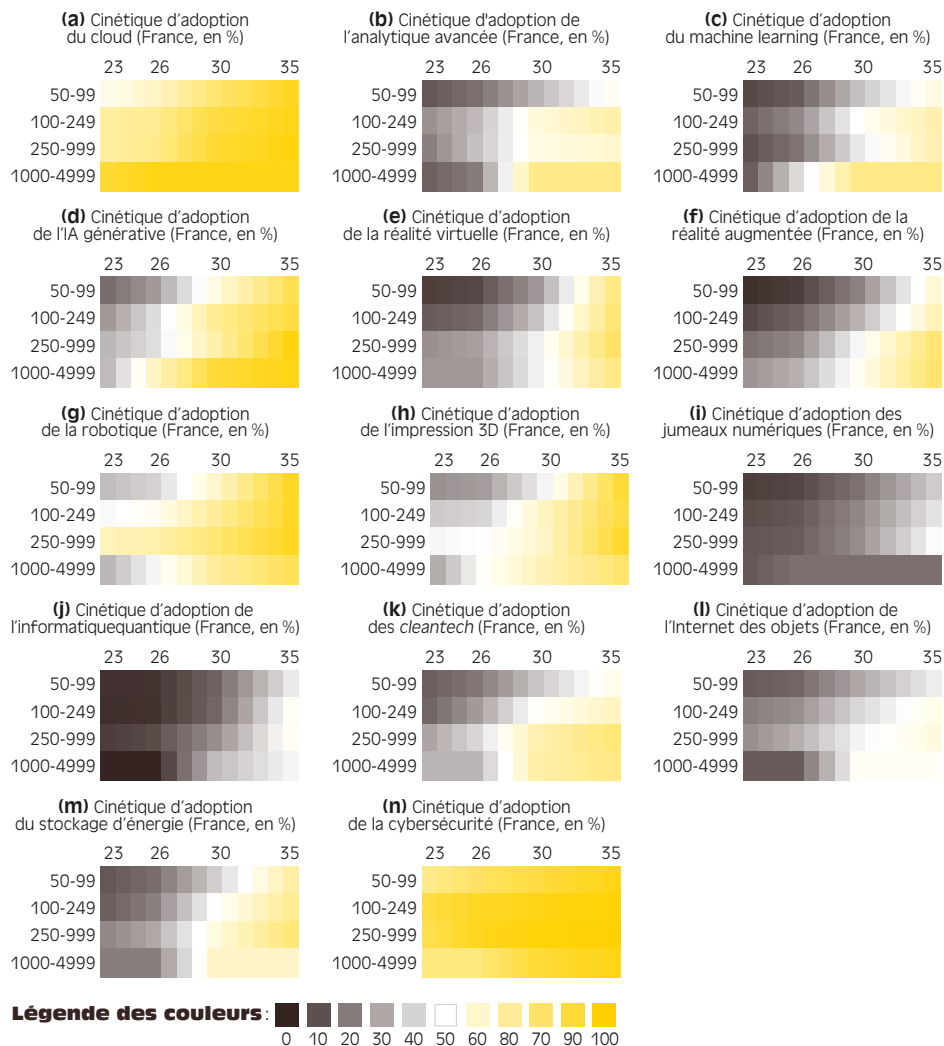
### Croissance annuelle de la productivité réelle du travail par heure travaillée (en %)

	2010- 2023	2010- 2019	2010- 2014	2014- 2019	2019- 2021	2021- 2023
Industries alimentaires	-1,21	0,49	-0,11	0,98	1,89	-11,30
Industries de process	1,16	3,12	4,47	2,06	-5,49	-0,68
Industrie pharmaceutique	3,27	3,48	3,14	3,76	7,36	-1,58
Métallurgie	-7,68	1,34	1,03	1,58	-18,09	-31,61
Produits informatiques, électroniques et optiques, équipements électriques, machines	1,53	2,09	3,56	0,93	-0,31	0,87
Industrie automobile	0,01	0,85	-1,35	2,65	-0,85	-2,88
Industrie aéronautique et spatiale	1,23	0,21	-0,58	0,85	-3,78	11,48
Autres matériels de transport	1,23	0,21	-0,58	0,85	-3,78	11,48
Autres industries manufac- turières	0,78	1,02	1,90	0,33	-0,11	0,58
Électricité, gaz, vapeur et air conditionné	-4,12	0,11	2,60	-1,83	-8,47	-17,29
France	0,81	1,64	2,09	1,27	0,27	-2,33
Allemagne	1,63	1,50	1,73	1,31	2,53	1,30
Italie	0,81	1,18	1,34	1,06	1,25	-1,30

Sources: Eurostat et Insee. Traitements La Fabrique de l'industrie.

fig. 4.1

### Cinétique d'adoption des 14 technologies 4.0 en France, par classe d'effectifs des entreprises



**Source:** Enquête Ipsos pour La Fabrique de l'Industrie et McKinsey, menée auprès de 1 198 PMI-ETI en Allemagne, France et Italie, en juin-juillet 2025.

**Note:** s'agissant du cloud, 54 % des entreprises de 50 à 99 salariés se sont déclarées déjà équipées, 7 % envisagent de l'être sous 12 mois (ce qui portera la part des entreprises équipées à 61 %), 17 % l'envisagent d'ici 2030 (ce qui portera le taux à 78 %), etc. Pour les entreprises de 1000 à 5000 salariés, ces taux de réponses étaient respectivement de 90 %, 6 % et 0 %.

fig. 4.2

### Extraits des résultats de la régression logistique multinomiale présentée en annexe 2

	Cloud	Anal. av.	Mach. lear.	IA gén.	RV	RA	Robot.	Imp 3D	Jum. num.	Info quant.	Cleantech	IoT	Sto. En.	Cybersécu.
Pour chaque technologie ci-dessus, et toutes choses égales par ailleurs, les entreprises comprenant entre 100 et 249 salariés ont... plus de chances d'avoir répondu ne pas envisager d'investissement à horizon 2030 plutôt que de s'être déclarées déjà équipées, par comparaison avec celles comportant entre 50 et 99 salariés.														
Multiple	0,54	0,39	-	0,55	0,59	0,52	0,63	0,52	-	3,22	0,53	0,59	0,57	0,49
Significativité	*	***	-	*	*	*	*	***	-	*	*	.	*	.
Pour chaque technologie ci-dessus, et toutes choses égales par ailleurs, les entreprises comprenant entre 250 et 999 salariés ont... plus de chances d'avoir répondu ne pas envisager d'investissement à horizon 2030 plutôt que de s'être déclarées déjà équipées, par comparaison avec celles comportant entre 50 et 99 salariés.														
Multiple	-	0,27	-	-	0,24	0,22	0,51	0,54	-	-	0,33	0,36	0,37	-
Significativité	-	**	-	-	***	***	*	*	-	-	**	*	**	-
Pour chaque technologie ci-dessus, et toutes choses égales par ailleurs, les entreprises comprenant entre 1000 et 4999 salariés ont... plus de chances d'avoir répondu ne pas envisager d'investissement à horizon 2030 plutôt que de s'être déclarées déjà équipées, par comparaison avec celles comportant entre 50 et 99 salariés.														
Multiple	-	-	-	0,13	0,09	0,13	-	0,13	-	-	-	-	-	-
Significativité	-	-	-	*	***	**	-	**	-	-	-	-	-	-

**Seuils de significativité:**

(\*\*\*) = « effet très fortement significatif, au seuil de 1 % » ;  
 (\*\*) = « effet fortement significatif, au seuil de 1 % » ;  
 (\*) = « effet significatif au seuil de 5 % » ;  
 (.) = « effet à la limite de la significativité, au seuil de 10 % ».

**Source:** Enquête Ipsos pour La Fabrique de l'Industrie et McKinsey, menée auprès de 1 198 PMI-ETI en Allemagne, France et Italie, en juin-juillet 2025. Traitements La Fabrique de l'industrie.

**Note:** dans le domaine du cloud (première colonne), les entreprises françaises comprenant entre 100 et 250 salariés ont une probabilité 0,54 fois plus élevée (1,85 fois plus faible) que les plus petites (50 à 100 salariés) d'avoir répondu qu'elles n'étaient pas encore équipées et qu'elles ne l'envisageaient pas à horizon 2030. Cet effet est significatif (la probabilité d'avoir obtenu les mêmes réponses à l'enquête dans l'hypothèse d'une absence d'effet est comprise entre 1 % et 5 %).

Ces observations peuvent être traduites en chiffres, grâce aux résultats de la régression multinomiale présentée en annexe 2, et dont la figure 4.2 ci-devant reproduit quelques éléments remarquables. Ils concernent tous la probabilité d'occurrence de la réponse «mon entreprise n'envisage pas d'investir à horizon 2030», en prenant la plus petite classe d'effectifs comme catégorie de référence. À la seule exception de l'informatique quantique, tous les *odds ratios* significatifs présentés sont nettement inférieurs à l'unité, ce qui illustre bien que les plus petites sont surreprésentées parmi les entreprises réfractaires à l'idée d'investir dans ces technologies.

Les résultats ont également été testés en fonction de l'âge des entreprises. Contrairement au point précédent, ils s'avèrent peu significatifs, ce qui explique qu'ils ne soient pas représentés graphiquement. Autant la taille de l'entreprise semble donc constituer un prédicteur très fiable de sa propension à s'équiper en technologies 4.0, autant son âge apparaît quasiment indépendant de ce choix.

**L'INVESTISSEMENT DANS LES TECHNOLOGIES 4.0 COÏNCIDE ÉTROITEMENT AVEC LES PLANS DE TRANSFORMATION DES ENTREPRISES**

La revue de littérature du chapitre 1 a également souligné le rôle décisif de

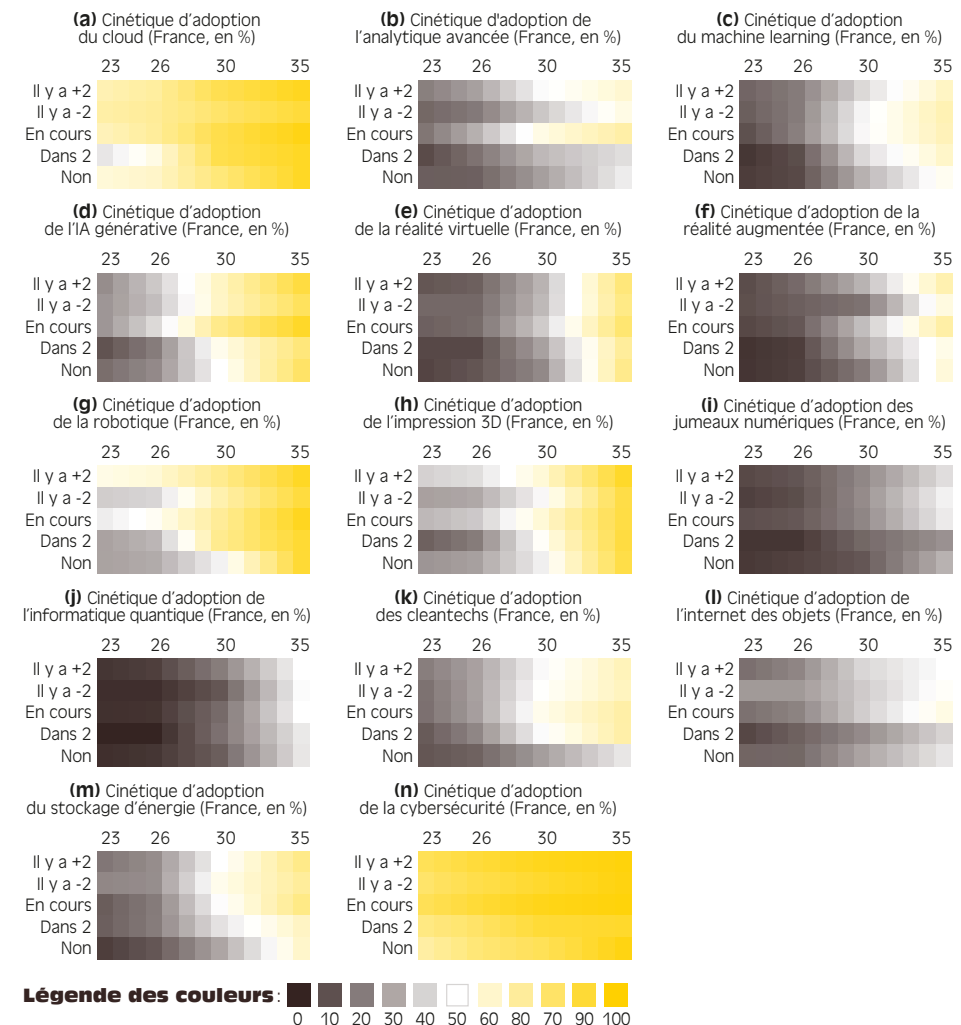
l'organisation des entreprises pour que celles-ci puissent observer une amélioration sensible de leur productivité à la suite d'un investissement dans les technologies de l'industrie du futur.

Fort logiquement, nos résultats d'enquête révèlent un effet complémentaire: le taux de réponses positives concernant l'équipement actuel des entreprises et leurs perspectives d'investissement à court ou moyen terme, dans chacune des technologies, est sensiblement influencé par le fait de savoir si elles ont récemment mené - ou envisagent de mener - un plan de transformation de leurs processus de production, ou au contraire si ce sujet n'a pas encore été mis à l'ordre du jour. La nature exacte de cet effet varie d'une technologie à l'autre, comme on peut le voir dans la figure 4.3 ci-contre, mais il est toujours significatif.

