



## **LES MUTATIONS DES DIMENSIONS RH DE LA FONCTION DE PRODUCTION A L'ERE DIGITALE : LEÇONS DE LA FABRICATION ADDITIVE**

Sabrina BERBAIN – Enseignante chercheure en Supply Chain  
ISG International Business School – ISG Lab.  
147 Avenue Victor Hugo, 75016 Paris  
[sabrina.berbain@isg.fr](mailto:sabrina.berbain@isg.fr)

Narjes SASSI – Enseignante chercheure en OB/RH  
ISG International Business School – ISG Lab.  
147 Avenue Victor Hugo, 75016 Paris  
[narjes.sassi@isg.fr](mailto:narjes.sassi@isg.fr)

Sabrina BERBAIN\* est Enseignante-chercheure en *Supply Chain* à l'ISG de Paris, elle est titulaire d'un doctorat en informatique de l'université Paris-Dauphine. Elle se spécialise dans l'analyse des changements organisationnels notamment sur la *Supply Chain* liés à l'adoption de la fabrication additive par des entreprises industrielles, ainsi que ceux plus largement liés à l'adoption du modèle *smart factory* (Industrie 4.0). Elle s'intéresse aussi aux mutations du travail liées à ce contexte digital.

Narjes SASSI est