Cette observation semble importante. Elle suggère que, pour inciter efficacement les entreprises à s'équiper en moyens de production modernes, il convient probablement de privilégier une approche duale, à la fois technologique et organisationnelle, plutôt que d'imaginer des politiques publiques uniquement centrées sur des outils mis en avant pour leurs mérites techniques.

Traduisant ces observations en chiffres, la figure 4.4 présente les résultats remarquables de la régression multinomiale détaillée dans l'annexe 2. Tous les multiples de

**fig. 4.3**  
**Cinétique d'adoption des 14 technologies 4.0 en France, selon la date du plan d'amélioration des performances de production**



**Source:** Enquête Ipsos pour La Fabrique de l'Industrie et McKinsey, menée auprès de 1 198 PMI-ETI en Allemagne, France et Italie, en juin-juillet 2025.

**Lecture de l'axe des ordonnées:** à la question «Votre entreprise a-t-elle mis en œuvre un plan de transformation pour améliorer ses performances de production?», les cinq groupes d'entreprises ont répondu respectivement «Oui, il y a plus de deux ans.», «Oui, il y a moins de deux ans.», «Oui, il est en cours.», «Non, elle va le faire dans les deux ans à venir.» et «Non, elle ne l'a pas fait et l'envisage pas.»

fig. 4.4

### Extraits des résultats de la régression logistique multinomiale présentée en annexe 2

	Cloud	Anal. av.	Mach. lear.	IA gén.	RV	RA	Robot.	Imp 3D	Jum. num.	Info quant.	Cleantech	IoT	Sto. En.	Cybersécu.
Pour chaque technologie ci-dessus, et toutes choses égales par ailleurs, les entreprises dont le plan de transformation est en cours ont... plus de chances d'envisager un investissement d'ici à douze mois que leurs comparables ayant réalisé une telle réorganisation il y a plus de deux ans.														
Multiple	-	2,77	2,13	-	2,36	-	1,81	-	-	-	-	-	2,32	-
Significativité	-	***	*	-	*	-	.	-	-	-	-	-	*	-
Pour chaque technologie ci-dessus, et toutes choses égales par ailleurs, les entreprises qui n'ont pas encore mené de plan de transformation mais qui en envisagent un d'ici à deux ans ont... plus de chances d'envisager un investissement d'ici à 2030 que leurs comparables ayant réalisé une telle réorganisation il y a plus de deux ans.														
Multiple	2,06	7,47	-	2,40	-	5,02	7,21	7,71	4,77	-	2,47	16,69	30,08	14,01
Significativité	*	***	-	*	-	**	***	***	*	-	**	***	***	***
Pour chaque technologie ci-dessus, et toutes choses égales par ailleurs, les entreprises qui n'ont pas encore mené de plan de transformation et qui ne l'envisagent toujours pas ont... plus de chances d'avoir répondu ne pas envisager d'investissement à horizon 2030.														
Multiple	3,22	4,63	4,72	2,79	2,40	3,95	4,85	2,15	2,26	-	5,97	6,27	13,83	25,77
Significativité	***	***	***	**	*	**	***	**	.	-	***	***	***	***

**Seuils de significativité:**

- (\*\*\*) = « effet très fortement significatif, au seuil de 1 % »;
- (\*\*) = « effet fortement significatif, au seuil de 1 % »;
- (\*) = « effet significatif au seuil de 5 % »;
- (.) = « effet à la limite de la significativité, au seuil de 10 % ».

**Source:** Enquête Ipsos pour La Fabrique de l'Industrie et McKinsey, menée auprès de 1 198 PMI-ETI en Allemagne, France et Italie, en juin-juillet 2025. Traitements La Fabrique de l'industrie.

**Note:** dans le domaine de l'analytique avancée (deuxième colonne), les entreprises françaises dont le plan de transformation est en cours ont une probabilité 2,77 fois plus élevée que celles dont celui-ci remonte à plus de deux ans d'avoir répondu qu'elles n'étaient pas encore équipées mais qu'elles l'envisageaient d'ici douze mois. Cet effet est très fortement significatif (la probabilité d'avoir obtenu les mêmes réponses à l'enquête dans l'hypothèse d'une absence d'effet est inférieure à 1 %).

probabilité (*odds ratios*) y sont supérieurs à 2, parfois grandement.<sup>25</sup> Pour résumer ce tableau, retenons que, par comparaison avec les entreprises ayant accompli un plan de transformation il y a plus de deux ans, celles dont le plan de transformation est en cours sont plus susceptibles de ne pas être encore équipées mais de le prévoir d'ici à douze mois, celles dont le plan de transformation est prévu sous deux ans sont plus susceptibles d'envisager un investissement avant 2030, et celles qui ne prévoient pas de réorganisation plus susceptibles de ne pas prévoir d'investissement non plus.

### LES ENTREPRISES OUVERTES À L'EXPORT SONT LES PLUS ÉQUIPÉES

Pour finir, nous avons testé l'influence de la nature des marchés des entreprises sur leur propension à s'équiper en technologies 4.0. Nous disposons de trois informations à ce sujet: la répartition de leur activité entre B2B et B2C, la part de leur chiffre d'affaires à l'export et la part de ce même chiffre d'affaires réalisée pour le secteur de la défense. Dans les trois cas, les résultats sont relativement significatifs mais suivent des schémas différents (*cf.* figure 4.5 - pour préserver la lisibilité des figures, nous n'avons

présenté que des sous-ensembles aléatoires de technologies).

L'effet le plus manifeste est celui des exportations. Pour chacune des quatorze technologies, le taux des entreprises équipées ou prévoyant de l'être d'ici à 2030 est clairement et fortement croissant avec le taux d'ouverture à l'export, et tout particulièrement à l'extrémité du spectre: les entreprises qui exportent 100 % de leur production se démarquent par des taux d'équipement sensiblement plus élevés.

Un effet similaire est perceptible concernant la part du chiffre d'affaires concernant la défense, même s'il est moins universel: pour certaines technologies en effet (*e.g.* réalité virtuelle, stockage d'énergie, IA générative), la courbe a plutôt un profil en U. Autrement dit, les entreprises combinant des marchés civils et de défense, qui représentent de loin le profil majoritaire au sein de la base industrielle de défense (Desjeux, 2025), ont alors des comportements d'investissement plus frileux que la moyenne. Pour d'autres technologies au contraire (machine learning, impression 3D, informatique quantique), l'activité de défense apparaît comme un prédicteur significativement croissant de la propension à s'équiper.

<sup>25</sup>— Il faut relever ici que, pour des raisons de secret statistique, nous ne disposons pas de variables de données relatives à la santé financière des entreprises. Il est possible qu'une régression équivalente introduisant ce paramètre comme variable de contrôle aboutirait à des effets moins importants ou moins significatifs de la conduite des plans de transformation comme déterminant des choix d'investissement.

L'effet le moins net est celui de la part de l'activité réalisée en B2B. La plupart des courbes sont plates ou quasiment plates (réalité augmentée, impression 3D), synonymes d'absence de causalité. Certaines ont un profil légèrement en U (jumeaux numériques), quand d'autres au contraire ont plutôt une forme en cloche (cleantech, cloud).

**Les entreprises s'estimant « non concernées », une singularité française**

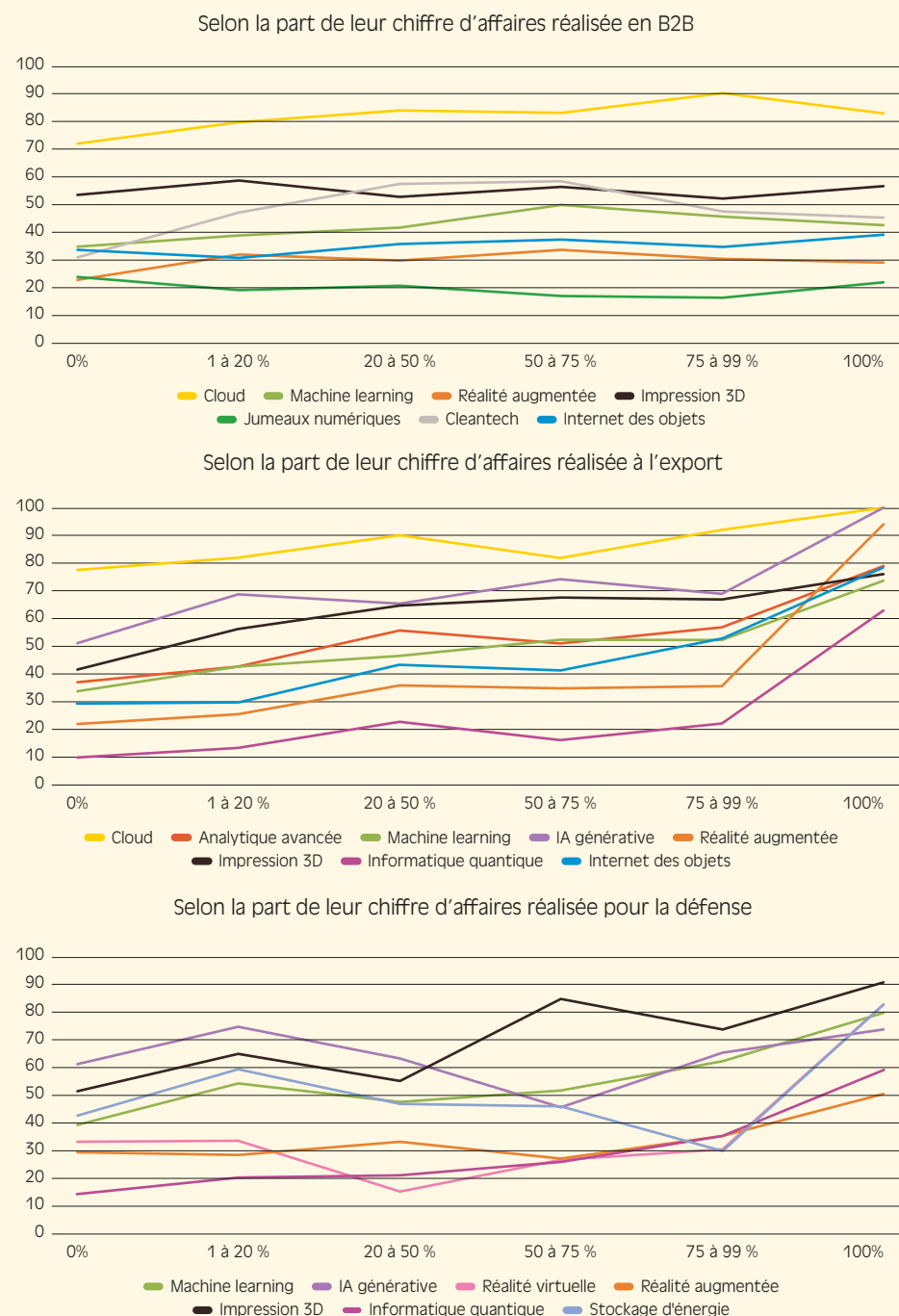
La dernière série d'observations concerne les explications données par les entreprises qui déclarent ne pas souhaiter investir dans les différentes technologies. Plusieurs hypothèses leur sont proposées. Il est frappant de constater que l'hypothèse d'une pénurie de compétences adaptées et celle d'un manque de ressources financières, pourtant fréquemment invoquées dans la littérature, reçoivent dans notre enquête des taux de réponses relativement faibles. À l'inverse, et ce pour toutes les technologies étudiées, elles peuvent être nombreuses à répondre que la technologie en question ne présente pour elles ni intérêt ni pertinence (cf. figure 4.6).

Plus précisément, ces entreprises que l'on pourrait qualifier de « réfractaires », au sens où elles ne semblent pas envisager d'investissement même dans l'hypothèse où leur accès aux compétences et aux ressources financières était facilité,

fig.  
4.5

**Part des PMI-ETI françaises équipées ou envisageant de s'équiper d'ici à 2030 (%)**

**Source:** Enquête Ipsos pour La Fabrique de l'Industrie et McKinsey, menée auprès de 1 198 PMI-ETI en Allemagne, France et Italie, en juin-juillet 2025.





Les entreprises "réfractaires" à un investissement dans ces nouvelles technologies sont nettement plus nombreuses en France qu'en Italie et plus encore qu'en Allemagne.



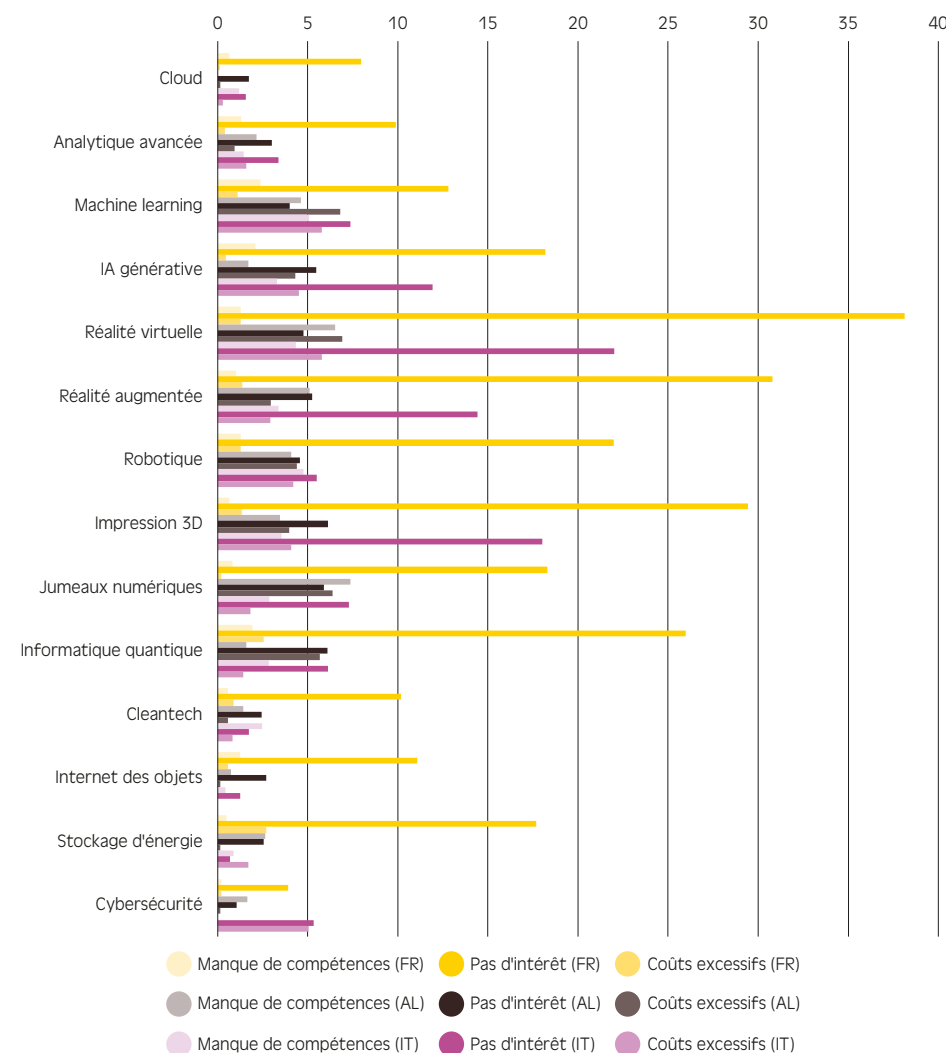
sont nettement plus nombreuses en France (où elles peuvent représenter 30 à 40% des répondants pour la réalité virtuelle, la réalité augmentée ou encore l'impression 3D) qu'en Italie et plus encore qu'en Allemagne (où ce taux ne dépasse jamais 6%).

Ce résultat a de quoi intriguer, car il semble aller à rebours du caractère générique et transversal que l'on prête aux technologies 4.0. Peut-être faut-il y voir le signe que la bonne compréhension de ces technologies et de leurs multiples applications possibles n'a pas encore touché l'ensemble des entreprises du tissu productif français, et que des campagnes de sensibilisation ou de pédagogie pourraient être utiles.

On peut trouver ce profil de réponses dans d'autres enquêtes, et notamment auprès des PME britanniques interrogées sur le cas spécifique de l'impression 3D (DSIT, 2025): 55% des entreprises déclarent que cette technologie ne les concerne pas, le taux descendant à 40% pour les PME manufacturières. Par contraste, seuls 5% et 3% respectivement invoquent un manque de compétences ou d'accès au financement.

fig. 4.6

Part des PMI-ETI indiquant ne pas envisager de s'équiper faute de compétences, de ressources financières ou de pertinence de la technologie (%)



Source: Enquête Ipsos pour La Fabrique de l'Industrie et McKinsey, menée auprès de 1 198 PMI-ETI en Allemagne, France et Italie, en juin-juillet 2025.

# Point de vue

par **Daniel Richet**

## L'impact de la diffusion des technologies avancées sur la productivité et la compétitivité de l'industrie française

### Daniel Richet

Directeur général du Centre technique des industries mécaniques (Cetim)

**L**a transformation numérique et technologique de l'industrie manufacturière constitue aujourd'hui l'un des principaux leviers de compétitivité pour les entreprises françaises. Dans un contexte de concurrence internationale accrue, de transition énergétique et de recomposition des chaînes de valeur, les technologies avancées jouent un rôle déterminant. Leur diffusion inégale au sein de l'industrie française est toute fois source de disparités de performance. Ces constats, observés par l'enquête de La Fabrique de l'industrie, convergent avec l'expérience du Cetim, qui contribue depuis soixante ans à renforcer la compétitivité du secteur des industries mécaniques. Ce dernier occupe une place stratégique dans le paysage manufacturier français, avec 156 milliards d'euros de chiffre d'affaires, 11 000 entreprises et près de 600 000 emplois, irrigant l'ensemble des chaînes de valeur structurées par les filières industrielles nationales.

### Une industrie française hétérogène face à la technologie : deux modèles correspondant à deux dynamiques productives.

Au cours des dix dernières années, le Cetim a participé activement aux initiatives lancées en France sur l'industrie du futur. Il a suivi plusieurs milliers d'entreprises sur leur parcours de transformation, dont une large majorité de TPE, PME et ETI manufacturières. Il a constitué un observatoire portant sur 6 700 entreprises accompagnées. Cet observatoire confirme un paysage industriel français hétérogène face à la technologie, correspondant à deux positions au sein des chaînes de valeur et à deux dynamiques productives. D'un côté, des entreprises, offreuses de solutions, fabricantes d'équipements et de composants complexes. De l'autre, des sous-traitants transformateurs, dépendants de donneurs d'ordre multiples et privilégiant une logique de service axée sur la qualité, le coût et le délai.

Les travaux menés par Philippe Aghion montrent que l'impact macroéconomique des entreprises dépend de leur proximité à la frontière technologique<sup>26</sup>. Dès lors, il est intéressant d'éclairer

<sup>26</sup> – Dans la doctrine schumpétérienne, la frontière technologique représente le niveau le plus avancé d'innovation disponible dans une économie à un moment donné. Elle correspond à l'état de l'art technologique issu de vagues successives d'innovations.

la proximité des entreprises vis-à-vis de cette frontière ainsi que la nature des technologies adoptées qui renforce cette position. Sur le panel considéré, les entreprises situées à proximité de la frontière technologique sont majoritairement des fournisseuses de solutions. Elles sont présentes à l'export et exposées à une forte concurrence internationale. Ces entreprises investissent massivement et en continu (moyennant des cycles de deux à trois ans, sur des TRL de 6 à 7), dans les technologies les plus avancées, pour renforcer la différenciation de leurs produits, raccourcir les cycles de conception et stimuler l'export. Leur logique d'adoption se concentre sur les solutions permettant d'améliorer la flexibilité de conception et l'innovation. L'impression 3D, l'analytique avancée et les *cleantech* y sont particulièrement présentes. Ces technologies ont un impact indirect mais puissant sur la productivité.

Les entreprises plus éloignées de cette frontière sont pour la plupart des sous-traitants transformateurs. Leurs investissements visent principalement l'excellence opérationnelle : robotisation ciblée, acquisition de machines multifonctions, intégration numérique progressive. Il s'agit, pour beaucoup, d'entreprises primo-accédantes aux technologies avancées (moyennant des TRL de 7 à 9) et cherchant des solutions clés en main adaptées à leur taille et à un parc de machines souvent ancien (l'âge moyen est de 17 ans), ainsi qu'à un système d'information fragmenté. Cela rend particulièrement complexe le basculement vers un modèle d'industrie 4.0 sans schéma directeur structurant. Ces entreprises sont engagées dans des dynamiques d'adoption incrémentale, de rattrapage technologique. Pour elles, la robotique, l'IIoT ou encore les technologies de supervision sont les principaux leviers d'amélioration de la productivité. Ces technologies génèrent des gains immédiats : réduction des arrêts de production, diminution des rebuts, augmentation du temps utile machine, sécurisation des procédés et fiabilité accrue. Moins influentes sur le plan macroéconomique, ces transformations technologiques sont pour autant indispensables au maintien de leur compétitivité au sein des filières.

Cette segmentation peut être rapprochée de celle présentée dans l'étude (*cf. Andrews et al.*), qui met en évidence les écarts de productivité entre les entreprises situées « à la frontière mondiale » et les autres considérées comme « retardataires ».

## Le champ technologique soutenant la productivité est très large

Les accompagnements déployés sur le terrain par le Cetim pour soutenir et accélérer la transformation technologique reposent sur un portefeuille composé, pour les deux tiers, de « macrobriques » relevant du référentiel national de l'industrie du futur de l'AIF<sup>27</sup> et, pour un tiers, de briques scientifiques plus profondes issues des sciences physiques, des sciences de la mécanique et de l'ingénierie : matériaux, tribologie, vibro-acoustique, dynamique des fluides, etc. Les 14 thématiques technologiques retenues par l'enquête présentée dans cet ouvrage constituent donc un sous-ensemble de ce référentiel : elles couvrent 13 des 70 macrobriques.

## Le taux d'adoption des technologies dépend des dynamiques productives et du positionnement des entreprises sur les chaînes de valeur

Sur les 6 700 entreprises qu'il a accompagnées, le Cetim a isolé un échantillon de 2 550 lui permettant d'éclairer la nature et l'intensité des technologies qu'elles adoptent. Sur cet échantillon, 1 000 entreprises (dont 55 % sont des TPE, PME et ETI et 45 % des grandes entreprises) ont été identifiées comme opérant à proximité de la frontière technologique, caractérisées par une capacité d'innovation plus forte, un investissement plus marqué dans le capital immatériel et une organisation propice aux processus d'innovation. *A contrario*, 1 550 entreprises se situent plus loin de la frontière, avec des modèles de croissance davantage tirés par l'adoption incrémentale de technologies parvenues à maturité et des gains d'efficacité organisationnelle, dans une logique de rattrapage (« catching-up »).

### L'adoption technologique des 1 000 entreprises proches de la frontière

Un tiers des accompagnements réalisés par le Cetim sur cette population est directement rattaché aux 14 macrobriques technologiques retenues par l'étude de La Fabrique de l'industrie, les plus récurrentes étant l'analytique avancée, l'impression 3D métallique (notamment sur des usages critiques pour les acteurs de l'énergie, du nucléaire, de l'aéronautique, de la défense ou encore du médical), les *cleantech* (produits et systèmes de production), les solutions innovantes en robotique, les jumeaux numériques, l'IIOT et le machine learning.

Un tiers embarque d'autres macrobriques du référentiel de l'AIF, et principalement les matériaux et les procédés innovants, l'assemblage et le soudage assistés et les contrôles non destructifs innovants, la continuité numérique, le monitoring des procédés et le smart data.

Le troisième tiers porte sur l'application poussée des fondamentaux des sciences et technologies de l'ingénierie associées aux produits : matériaux, fatigue, étanchéité, compréhension de la performance par la caractérisation et les essais mécaniques, vibro-acoustique, calcul et simulation multiphysique, multi-échelle et des fondamentaux revisités à la lumière de la numérisation et des impératifs de la transition énergétique et environnementale.

### L'adoption technologique des 1 550 entreprises plus éloignées de la frontière

Cette seconde moitié du panel est composée à 90 % de PMI, accompagnées par le Cetim dans des programmes sectoriels ou régionaux. Un tiers de ces accompagnements est directement rattaché aux 14 macrobriques technologiques retenues par l'enquête, les plus fréquentes étant la robotique et les équipements avancés de production, les *cleantech*, l'Internet des objets, les solutions logicielles distribuées (SaaS) exploitant la technologie du cloud et intégrant progressivement des applicatifs d'intelligence artificielle. En outre, la cybersécurité émerge comme une problématique impulsée par les donneurs d'ordre et les filières.

Les deux autres tiers embarquent d'autres macrobriques du référentiel de l'AIF, et principalement l'optimisation de l'organisation de la production et le lean manufacturing, d'autant plus présents dans les filières concernées par le sujet des montées en cadence, comme l'aéronautique et la défense. Dans une très large proportion, ces projets incluent le déploiement de solutions digitales en support aux processus opérationnels. L'intégration de procédés innovants de production arrive en second rang, incluant également la simulation des procédés (FAO/CFAO). On notera que ces adoptions technologiques sont très souvent conduites au travers une réflexion stratégique et organisationnelle et la définition d'une stratégie RSE.

### Les programmes engagés en France auraient avantage à se prolonger et à élargir leur champ d'incitation au-delà de la simple modernisation de l'outil de production.

Depuis dix ans, en France, les politiques publiques ont principalement soutenu des programmes centrés sur la modernisation de l'outil de production, orientés par une vision « Usine du futur » et de ce fait totalement focalisés sur les équipements et les machines : robotisation, automatisation, connectivité, consolidation des systèmes d'information industriels. Ces initiatives ont permis une remise à niveau significative des fondamentaux opérationnels. De nombreuses expérimentations d'appropriation technologique ont été couronnées de succès, que ce soit dans le cadre d'actions sectorielles (GIFAS), technologiques (programme RobotStartPME) ou territoriales (programmes régionaux).

Néanmoins, ces dispositifs sont restés globalement focalisés sur la fabrication 4.0, sans promouvoir une approche systémique complète de l'industrie du futur, qui implique de repenser simultanément à l'échelle des chaînes de valeur, l'innovation sur le produit, sa conception, sa production, sa commercialisation et son cycle de vie, et qui représente un potentiel très important de gains de productivité. Certaines démarches récentes, notamment les approches intégrées menées conjointement par Bpifrance et le Cetim, constituent une évolution structurante dans ce sens. Elles associent stratégie, organisation, compétences et technologies, et incluent un diagnostic visant à accompagner une transformation stratégique, environnementale, numérique et industrielle plus profonde des PME.

Comme le souligne le travail de La Fabrique de l'industrie, le risque d'un ralentissement de l'investissement productif en France est important, alors même que depuis dix ans le pays a réalisé des efforts considérables pour moderniser son socle technique. Cet effort pourrait pourtant devenir une source d'avantage compétitif si la dynamique de soutien à l'investissement technologique était à la fois prolongée et ciblée, pour assurer soit une montée en gamme hors coût des produits et biens d'équipement, à l'échelle des chaînes de valeur industrielles et des filières, soit une capacité renforcée à générer de l'innovation et à structurer des programmes de recherche partenariale permettant d'ouvrir de nouveaux espaces de différenciation technologique.

C'est cette stratégie qu'entend suivre la Chine au travers son « Plan de mise en œuvre pour la transformation numérique de l'industrie (2025-2030) »<sup>28</sup>, doté d'un montant d'intervention publique évalué à 130 milliards d'euros. Ce plan vise à renforcer la compétitivité des 14 filières industrielles stratégiques du pays et à accompagner la montée en gamme technologique de 130 000 PMI qui en constituent les chaînes de valeur primaires. D'autres plans de même nature sont repérables dans d'autres pays, par exemple en Corée du Sud. Face à cette dynamique internationale, il est préoccupant d'observer que les politiques incitatives françaises sont au point mort, faute de marge de manœuvre budgétaire.

L'effort de montée en gamme technologique, nécessaire à l'atteinte d'un objectif de réindustrialisation de l'économie, peut difficilement être entretenu sans un soutien public de masse tourné vers les PMI. En effet, en France, sur les 265 000 entreprises du secteur manufacturier, seules 2100 sont des ETI ou des grands groupes, c'est-à-dire comptant plus de 250 salariés.

Quatre objectifs méritent en particulier d'être considérés en priorité. Il s'agit d'une part de poursuivre la diffusion des technologies avancées de production, parvenues à maturité, pour renforcer la productivité et la souveraineté des filières. Cela inclut l'automatisation du contrôle qualité et de la traçabilité,

l'intégration de l'IA dans la robotique, le développement de procédés avancés comme la fabrication additive, la démocratisation des jumeaux numériques, l'IA générative pour la capitalisation et le transfert des savoir-faire.

Il convient ensuite de soutenir la montée en gamme, y compris celle des entreprises de transformation primaire, en les accompagnant sur un meilleur positionnement dans les chaînes de valeur. Les donneurs d'ordres se tourneront en effet de plus en plus vers des fournisseurs capables d'assumer la responsabilité « clés en main » de pièces ou de sous-ensembles, c'est-à-dire d'en assurer la conception, la validation et la production. Cette trajectoire appelle une transformation organisationnelle (par l'intégration d'une fonction étude par exemple), des compétences et technologique.

Il faut, en parallèle, soutenir l'effort d'innovation produits - sur les plans scientifique, technique et technologique - pour en favoriser la compétitivité hors coût sur le marché international. Ce levier est resté dans l'angle mort des politiques publiques 4.0 mises en place ces dix dernières années. Pour autant, il est de nature à rapprocher les entreprises de la frontière technologique, chère à Philippe Aghion. Il représente le plus fort gisement d'impact macroéconomique.

Quatrièmement et enfin, il est nécessaire que les entreprises intègrent pleinement les enjeux de transformation environnementale et énergétique (TEE), qui deviendront des paramètres déterminants de compétitivité dans les prochaines décennies : décarbonation des procédés, écoconception, économie circulaire, sobriété énergétique, substitution de matériaux et de composés chimiques polluants tels que les PFAS.

# 5

Chapitre

## Des difficultés supplémentaires pour les PMI

*Ce chapitre a pour objet d'entrer plus en profondeur dans les résultats de l'enquête, et de souligner les enseignements utiles que l'on peut en tirer, au-delà des grandes corrélations précédentes. Il ne s'appuie pas sur une analyse statistique particulière mais sur une lecture « à plat » des données détaillées.*

### « ÊTRE À LA POINTE DE LA TECHNOLOGIE APPORTE UN AVANTAGE CONCURRENTIEL MAJEUR »

Une petite moitié des répondants se déclare tout à fait d'accord avec cette affirmation dans les trois pays étudiés: la France, l'Allemagne et l'Italie. La différence entre ces trois populations se joue sur les avis mitigés, c'est-à-dire ceux qui sont « assez d'accord » et « pas vraiment d'accord ». De sorte que, finalement, il y a presque dix points d'écart entre la France et les deux pays voisins, entre le sous-total de ceux qui sont d'accord et celui de ceux qui ne le sont pas. En d'autres termes, la répartition « d'accord/pas d'accord » est proche de 75/25 en France quand elle serait plutôt de 85/15 dans les deux autres pays.

Il n'y a pas de différence régionale flagrante en France quant à la répartition des avis sur cette question. En Allemagne non plus, si l'on raisonne à grands traits. Toutefois, la proportion de répondants en Allemagne de l'Est qui se disent « tout à fait d'accord »

est nettement plus faible, au profit de ceux qui se disent « assez d'accord ». En Italie, le décalage entre le nord et le sud est très frappant. La répartition est quasiment de 90/10 dans le centre et le nord du pays, mais de 50/50 au sud.

En France, la proportion de ceux qui se disent d'accord est autour de 90% dans la pharmacie, l'automobile et l'aérospatial. Elle descend à 70% voire au-dessous dans la métallurgie et le ferroviaire-naval, et à 30% dans l'énergie. Entre les deux, elle est de 80% dans les industries de process et les produits électroniques. En Italie, la part des avis favorables baisse à 60% dans l'agroalimentaire.

En France, la proportion de ceux qui sont d'accord augmente avec la taille de l'entreprise, d'environ 70% à environ 95% depuis les plus petites entreprises jusqu'aux plus grandes. On ne note pas de telle différence par taille d'entreprise en Allemagne. Le cliché est plus flou en Italie. *A contrario*, en France toujours, on n'observe aucun effet significatif de l'âge de l'entreprise.

La corrélation des réponses est très nette avec le fait d'avoir mené un plan de transformation d'entreprise - ou d'envisager de le faire - pour améliorer les performances de production. En France, les entreprises qui en ont mis un en place ou qui en ont prévu un avant deux ans sont d'accord à 80% avec cette affirmation, contre à peine 60% des entreprises qui n'en ont pas prévu, et qui représentent tout de même presque 20% des répondants. L'écart est encore plus prononcé parmi les répondants allemands... mais ils sont moins de 4% à ne pas en avoir réalisé ni prévu (idem en Italie, où ils sont moins de 9%). Il semble que la proportion de répondants se disant d'accord avec cette affirmation soit la plus élevée dans les entreprises qui ont une répartition équilibrée de leurs activités entre B2B et B2C. Mais les écarts restent mesurés dans l'ensemble et ne sont sans doute pas statistiquement significatifs. Cette proportion est également la plus élevée pour les entreprises qui réalisent environ 50% de leur chiffre d'affaires à l'export. Le fait d'être à 0% ou à plus de 75% tend plutôt à faire baisser la proportion de réponses favorables. Il en va de même pour la part de l'activité destinée à la défense: là encore, les différences sont relativement faibles et peu significatives.

Une interprétation possible est que, pour une entreprise, le fait d'être multi-produits ou multi-marchés la place dans un système de contraintes plus fortes. La littérature ne permet pas d'établir que les entreprises hybridant plusieurs types de

marchés (civils et militaires, ou B2B et B2C) investissent davantage que les autres dans les technologies 4.0. En revanche, il est établi que les entreprises intervenant à la fois sur les marchés civils et militaires sont globalement plus innovantes et plus intensives en R&D (Acosta *et al.*, 2018) et que les entreprises multi-produits, faisant face à des enjeux organisationnels accrus, gagnent (ou perdent) davantage de productivité dans leurs processus de gestion de gamme et de la qualité (Caselli *et al.*, 2026).

### LES CONTRAINTES FINANCIÈRES À L'INVESTISSEMENT

On dénombre 60% de répondants français qui s'estiment freinés dans l'adoption de nouvelles technologies du fait de contraintes budgétaires ou de capacités de financement. En particulier, 45% indiquent que leur principal frein réside dans la difficulté d'accès à un financement extérieur. Ces taux ne sont respectivement que de 25% et 30% chez nos voisins.

Il n'y a pas de différence notable entre les grandes régions françaises sur la première question. En revanche, le sentiment d'un accès difficile au financement extérieur est sensiblement plus élevé en Île-de-France, où il dépasse la barre des 50% des répondants. Les répondants allemands sont un peu plus nombreux à souligner les problèmes d'autofinancement dans le nord-ouest du pays, mais cette proportion dépasse tout juste le tiers

des répondants. En Italie, l'avis des répondants est très homogène d'une région à l'autre.

Ce verrou financier est ressenti de façon particulièrement élevée en France au sein des industries de process (72%) et n'est au contraire confirmé que par 50% des répondants dans le naval-ferroviaire et même par 45% des répondants dans la production de produits électroniques. Les autres secteurs ont des avis assez homogènes sur le sujet. Le sujet spécifique de l'accès au financement extérieur est exprimé par 75% des répondants dans le secteur pharmaceutique. En France, le verrou de l'autofinancement est ressenti de manière croissante à mesure que l'on progresse vers les plus grandes entreprises (la distribution est plus hétérogène quant à l'accès au financement extérieur). C'est en partie observable dans les deux autres pays, mais les chiffres ne sont pas significatifs.

En France, les répondants qui confirment un problème d'autofinancement ou d'accès au financement extérieur sont sensiblement surreprésentés parmi ceux qui n'ont pas encore réalisé de plan de transformation, mais qui en envisagent un sous deux ans. C'est exactement pareil en Italie et en Allemagne.

Dans les trois pays, la proportion des répondants qui attestent un problème d'autofinancement est maximale sur la tranche 50-75% à l'export et minimale au contraire sur la tranche 75-99%. *A contrario*, en France, cette

proportion tend à croître avec l'exposition au marché de défense (qui ne représente pas un marché significatif pour les répondants des deux autres pays).

### LA DIFFICULTÉ D'ACCÈS AUX COMPÉTENCES, UN OBSTACLE MOINS IMPORTANT QUE LES PRÉCÉDENTS

Dans les trois pays, l'accès aux compétences nécessaires pour investir dans la technologie est un problème jugé moins important que l'accès au financement. La proportion des répondants qui le considèrent comme un frein à l'investissement atteint un tiers en France et 20% chez nos voisins. Il n'y a pas de différence régionale en France ni en Allemagne sur cette question. Dans le sud de l'Italie, le problème de l'accès aux compétences est ressenti un peu plus durement.

### L'ÉVOLUTION RAPIDE DES TECHNOLOGIES ET LA PRÉFÉRENCE POUR L'ATTENTISME

Les trois quarts des répondants en Allemagne et en Italie jugent que les technologies changent trop vite pour que leur entreprise puisse être tout le temps à la pointe; alors que cette proportion n'est que de 40% en France. De manière complémentaire, les trois quarts des répondants français estiment préférable d'attendre avant

d'investir dans une technologie pour mieux s'assurer de son impact et de sa valeur, alors que les répondants qui partagent cet avis ne sont qu'une moitié en Italie et moins encore en Allemagne. Les entreprises françaises seraient donc moins empressées que leurs voisines face au progrès technique.

En France, dans la production de biens électroniques, 43% des répondants estiment que la technologie avance trop vite et 60% (le taux minimum) qu'il faut attendre d'être sûr de la valeur d'une technologie avant d'investir. Dans l'industrie aéronautique et spatiale, ils sont tout juste un tiers à juger que la technologie avance trop vite, et la totalité préfère attendre d'être sûr de la valeur avant d'investir. Dans l'automobile comme dans l'alimentaire, les proportions sont respectivement de 50 et 80%.

En France, les entreprises de moins de 250 salariés et dont le chiffre d'affaires est inférieur à 100 millions d'euros sont surreprésentées parmi celles qui estiment que le progrès est trop rapide ou qu'il vaut mieux attendre avant d'investir.

Plus une entreprise est impliquée dans le B2C, plus elle attend d'être sûre de la valeur d'une technologie pour investir.

## TECHNOLOGIES PROPRES AUX DONNÉES

Toutes les technologies n'ont pas la même notoriété: le cloud est mieux connu que le machine learning et l'IA générative, eux-mêmes mieux appréhendés que l'analytique avancée. Il y a par ailleurs des écarts d'un pays à l'autre sur ce plan: les répondants français se disent plus fréquemment bien informés concernant le cloud et l'IA, et les Allemands pour l'analytique avancée et le machine learning<sup>29</sup>.

L'analytique avancée est notamment moins bien connue au sein des plus petites entreprises françaises. La notoriété de ces technologies tend en outre à être plus faible au sein des entreprises qui n'ont pas réalisé et n'envisagent pas de réaliser un plan de transformation.

On note également que, en France, les directeurs et responsables techniques sont toujours les mieux informés; les directeurs et responsables financiers sont presque toujours ceux qui connaissent le moins ces techniques. Cette différence est moins marquée en Allemagne.

En France, on retrouve dans les données détaillées l'influence des paramètres (taille, âge, marché...) étudiés

dans le chapitre précédent comme déterminant les décisions d'investissement. Ainsi par exemple, la proportion d'entreprises considérant qu'une technologie donnée ne présente pas d'intérêt pour elle est souvent deux fois plus élevée parmi les plus petites (de 50 à 100 salariés) et parmi celles qui n'ont pas mené de plan de transformation et n'en envisagent pas, tandis que ces deux critères ne présentent pas d'effet significatif sur la proportion de répondants déclarant manquer de compétences ou de ressources financières pour investir. Comme on l'a vu précédemment s'agissant de la décision d'investir, l'âge de l'entreprise n'a aucune incidence sur les proportions de répondants choisissant ces différentes justifications proposées. L'effet de la nature des marchés (B2B-B2C, export, défense) est moins significatif.

## TECHNOLOGIES PERMETTANT D'OPTIMISER LES PROCESSUS

La technologie la plus connue des entreprises est l'impression 3D (60% de réponse positive), puis la robotique (55%). Dans ces deux cas, la notoriété est la plus forte (et la méconnaissance la plus faible) en France, et la plus faible (respectivement la plus forte) en Italie. Viennent ensuite *ex æquo* la réalité virtuelle et la réalité augmentée (45%); la première est moins bien connue en Italie quand la seconde présente un déficit de notoriété en France.

Loin derrière, viennent les jumeaux numériques (20% de réponse favorable). Cette technologie est un peu mieux connue en Allemagne et particulièrement méconnue en Italie. La majorité (57%) des entreprises interrogées en France comme en Italie n'ont donc jamais entendu parler des jumeaux numériques. En Italie, on peut suspecter que cette réponse est affectée par un effet de composition, compte tenu du poids des industries dites «traditionnelles» parmi les répondants; mais cette explication ne vaut pas en France, où les chiffres sont très homogènes d'un secteur à l'autre.

On n'observe pas d'hétérogénéité régionale marquée dans les réponses françaises, alors que les réponses sont plus contrastées en Allemagne.

En France, et pour les quatre premières technologies, les entreprises de la métallurgie sont celles qui ont la meilleure connaissance (et la plus faible méconnaissance). Les industries agroalimentaire, aéronautique et spatiale sont très souvent celles qui ont la moins bonne connaissance et la plus forte méconnaissance. La méconnaissance totale des jumeaux numériques (correspondant à la réponse «je n'en ai jamais entendu parler») excède 50% des répondants dans tous les secteurs à la seule exception de l'aérospatial et du naval-ferroviaire. Dans une enquête spécifique à cette technologie, Hexagon (2025) confirme que près de la moitié des décideurs en matière de TIC indiquent ne pas connaître cette technologie mais que,

<sup>29</sup>— Seulement 63% des industriels français affirment connaître le machine learning, contre 86% en Allemagne et 81% en Italie (soit un écart d'environ 20 points). À l'inverse, 88% des entreprises françaises disent connaître l'IA générative contre environ 70% en moyenne chez leurs voisins (soit un écart de 18 points). 61% des entreprises françaises disent connaître l'analytique avancée contre 70% en moyenne en Allemagne et en Italie (soit un écart d'environ 9 points).

dans le domaine particulier de l'aérospatial et de la défense, 24% des entreprises en font une priorité et que 50% supplémentaires auront investi d'ici à deux ans. Kropov (2024) présente également des données de nature à corroborer nos observations.

Revenant en France, la mauvaise connaissance des technologies peut atteindre des maxima locaux au sein des plus petites entreprises, mais cela n'est pas une réalité universelle: elles ont parfois une connaissance identique aux plus grandes (robotique, impression 3D), notamment quand celles-ci présentent elles aussi des taux de méconnaissance élevés (jumeaux numériques, impression 3D). Comme pour les technologies du groupe précédent, la connaissance affichée par les directeurs et responsables financiers est sensiblement moins bonne que celle exprimée par les directeurs et responsables techniques. Là encore, ce décalage est nettement moins marqué en Allemagne (où le moins informé est souvent le dirigeant de l'entreprise) et en Italie.

La bonne connaissance (respectivement la méconnaissance partielle ou totale) des technologies est la plus forte (respectivement la plus faible) au sein des entreprises qui ont engagé un plan de transformation il y a plus de deux ans et la plus faible (respectivement la plus forte) au sein des entreprises qui n'en ont pas fait et n'en envisagent pas. On observe le même phénomène en Italie; il est un peu moins net en Allemagne.

La bonne connaissance des technologies croît sensiblement avec l'exposition des entreprises à l'export, tandis que la part du chiffre d'affaires réalisée avec la défense ou en B2B ne fait pas apparaître de corrélation particulière.

Pour les quatre premières technologies (c'est-à-dire à l'exception des jumeaux numériques), la proportion d'entreprises déclarant que ces technologies ne sont pas pertinentes pour leur activité est nettement plus élevée parmi les entreprises de plus petite taille (entre 50 et 100 salariés). Dans le cas de la robotique et de l'impression 3D, les directeurs techniques sont souvent moins enclins à écarter une technologie comme non pertinente que les directeurs financiers, les PDG ou les autres membres du Comex. Enfin, l'absence d'intérêt des technologies est sur-invoqué par les entreprises qui ne se sont pas lancées dans un plan de transformation et ne l'envisagent pas.

## TECHNOLOGIES TRANSVERSES

La notoriété de ces technologies est très variable. *Primo*, et sans grande surprise, la cybersécurité est connue de tous (avec un léger retrait des répondants français) et méconnue de personne. *Secundo*, les *cleantech*, l'IoT et le stockage d'énergie sont très précisément connus par 80 voire 90% des répondants allemands, 60 à 75% des Italiens, mais seulement 30 à 36% des Français (27 à 48% n'en ont par ailleurs jamais entendu parler,

ce qui est très supérieur aux autres pays). *Tertio*, l'informatique quantique est un cas à part: 20% des Français mais seulement 5-6% de nos voisins savent ce que c'est; la moitié «seulement» des Français, mais 80% de nos voisins n'en ont jamais entendu parler.

Les *cleantech* sont mieux connues dans le naval-ferroviaire, la pharmacie et la métallurgie, et plus méconnues dans l'automobile et l'IAA. L'IoT est surtout connu dans la métallurgie, le naval-ferroviaire, l'électronique, et plus méconnu dans l'IAA, l'aérospatial et les industries traditionnelles. Le stockage d'énergie est surtout connu dans la métallurgie et la pharmacie et méconnu dans l'IAA et le naval-ferroviaire. L'informatique quantique est surtout connue dans la pharmacie et l'électronique.

Dans l'ensemble, la bonne connaissance des technologies croît avec la taille de l'entreprise; c'est parfois au détriment du taux de connaissance approximative, parfois de celui de la méconnaissance complète. C'est moins net en Allemagne, où quatre de ces cinq technologies sont très bien connues, et en Italie.

En France, les entreprises fondées après 2019 ont la particularité d'être nettement moins nombreuses que les autres à faire état d'une très bonne connaissance de ces technologies au profit d'une connaissance plus vague. Ce résultat peut sembler paradoxal: c'est justement dans les entreprises

les plus jeunes que ces technologies transversales seraient moins aisément appréhendées.

Comme dans les cas précédents, la connaissance des technologies est plus faible (et souvent la méconnaissance totale plus forte) dans les entreprises qui n'ont pas encore réalisé de plan de transformation.

La méconnaissance complète de ces technologies décroît en outre avec la part du chiffre d'affaires en B2B ou encore auprès de la défense, parfois au profit d'une connaissance approximative seulement. En revanche, la corrélation est très nette entre leur connaissance précise et l'ouverture à l'export.

Quand les cohortes sont significatives, on peut constater que la part des entreprises françaises indiquant que ces technologies ne sont pas pertinentes pour elles est assez stable d'un secteur à l'autre. Elle est légèrement plus élevée parmi les plus petites entreprises, mais cet effet est moins important que s'agissant des technologies moins transversales, détaillées aux paragraphes précédents. Cette proportion d'entreprises désintéressées croît légèrement avec la part de l'activité effectuée en B2B, comme avec la part consacrée à l'export (seulement pour les *cleantech*, le stockage d'énergie et l'informatique quantique), tandis qu'elle décroît avec la part réalisée pour le secteur de la défense dans le cas particulier de l'informatique quantique.

# Point de vue

par **Michael Valentin**

## Tout comme le lean, l'industrie 4.0 passe d'abord par de nouveaux comportements

### **Michael Valentin**

Associé fondateur du cabinet Opeo, membre du conseil d'orientation de La Fabrique de l'industrie

**M**ÊME SI LE CONCEPT D'INDUSTRIE 4.0 aura bientôt dix ans, nous constatons sur le terrain qu'environ 5% des organisations industrielles profitent pleinement du potentiel des technologies associées, avec des gains significatifs sur la compétitivité du système industriel mais aussi une meilleure compréhension des attentes du marché. En revanche, près de la moitié des dirigeants que nous accompagnons avouent rencontrer des difficultés à prioriser les leviers à actionner, ce qui conduit soit à l'inaction, soit à un excès d'initiatives qui perd les managers intermédiaire et peine à délivrer la promesse escomptée. Comment faire ? Il faut distinguer trois catégories de technologies, qui ont des vocations bien différentes et ne requièrent pas du tout les mêmes efforts d'accompagnement.

D'un côté, il y a les innovations qui touchent à l'infrastructure. Ce sont les fondements indispensables qui permettent de construire un système efficace et réactif. Typiquement, pour une usine, les questions centrales d'infrastructure tournent autour de la connexion des machines et donc de l'architecture imbriquée des technologies opérationnelles et d'information (IT/OT). Le réseau de communication est également structurant : sans même parler de la 5G, beaucoup de sites n'ont pas encore une couverture Wifi satisfaisante. Ces technologies n'apportent rien en tant que tel et ne doivent donc pas être poussées de façon isolée.

La deuxième catégorie de technologies est celle que les industriels ont le plus l'habitude de mettre en œuvre, de façon incrémentale : il s'agit des améliorations des procédés industriels. Mettre en place une machine d'impression 3D pour fabriquer des moules, des posages ou des pièces de rechange dans l'industrie mécanique pose rarement de problème. Au contraire, les techniciens sont friands de nouveauté et se prêtent généralement très bien au jeu. De la même façon, les nouvelles applications de *computer vision* assistée par du machine learning pour rendre le contrôle-qualité « apprenant » sont en train de se répandre à grande vitesse dans le secteur.

Enfin, la dernière catégorie de technologies n'en est pas vraiment une : il s'agit de la digitalisation au sens large, augmentée depuis deux ans par l'intelligence artificielle. Ici nous ne parlons plus d'une logique d'investissement ni de montée en compétence technique. Il s'agit de changer les pratiques opérationnelles et managériales grâce à une technologie qui rend le quotidien plus prédictif, plus réactif, plus collaboratif et qui simplifie amplement les processus par de l'automatisation à large échelle.

Pour digitaliser, il s'agit d'appliquer les mêmes méthodes que les « acteurs purs » du secteur de la tech. Toutes les start-up qui vendent des logiciels B2C innoveront de la même façon : rechercher des points de douleur dans la vie quotidienne des gens, tester un logiciel qui permet de les résoudre, et itérer jusqu'à obtenir un usage maximal du logiciel. Ensuite, lorsque des millions d'utilisateurs se servent chaque jour de la solution, il devient possible de faire des tests structurés (appelés A/B tests) et donc de continuer à améliorer le produit chaque jour. Mieux connaître son client devient un sport et c'est grâce à ces données que le modèle d'affaires fleurit.

La recette en usine est exactement la même, si ce n'est qu'il s'agit de comprendre les points de douleur des opérateurs, des techniciens, des managers et de toute l'organisation. En traitant un point de douleur, typiquement un silo entre deux services, un ralentissement de flux lié à de la non-qualité, un problème de prise de décision dans un processus, une solution digitale devient indispensable. Les équipes qui s'en servent ne peuvent bientôt plus s'en passer car cela leur fait gagner du temps et, surtout, leur permet de mieux effectuer leur travail. L'autre effet bénéfique, c'est que l'organisation devient aussi plus apprenante, en collectant chaque jour plus de données sur les comportements individuels et collectifs. Elle peut donc continuer à innover en permanence, devenir plus intelligente collectivement en connaissant mieux le travail de chaque personne de l'équipe industrielle.

Après avoir compris cela, il reste un écueil : la plupart des industriels travaillent sur des systèmes anciens qui se superposent. Il faut donc détricoter l'architecture *legacy* historique pour réinstaller une structure de données et une

architecture logicielle moderne, centrée sur les bons usages et sur des données unifiées. Cela ne peut se faire en mode *big bang*. Il faut y aller process par process et donc commencer par les enjeux prioritaires. D'où l'importance d'enclencher la démarche 4.0 par un diagnostic sur le potentiel d'amélioration, dans le contexte très spécifique de l'entreprise concernée.

L'industrie 4.0 est encore très loin d'avoir livré toutes ses promesses, mais la technologie continue à évoluer très vite. Le sujet de fond réside donc dans la méthode à adopter pour profiter au mieux des nouvelles technologies : être agile comme une start-up pour tester des solutions innovantes adaptées aux besoins sur les technologies digitales, continuer à innover par incréments sur les procédés de fabrication, et se montrer visionnaire, structuré et patient, sur les projets d'infrastructure pour faciliter tout l'ensemble.

# En fin

*Conclusion*

**S'**AGISSANT DE L'ADOPTION au sein des entreprises industrielles des technologies modernes de production, fréquemment rassemblées sous l'expression « industrie 4.0 », le tableau le plus couramment admis tient en deux points. D'une part, la littérature en économie atteste de leurs retombées positives en matière de productivité. D'autre part, aux difficultés structurelles propres aux PMI dans tous les pays du monde pour s'équiper au même rythme que les plus grandes entreprises s'ajouterait une réticence à investir typiquement française, qui expliquerait les piètres performances de notre économie en termes de gains de productivité. Les résultats de cette étude amènent à nuancer ce tableau.

Premièrement, si les effets bénéfiques des technologies 4.0 sur la productivité ne font aucun doute, la littérature rappelle aussi qu'ils n'apparaissent qu'à la condition que ces dernières soient déployées de manière cohérente avec une transformation adaptée des processus de production et un effort de montée en compétences des salariés. La promotion des technologies pour leurs seules vertus propres présente donc possiblement moins d'efficacité que leur inscription dans un programme d'accompagnement plus large, incluant notamment des considérations organisationnelles.

Deuxièmement, l'enquête montre que les taux de recours à ces technologies sont assez différents d'un secteur à l'autre, alors que nous avons surtout tendance à comparer les pays entre eux. On peut donc avancer que l'industrie 4.0 n'est pas, ou pas encore, une famille cohérente et homogène de techniques inter-reliées mais plutôt un ensemble de procédés qui concernent rarement toutes les entreprises de la même façon.

Troisièmement, les enquêtes approfondies menées dans différents pays d'Europe font état de résultats convergents, pour peu que l'on admette une marge d'incertitude de 5 points de pourcentage environ. Il sera donc imprudent de conférer à leurs chiffres des valeurs prédictives trop précises, et plus sage de les lire comme des ordres de grandeur de nature à nous renseigner sur les cinétiques d'adoption et les grandes tendances à l'œuvre en matière de modernisation du tissu productif.

Outre que les petites entreprises présentent effectivement des taux d'adoption et des perspectives d'investissement plus réduites que les grandes ETI (tandis que l'âge des entreprises est quasiment sans influence), le degré d'ouverture à l'export est également un facteur associé à une plus grande propension à s'équiper. *Last but not least*, le lien avec la conduite d'un plan de transformation est absolument net et récurrent : c'est l'un des résultats forts de cette enquête.

Dans l'ensemble, on trouve peu d'arguments en faveur d'un retard généralisé des PMI-ETI françaises en matière d'équipement 4.0, sauf pour ce qui concerne l'Internet des objets et la grande famille des *cleantech*. Leur niveau d'équipement en robots, amplement commenté comme étant « trop faible », est d'abord le reflet de la composition sectorielle de notre économie en général et de notre industrie en particulier. En revanche, un tel retard pourrait survenir, pour de bon et à court terme, tant est frappant le décalage entre les perspectives d'investissement très réduites des entreprises françaises et celles, nettement plus dynamiques, de leurs équivalentes allemandes et italiennes.

Le contexte budgétaire français ne saurait en être la seule raison. Nos résultats pointent au contraire vers ce que l'on pourrait appeler un « syndrome français » dans l'approche de ces technologies et l'appréciation de leurs mérites. La France se distingue en effet par une proportion nettement plus élevée qu'ailleurs d'entreprises considérant ces différentes technologies comme non pertinentes pour leur activité, alors que d'un strict point de vue technique ces taux de réponse devraient être universels. Elle se distingue également de l'Allemagne par l'ampleur de l'écart des réponses données, toujours au sujet de la pertinence des technologies, entre grandes ETI et PMI ou encore entre PDG et directeurs financiers d'un côté et directeurs techniques de l'autre. Enfin et surtout, les entreprises françaises se distinguent par la part plus élevée d'entreprises qui n'ont pas mené de plan de transformation en vue d'améliorer leur performance et qui ne l'envisagent toujours pas. Ce noyau d'entreprises « réfractaires » pourrait faire l'objet d'analyses complémentaires. En tout état de cause, c'est là une raison de plus pour anticiper le fait qu'une politique publique qui serait uniquement centrée autour de la promotion des

technologies par elles-mêmes risquerait de se heurter à un mur d'incompréhension et donc afficher des résultats décevants.

Les réponses données par les entreprises présentent également une singularité : interrogées en général, elles estiment fréquemment qu'elles manquent de ressources financières et de compétences humaines pour faire monter en gamme leurs techniques de production aussi vite qu'elles le souhaiteraient. C'est aussi ce que retient la littérature académique. Mais au cas par cas, elles sont au contraire très peu nombreuses à estimer que c'est pour l'une de ces deux raisons qu'elles renoncent à investir dans une technologie donnée. Ce paradoxe, pour le coup, n'a rien de spécifiquement français et s'observe également en Italie, en Allemagne et au Royaume-Uni. Une interprétation possible est que leur compréhension spontanée d'une telle « montée en gamme » concerne plus souvent le remplacement des équipements par des substituts plus modernes et performants (outils de découpe, pliage, soudage, usinage...) et marginalement les familles de technologies rassemblées sous l'expression « industrie 4.0 ».

Les taux d'équipement en technologies évoluent au moins aussi vite que les technologies elles-mêmes. Il n'est donc pas question de conserver du tableau statistique qui précède une image figée et immuable.

# En somme

*Postface*

**C**E RAPPORT MONTRE que les technologies numériques, et notamment celles de l'industrie dite « 4.0 », accélèrent les gains de productivité des entreprises qui les adoptent, pourvu que leur déploiement s'insère dans une transformation plus large de leur organisation et de leurs compétences.

## **Le bénéfice de l'investissement technologique est étayé par trente ans de travaux en économie**

Les deux premiers chapitres de l'ouvrage rappellent, littérature scientifique à l'appui, que la productivité est un défi permanent pour les entreprises industrielles, pour lequel il n'existe pas de martingale. Les technologies « 4.0 », comme l'informatique avant elles, sont puissantes et indispensables à défaut d'être suffisantes. L'adoption technologique améliore la performance des entreprises si elle s'inscrit dans un projet de transformation : réorganisation des processus, montée en compétences des opérateurs, parfois aussi renouvellement des modèles d'affaires, le tout sur fond de pression concurrentielle. Les entreprises qui investiraient sans mener de front une telle transformation organisationnelle s'exposent à des rendements décevants.

Pour la même raison, les politiques visant à encourager les entreprises à s'équiper, par exemple sous la forme d'un suramortissement qui concrétiserait le soutien public aux PME et ETI industrielles dans une période difficile pour elles, doivent avoir une approche raisonnablement large de leur objet. Même si l'on peut comprendre que l'équipement tangible en soit *in fine* un indicateur de succès (que l'on parle du nombre de robots installés, du taux de couverture en cloud ou 5G, ou encore de la diffusion de telle ou telle technologie émergente...), il apparaît qu'une mesure visant à soutenir l'achat de technologies doit également accompagner voire encourager des démarches d'entreprises plus globales, intégrant organisation, compétences et management.

### Tenir compte de l'hétérogénéité du tissu productif

Un deuxième enseignement de ce travail tient à l'hétérogénéité des situations sectorielles. À ce jour, l'industrie 4.0 n'est pas un « bloc » de technologies cohérentes et liées entre elles. C'est au contraire un bouquet très ouvert, au sein duquel on trouve à la fois des technologies communes à la plupart des secteurs et largement adoptées (cloud, cybersécurité) et d'autres, pour le moment encore propres à certaines activités (la robotique dans l'automobile, l'IA générative dans la pharmacie, etc.).

Ce premier axe de différenciation se combine avec un second, toutes activités confondues : le taux d'équipement des entreprises croît avec leur taille et avec leur ouverture à l'export. C'est ce qui explique sans aucun doute que les niveaux de productivité relevés à l'échelle des entreprises soient de plus en plus dispersés à l'intérieur de chaque secteur d'activité.

Quoi qu'il en soit, ces deux dimensions distinctives sont probablement plus importantes que le fait de savoir si les entreprises sont françaises, allemandes ou italiennes. Plutôt que de décompter l'adoption des technologies en moyenne, autrement dit d'encourager leur diffusion en vertu de mérites intrinsèques, il est important que l'action publique permette des approches « sur-mesure ». Puisque les économistes nous enseignent que le rendement marginal d'une technologie donnée n'est pas le même d'un secteur à l'autre, alors imaginons des dispositifs laissant aux entreprises toute latitude pour adapter l'offre technologique à leurs besoins. Peut-être faut-il, à cet égard, s'inspirer de mesures récentes telles que la politique des « territoires d'industrie », et bâtir une politique en concertation avec les autorités régionales et territoriales, sans oublier les représentants de branches professionnelles, afin d'éviter les effets de bord de politiques uniformes et descendantes.

### Comprendre la posture des entreprises « réfractaires »

L'enquête met en lumière une singularité française préoccupante : une proportion d'entreprises plus élevée que chez nos voisins jugent les technologies « 4.0 » non pertinentes pour leur activité. Ce trait particulier se double d'un autre, assez cohérent : elles sont aussi plus nombreuses qu'en Allemagne

et en Italie à ne pas avoir mené de plan de transformation et à ne pas envisager de le faire, même à moyen terme. Ce scepticisme à l'égard de la « révolution 4.0 » doit être pris au sérieux et analysé. Découle-t-il d'expériences passées décevantes, de l'anticipation d'un climat social tendu à l'annonce de futurs investissements ? Est-il corrélé à l'âge des dirigeants, dont on annonce de prochains départs en retraite massifs ? Autant d'hypothèses circulant « sur la place » qu'il sera nécessaire de soumettre à l'épreuve des faits.

Cela ne signifie pas, tant s'en faut, qu'il faille opter pour l'attentisme. Au contraire, les résultats de l'enquête exposent sans ambiguïté que les entreprises françaises sont nettement moins nombreuses que leurs voisines italiennes et allemandes à envisager des investissements à court terme, et ce dans toutes les technologies étudiées ici. Le risque n'est donc pas tant que nos entreprises soient aujourd'hui en retard en matière d'équipement mais qu'elles le deviennent rapidement faute d'investissement.

Les lignes qui précèdent esquissent des points de vigilance pour qu'une aide publique à l'investissement parvienne à inciter les entreprises à passer à l'acte de manière extensive : parce que tous les secteurs d'activité n'ont pas besoin des mêmes technologies, parce que la technologie doit être pensée au sein d'une organisation en transformation, et parce qu'une fraction trop importante de la cible se sent aujourd'hui non concernée. Ce qu'il convient d'éviter, c'est qu'un nouveau plan d'investissement ne profite qu'aux convaincus, dont on vient de relever qu'ils étaient encore trop peu nombreux, pour éviter le décrochage de l'industrie française.

Ce que suggère ce rapport, et ce que notre expérience confirme, c'est la nécessité de passer d'une logique d'incitation à une logique d'accompagnement. Cela implique d'investir aussi dans le conseil, le diagnostic, le partage d'expériences, la diffusion de références concrètes et crédibles. Il ne s'agit pas de dire aux entreprises ce qu'elles doivent faire, mais de leur donner les moyens de se projeter, de comprendre, d'expérimenter à leur rythme.

## **Faire de la compétence le cœur des stratégies de transformation**

Une transformation technologique durable nécessite un investissement conjoint et résolu dans les compétences. Ce constat traverse l'ensemble du rapport et il est largement partagé par les acteurs de terrain. En effet, les technologies 4.0 ne soulèvent pas seulement le problème du recrutement des profils rares ; c'est aussi qu'elles transforment les métiers existants, y compris dans le domaine du management intermédiaire. Investir dans le 4.0, c'est donc à la fois recruter de nouvelles compétences techniques et accompagner l'évolution des pratiques professionnelles.

En d'autres termes, les politiques industrielles - ici de soutien à l'investissement productif - doivent être articulées avec celles de la formation professionnelle et de l'éducation. Cela suppose aussi de soutenir les entreprises dans leur capacité à valoriser les compétences nouvellement acquises et à sécuriser les parcours professionnels.

Parfois, le débat public se polarise entre fascination technologique et crainte du déclassement ou du chômage. Cela est regrettable. Il n'y a pas à choisir entre technologie et emploi, ni entre compétitivité et cohésion sociale. Sur un socle de compétences de bon niveau et largement partagées, la technologie permet l'emploi. À défaut, chaque objectif se présente au détriment de l'autre et nos entreprises perdront pied au sein des chaînes de valeur européennes et mondiales.

Dans un moment où les choix budgétaires sont difficiles et les priorités multiples, soutenir une transformation industrielle exigeante est un pari stratégique sur le long terme.

**Pierre-André de Chalendar et Louis Gallois,**  
*Co-présidents de La Fabrique de l'industrie*

# En réf

## Bibliographie

Acemoglu, D., Autor, D., Dorn, D., Hanson, G. H., & Price, B. (2014). Return of the Solow Paradox? IT, Productivity, and Employment in US Manufacturing. *American Economic Review*, 104 (5), 394-399.

Acemoglu, D., & Restrepo, P. (2018). Demographics and Automation (SSRN Scholarly Paper N° 3138621). *Social Science Research Network*.

Acemoglu, D., & Restrepo, P. (2020). Robots and Jobs: Evidence from US Labor Markets. *Journal of Political Economy*, 128 (6), 2188-2244.

Acosta, M., Coronado, D., Ferrandiz, E., Marin, M. R., & Moreno, P. J. (2018). Patents and Dual-use Technology : An Empirical Study of the World's Largest Defence Companies. *Defence and Peace Economics*, 29(7), 821-839.

Aghion, P., Bunel, S., Jaravel, X., Mikaelson, T., Roulet, A., & Søgaard, J. (2025). How Different Uses of AI Shape Labor Demand : Evidence from France. *AEA Papers and Proceedings*, 115, 62-67.

Aghion, P., & Bunel, S. (2024). *AI and Growth: where do we stand ?*. Policy Note.

Aghion, P., Antonin, C., & Bunel, S. (2019). Artificial Intelligence, Growth and Employment : The Role of Policy. *Economie et Statistique / Economics and Statistics*, 510-511-512, 150.

Agostini, L., & Nosella, A. (2019). *The adoption of Industry 4.0 technologies in SMEs : Results of an international study*. *Management Decision*, 58(4), 625-643.

Al-Gumaei, K., Schuba, K., Friesen, A., Heymann, S., Pieper, C., Pethig, F., & Schriegel, S. (2018). *A Survey of Internet of Things and Big Data integrated Solutions for Industrie 4.0*. 2018 IEEE 23<sup>rd</sup> International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 1, 1417-1424.

Andrews, D., Criscuolo, C., & Gal, P. N. (2015). *Frontier Firms, Technology Diffusion and Public Policy: Micro Evidence From OECD Countries* (N° 02; OECD Productivity Working Papers). OECD Publishing.

Autor, D. H., Dorn, D., & Hanson, G. H. (2015). Untangling Trade and Technology : Evidence from Local Labour Markets. *The Economic Journal*, 125(584), 621-646.

Autor, D. H., Levy, F., & Murnane, R. J. (2003). The Skill Content of Recent Technological Change : An Empirical Exploration. *The Quarterly Journal of Economics*, 118 (4), 1279-1333.

Bai, C., Li, H. A., & Xiao, Y. (2022). *Industry 4.0 technologies: Empirical impacts and decision framework*. *Production and Operations Management*, n/a (n/a).

Balland, P.-A., & Boschma, R. (2021). *Mapping the potentials of regions in Europe to contribute to new knowledge production in Industry 4.0 technologies*. *Regional Studies*, 55(10-11), 1652-1666.

- Bartel, A., Ichniowski, C., & Shaw, K. (2007). How Does Information Technology Affect Productivity? Plant-Level Comparisons of Product Innovation, Process Improvement, and Worker Skills\*. *The Quarterly Journal of Economics*, 122 (4), 1721-1758.
- Bartelsman, E. J., & Doms, M. (2000). Understanding Productivity: Lessons from Longitudinal Microdata. *Journal of Economic Literature*, 38 (3), 569-594.
- Baumol, W. J. (1986). Productivity Growth, Convergence, and Welfare: What the Long-Run Data Show. *The American Economic Review*, 76 (5), 1072-1085.
- Benassi, M., Grinza, E., Rentocchini, F., & Rondi, L. (2020). *Going Revolutionary: The Impact of 4IR Technology Development on Firm Performance* (SSRN Scholarly Paper N° 3625592). Social Science Research Network.
- Bergeaud, A., Cette, G., & Lecat, R. (2017). *What role did education, equipment age and technology play in 20th century productivity growth?* Rue de La Banque, 43.
- Bettiol, M., Capestro, M., Maria, E. D., & Micelli, S. (2020). *At The Roots Of The Fourth Industrial Revolution: How ICT Investments Affect Industry 4.0 Adoption*. « Marco Fanno » Working Papers, Article 0253.
- Bettiol, M., Capestro, M., Maria, E. D., & Micelli, S. (2021). Disentangling the link between ICT and Industry 4.0: Impacts on knowledge-related performance. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 71 (4), 1076-1098.
- Bidet-Mayer, T. (2016). *L'industrie du futur: Une compétition mondiale*, Les Notes de La Fabrique, Vol. 14. Presses des Mines.
- Bloom, N., Sadun, R., & Van Reenen, J. (2012). Americans Do IT Better: US Multinationals and the Productivity Miracle. *American Economic Review*, 102 (1), 167-201.
- Bock, S., & Gelman, P. (2024, novembre 18). *The Widening Productivity Gap and the Underperformance of ICT-Intensive Sectors in France*.
- Bresnahan, T. F., Brynjolfsson, E., & Hitt, L. M. (2002). Information Technology, Workplace Organization, and the Demand for Skilled Labor: Firm-Level Evidence. *The Quarterly Journal of Economics*, 117 (1), 339-376.
- Brown, M. M. (2015). Revisiting the IT Productivity Paradox. *The American Review of Public Administration*, 45 (5), 565-583.
- Brynjolfsson, E. (1993). *The productivity paradox of information technology*. Communications of the ACM, 36 (12), 66-77.
- Brynjolfsson, E., & Hitt, L. (1993). *Is Information Systems Spending Productive? New Evidence and New Results*. *Proceedings of the International Conference on Information Systems*.
- Brynjolfsson, E., & Hitt, L. (1996). Paradox Lost? Firm-Level Evidence on the Returns to Information Systems Spending. *Management Science*, 42 (4), 541-558.
- Brynjolfsson, E., & Hitt, L. M. (2000). Beyond Computation: Information Technology, Organizational Transformation and Business Performance. *Journal of Economic Perspectives*, 14 (4), 23-48.
- Brynjolfsson, E., Rock, D., & Syverson, C. (2019). 1. Artificial Intelligence and the Modern Productivity Paradox: A Clash of Expectations and Statistics. In A. Agrawal, J. Gans, & A. Goldfarb (Éds.), *The Economics of Artificial Intelligence: An Agenda* (p. 23-60). University of Chicago Press.
- Büchi, G., Cugno, M., & Castagnoli, R. (2020). *Smart factory performance and Industry 4.0. Technological Forecasting and Social Change*, 150, 119790.
- Bunel, S., Clymo, A., & Garnier, O. (2025, février 28). *Réexamen de l'écart de performance de l'Europe vis-à-vis des États-Unis*. Banque de France.
- Burgmann, N., Burger, M., & Krüger, A. (2022). *Subscription Business Models as Accelerators for the Adoption of Industry 4.0 by SMEs*. In *The Future of Smart Production for SMEs* (Springer Cham).
- Capello, R., Lenzi, C., & Perucca, G. (2022). The modern Solow paradox. In search for explanations. *Structural Change and Economic Dynamics*, 63, 166-180.
- Cardona, M., Kretschmer, T., & Strobel, T. (2013). ICT and productivity: Conclusions from the empirical literature. *Information Economics and Policy*, 25 (3), 109-125.
- Carnevali, E., Godin, A., Lucarelli, S., & Veronese Passarella, M. (2020). Productivity growth, Smith effects and Ricardo effects in Euro Area's manufacturing industries. *Metroeconomica*, 71 (1), 129-155.
- Caselli, F., & Coleman, W. J. (2001). Cross-Country Technology Diffusion: The Case of Computers. *The American Economic Review*, 91(2), 328-335.
- Caselli, M., Chatterjee, A., & Li, S. (2026). *Productivity and Quality of Multi-product Firms*.
- Castellani, D., Lamperti, F., & Latoratori, K. (2022). Measuring adoption of industry 4.0 technologies via international trade data: Insights from European countries. *Journal of Industrial and Business Economics*, 49(1), 51-93.
- Ceccobelli, M., Gitto, S., & Mancuso, P. (2012). ICT capital and labour productivity growth: A non-parametric analysis of 14 OECD countries. *Telecommunications Policy*, 36 (4), 282-292.
- Charlet, V., & Dehnert, S. (2017). *L'industrie du futur: Progrès technique, progrès social? Regards franco-allemands*, Les Notes de La Fabrique, Vol. 20. Presses des Mines.
- Chiacchio, F., Petropoulos, G., & Pichler, D. (2018). *The impact of industrial robots on EU employment and wages: A local labour market approach* (Working Paper N° 2018/02). Bruegel Working Paper.

- Cohen, S. S., & Zysman, J. (1987). *Manufacturing matters: The myth of the post-industrial economy*. Basic Books.
- Coquet, B., & Heyer, É. (2025, avril 1). La productivité retrouve des couleurs. *OFCE - Policy brief*, 2025(142).
- Corradini, C., Santini, E., & Vecciolini, C. (2021). *The geography of Industry 4.0 technologies across European regions*. *Regional Studies*, 55(10-11), 1667-1680.
- Crafts, N. (2002). *The Solow Productivity Paradox in Historical Perspective* (SSRN Scholarly Paper N° 298444). Social Science Research Network.
- Crafts, N. (2004). The Economic Impact of ICT: A Perspective From The Age of Steam. *The Esmée Fairbairn Lecture*, 18 novembre, Lancaster University.
- Dachs, B., Kinkel, S., & Jäger, A. (2019). Bringing it all back home? Backshoring of manufacturing activities and the adoption of Industry 4.0 technologies. *Journal of World Business*, 54(6), 101017.
- De Loecker, J., Eeckhout, J., & Unger, G. (2020). The Rise of Market Power and the Macroeconomic Implications\*. *The Quarterly Journal of Economics*, 135 (2), 561-644.
- Delic, M., & Eyers, D. R. (2020). The effect of additive manufacturing adoption on supply chain flexibility and performance: An empirical analysis from the automotive industry. *International Journal of Production Economics*, 228, 107689.
- Dell, F., Janin, L., Douillard, P., & Lorach, N. (2014, septembre 26). *Has There Been an Investment Gap in France and Europe since 2007?* Haut-Commissariat à la stratégie et au plan.
- Department of Science, Trade and Technology. (2025). *Factors affecting adoption of 3D Printing by SMEs: The case of Greater Manchester*.
- Desjeux, M (2025). *L'industrie de défense au service des ambitions françaises. De la maîtrise à la supériorité*, La Fabrique de l'industrie, Paris, Presses des Mines.
- Diez-Olivan, A., Del Ser, J., Galar, D., & Sierra, B. (2019). Data fusion and machine learning for industrial prognosis: Trends and perspectives towards Industry 4.0. *Information Fusion*, 50, 92-111.
- Edquist, H., Goodridge, P., & Haskel, J. (2021). The Internet of Things and economic growth in a panel of countries. *Economics of Innovation and New Technology*, 30(3), 262-283.
- Errera, R. (2022, octobre 6). *3D Printing Statistics (2022 Additive Manufacturing Data)*. Toner Buzz.
- European Investment Bank. (2025). *EIB Investment Survey 2025*. European Investment Bank.
- Felice, G., Lamperti, F., & Piscitello, L. (2022). The employment implications of additive manufacturing. *Industry and Innovation*, 29(3), 333-366.
- Ghadge, A., Kara, M. E., Moradlou, H., & Goswami, M. (2020). The impact of Industry 4.0 implementation on supply chains. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31 (4), 669-686.
- Ghobakhloo, M., & Fathi, M. (2019). Corporate survival in Industry 4.0 era: The enabling role of lean-digitized manufacturing. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31 (1), 1-30.
- Gouyette, C., & Perelman, S. (1997). Productivity convergence in OECD service industries. *Structural Change and Economic Dynamics*, 8 (3), 279-295.
- Graetz, G., & Michaels, G. (2018). Robots at Work. *The Review of Economics and Statistics*, 100 (5), 753-768.
- Hajli, M., Sims, J. M., & Ibragimov, V. (2015). Information technology (IT) productivity paradox in the 21st century. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 64 (4), 457-478.
- Hélin, E. (1991). *La Révolution industrielle: Les mots ont-ils précédé les réalités?*
- Hexagon. (2025). *2025 Digital Twin Statistics*. Hexagon.
- Hitt, L. M., & Brynjolfsson, E. (1996). *Productivity, Business Profitability, and Consumer Surplus: Three Different Measures of Information Technology Value*. *MIS Quarterly*, 20 (2), 121-142.
- Hoffmann, M., Lehnert, T., Müller, J., & Sekreter, C. (2025). The Elephant in the Room—What does Industry 4.0 really mean in the forging industry? *FIA Magazine*.
- Hu, Q., & Quan, J. « Jim ». (2005). Evaluating the impact of IT investments on productivity: A causal analysis at industry level. *International Journal of Information Management*, 25 (1), 39-53.
- IBM. (2024, janvier 10). *Data Suggests Growth in Enterprise Adoption of AI is Due to Widespread Deployment by Early Adopters*.
- Inklaar, R., Timmer, M. P., & Ark, B. van. (2007). Mind the Gap! International Comparisons of Productivity in Services and Goods Production. *German Economic Review*, 8 (2), 281-307.
- Jarrige, F. (2015). Révolutions industrielles: Histoire d'un mythe. *Revue Projet*, 349 (6), 14-21.
- Kropov, V. (2024, octobre 10). *Digital twins in manufacturing: An overview. Digital Twins in Manufacturing: Benefits, Technologies and Use Cases*.
- Kuusi, T. (2015). The dynamics of ICT adaptation and the productivity gaps across advanced nations. *Journal of Productivity Analysis*, 44 (2), 175-188.
- Lerch, C., Horvat, D., Jäger, A., Berner, D., & Palcic, I. (2026). *Digitalization and De-Digitalization: Investigating the Phenomenon of Declining Industry 4.0 Adoption Rates in German Manufacturing*. *International Conference on Advances in Production Management Systems 2025*.

- Make UK, & Autodesk. (2024). *Future Factories Powered by AI*.
- Masood, T., & Sonntag, P. (2020). Industry 4.0: Adoption challenges and benefits for SMEs. *Computers in Industry*, 121, 103261.
- Massini, S., Barrioluengo, M. S., & Yu, X. (2022). *Adoption of Digital Technologies and Skills in Greater Manchester*.
- Massini, S., Sanchez-Barrioluengo, M., Yu, X., Kim, M., Chen, P., & Velu, C. (2025, janvier). *Adoption of Advanced Digital Technologies and Platforms : Insights from a UK national survey*. The Productivity Institute.
- Matt, D. T., Molinaro, M., Orzes, G., & Pedrini, G. (2021). The role of innovation ecosystems in Industry 4.0 adoption. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 32(9), 369-395.
- Melitz, M. J. (2003). The Impact of Trade on Intra-Industry Reallocations and Aggregate Industry Productivity. *Econometrica*, 71 (6), 1695-1725.
- MGR. (2025). *Virtual and Augmented Reality Industry Market Size*, Trends 2033. Market Growth Reports.
- Ng, E. C. Y., & Ng, Y. C. (2016). What explains the total factor productivity gap between OECD economies and the U.S.? *Applied Economics*, 48 (32), 3005-3019.
- Opazo-Basáez, M., Vendrell-Herrero, F., Bustinza, O. F., & Marić, J. (2021). Global value chain breadth and firm productivity: The enhancing effect of Industry 4.0. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 33 (4), 785-804.
- Permin, E., Castillo, L., Sarin, S., Lossie, K., Grunert, D., Schmitt, R. H., & Wohlge-muth, C. (2025). *Success Factors for Value Creation in Industry 4.0—A Comparison of two Field Studies in German Tool Machine Manufacturers and Start-Ups*. Procedia CIRP. Conference on Manufacturing Systems 2025.
- Prim, M. F., Oliveira Gomes, J. de, Kohl, H., Orth, R., Will, M., & Vargas, G. B. (2022). *Identifying the Dynamics of Intangible Resources for Industry 4.0 Adoption Process*. IEEE Access.
- Prodi, E., Tassinari, M., Ferrannini, A., & Rubini, L. (2022). Industry 4.0 policy from a sociotechnical perspective : The case of German competence centres. *Technological Forecasting and Social Change*, 175, 121341.
- Ramirez, S. (2025, mai 26). Machine Learning Statistics 2025 : Market Size, Adoption, and Key Trends. *SQ Magazine*.
- Revoltella, D. (2019). *Accelerating Europe's Transformation*. European Investment Bank Investment Report 2019/2020. European Investment Bank (EIB).
- Roblek, V., Meško, M., & Krapež, A. (2016). *A Complex View of Industry 4.0*. SAGE Open, 6 (2), 2158244016653987.
- Schwab, K. (2017). *La quatrième révolution industrielle*. Dunod.
- Shrimali, R. (2024, novembre 21). 60+ *Machine Learning Statistics & Market Insights for 2025*. Radixweb.
- Solow, R. (1987, juillet 12). We'd Better Watch Out. *New York Times Book Review*.
- Stiroh, K. J. (2002). Information Technology and the U.S. Productivity Revival: What Do the Industry Data Say? *American Economic Review*, 92 (5), 1559-1576.
- Swafford, P. M., Ghosh, S., & Murthy, N. (2008). Achieving supply chain agility through IT integration and flexibility. *International Journal of Production Economics*, 116 (2), 288-297.
- UK Government. (2025). *Technology Adoption Review*.
- Valla, N., & Durré, A. (2025). *Un monde en mutation Productivité, compétitivité et transition numérique* (No. 5). Conseil national de la productivité.
- van Ark, B., O'Mahoney, M., & Timmer, M. P. (2008). The Productivity Gap between Europe and the United States: Trends and Causes. *Journal of Economic Perspectives*, 22 (1), 25-44.
- Venturini, F. (2022). Intelligent technologies and productivity spillovers : Evidence from the Fourth Industrial Revolution. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 194, 220-243.
- Willcocks, L., & Lester, S. (1996). Beyond the IT productivity paradox. *European Management Journal*, 14 (3), 279-290.

# À lire

Déjà parus

**Récemment parus,**  
dans la collection  
des Notes de La Fabrique,  
aux Presses des Mines



V. Charlet,  
*Aux sources de l'innovation  
de rupture: Qui cherche ?  
Qui innove ?*, 2025.



D. Karachanski,  
*Comment l'industrie crée  
de l'emploi aujourd'hui ?*,  
2025.



M. Desjeux,  
*L'exigence collective du luxe  
français*, 2025.



M. Desjeux, *L'industrie  
de défense au service des  
ambitions françaises.  
De la maîtrise à la supériorité*,  
2025.



S. Canivenc, *Les Nouveaux  
modes de management et  
d'organisation*, deuxième  
édition 2025.



D. Lolo, J. Fellous,  
*Approvisionnements en métaux  
critiques. L'industrie au défi  
des grandes dépendances*,  
2025.



C. Granier, S. Cathelat, G.  
Richa et J. Tessier, *Industries  
circulaires. Esquisse d'une  
transformation*, 2025.



C. Granier (dir.), *Industrie  
et habitants, une équation  
insoluble ?*,  
2025.

### Les membres du Conseil d'orientation

*La Fabrique de l'industrie  
est dotée d'un Conseil d'orientation,  
organe consultatif, qui veille*

—  
**à la qualité scientifique,  
des travaux menés,**

—  
**et à la diversité et à l'équilibre  
des points de vue.**

*Les membres du Conseil  
y participent à titre personnel  
et n'engagent pas  
les entreprises ou institutions  
auxquels ils appartiennent.  
Leur participation n'implique pas  
adhésion à l'ensemble des messages,  
résultats ou conclusions, portés  
par La Fabrique de l'industrie.*

### COMPOSITION DU CONSEIL AU 15 SEPTEMBRE 2025

Gabriel ARTERO, président d'honneur de la Fédération de la métallurgie CFE-CGC,  
Vincent AUSSILLOUX, économiste à la Commission européenne,  
Guillaume BATAILLE, président d'Estève et Compagnie,  
Bertille BAYARD, rédactrice en chef et responsable du service Micro-Économie au *Figaro*,  
Nicolas BERGHMANS, directeur des nouvelles politiques industrielles à l'IDDRI,  
Michel BERRY, fondateur et directeur de l'école de Paris du management,  
Jean Michel BEZAT, journaliste au quotidien *Le Monde*,  
Serge CATOIRE, directeur industrie à l'UIMM,  
Pierre-André de CHALENDAR, ancien président du groupe Saint-Gobain, co-président de La Fabrique de l'industrie,  
Marc CHEVALLIER, rédacteur en chef d'Alternatives Économiques,  
Jean-Marie DANJOU, directeur général de l'Alliance Industrie du Futur (AIF),  
Philippe DARMAYAN, ancien président d'ArcelorMittal France,  
Solène DAVESNE, journaliste au service Économie-Social de l'Usine Nouvelle,  
Antoine DECHEZLEPRÊTRE, économiste à l'OCDE,  
Flora DONSIMONI, directrice générale de l'Institut de l'Entreprise,  
Pierre DUQUESNE, ancien ambassadeur, chargé de la coordination du soutien international au Liban,  
Olivier FAVEREAU, professeur émérite en sciences économiques à l'université Paris X,  
Jean-Pierre FINE, secrétaire général de l'UIMM,  
Louis GALLOIS, ancien président du conseil de surveillance de PSA Groupe, co-président de La Fabrique de l'industrie,  
François GEEROLF, économiste à l'OFCE et professeur d'économie à Sciences Po,  
Hervé GUILLOU, président d'EXAIL,  
Mehdi GMAR, directeur général délégué à l'innovation au CNRS,  
Frédéric GONAND, conseiller économique de l'UIMM, professeur associé de sciences économiques à l'université Paris-Dauphine,  
Guillaume de GOYS, président d'Aluminium France,  
Bruno JACQUEMIN, délégué général d'A3M,

Sébastien JEAN, professeur au Conservatoire national des arts et métiers (CNAM),  
Éric KELLER, secrétaire fédéral de la fédération FO Métaux,  
Élisabeth KLEIN, dirigeante de CFT Industrie,  
Dorothee KOHLER, directeur général de KOHLER C&C,  
Éric LABAYE, président d'IDEL Partners,  
Isabelle LAUDIER, responsable de l'Institut pour la recherche de la Caisse des Dépôts  
Xavier LECOQ, président du syndicat CFE-CGC sidérurgie,  
Annabelle LIVET, chargée de recherche à la Fondation pour la recherche stratégique,  
Olivier LLUANSI, professeur au Conservatoire National des Arts et Métiers,  
Béatrice MATHIEU, rédactrice en chef de l'Express,  
Victoire de MARGERIE, président exécutif de Rondol,  
Philippe MUTRICY, directeur de l'évaluation, des études et de la prospective de Bpifrance,  
Hélène PESKINE, directrice générale adjointe au Cerema,  
Nicolas PORTIER, enseignant à Sciences Po Paris,  
Grégoire POSTEL-VINAY, ancien directeur de la stratégie à la Direction générale des entreprises, et rédacteur en chef des Annales des Mines,  
Xavier RAGOT, président de l'OFCE,  
Olivier REDOULES, directeur des études de Rexecode,  
Daniel RICHEL, directeur général du Cetim,  
Robin RIVATON, investment director – Venture Smart City chez Eurazeo,  
Alexandra ROULET, professeure d'économie à l'Insead,  
Frédéric SAINT-GEOURS, vice-président du conseil d'administration de la SNCF,  
Bertrand de SINGLY, directeur général adjoint de France Industrie  
Michaël VALENTIN, associé fondateur d'OPEO,  
Pierre VELTZ, ancien PDG de l'établissement public de Paris-Saclay,  
Alain VERNA, directeur général de Toshiba Tec Europe,  
Dominique VERNAY, président du pôle industrie de l'Académie des technologies,  
Vincent VICARD, adjoint au directeur du CEPII,  
Jean-Marc VITTORI, éditorialiste au quotidien *Les Échos*.

Pour une édition  
**plus responsable**

*La Fabrique de l'industrie  
a choisi de travailler avec:*

### **Un imprimeur engagé**

Ce livre est imprimé en France par l'imprimerie Chirat. Labellisée Imprim'vert, cette entreprise s'engage à réduire son impact environnemental en contrôlant sa consommation d'eau, en valorisant ses déchets, en utilisant des additifs respectueux de l'environnement et des produits moins nocifs pour la santé des travailleurs. Ce livre est ainsi imprimé avec des encres végétales sur du papier issu de forêts gérées durablement.



### **Des fonderies françaises**

Les typographies utilisées dans ce livre ont été créées par des fonderies françaises, Double Zero et Fonderie Olive, pour que le travail des typographes, qui donnent du caractère aux lettres, perdure.



## **Un laboratoire d'idées pour l'industrie**

*La Fabrique de l'industrie est un laboratoire d'idées créé pour que la réflexion collective sur les enjeux industriels gagne en ampleur et en qualité.*

Elle est co-présidée par Louis Gallois, ancien président du conseil de surveillance de PSA Groupe, et Pierre-André de Chalendar, président d'honneur de Saint-Gobain. Elle a été fondée en octobre 2011 par des associations d'industriels (Union des industries et des métiers de la métallurgie, France Industrie, rejoints en 2016 par le Groupe des industries métallurgiques) partageant la conviction qu'il n'y a pas d'économie forte sans industrie forte.

Lieu de réflexion et de débat, La Fabrique travaille de façon approfondie et pluridisciplinaire sur les perspectives de l'industrie en France et en Europe, sur l'attractivité de ses métiers, sur les opportunités et les défis liés à la mondialisation.

 [www.linkedin.com/company/la-fabrique-de-l-industrie/](https://www.linkedin.com/company/la-fabrique-de-l-industrie/)

[www.la-fabrique.fr](http://www.la-fabrique.fr)

# 61 Les PMI-ETI en quête de productivité

Voilà plus d'une décennie qu'un vaste effort de mise à niveau technologique a essaimé depuis l'Allemagne, souvent désigné sous le nom de « industrie du futur » ou « industrie 4.0 ». Il s'agit d'inciter les entreprises industrielles de toutes tailles à s'équiper en nouvelles technologies de production (robotique, impression 3D, jumeaux numériques) afin de les faire gagner en compétitivité, à l'heure où les gains de productivité ne cessent de ralentir dans les pays de l'UE et de l'OCDE.

S'appuyant notamment sur une enquête inédite menée auprès des PMI et ETI en France, Allemagne et Italie, cet ouvrage propose un bilan approfondi du déploiement de ces technologies sur le terrain, de ce que l'on peut encore en espérer et des freins à ces investissements.

La France n'est pas en retard sur ses voisins en matière d'équipement de son appareil industriel. Cela pourrait toutefois survenir rapidement, tant elle paraît en retrait sur les projets d'investissement d'ici à 2030. Cet ouvrage apporte également une confirmation empirique à grande échelle du lien essentiel qu'entretiennent la technologie, les compétences et la qualité de l'organisation dans l'amélioration de la productivité.

**Vincent Charlet** est économiste. Après une formation d'ingénieur, il s'est consacré à l'analyse du système de recherche et d'innovation français (évaluation, construction d'indicateurs, prospective). À partir de 2011, il a participé à la création de La Fabrique de l'industrie, think tank dont il est le délégué général.

**Matthieu Dussud** est directeur associé au bureau de Paris de McKinsey et l'un des chefs de file du pôle de compétences Industrie et Technologie au sein duquel il pilote l'activité Industries avancées. Il a rejoint McKinsey en 2015, après avoir été gestionnaire de grands projets chez Technip puis SNC-Lavalin, en Europe, au Moyen-Orient, en Asie et en Amérique.



[www.la-fabrique.fr](http://www.la-fabrique.fr)



Presses des Mines

McKinsey  
& Company

22 €  
ISBN : 978-2-38542-807-5  
ISSN : 2495-1706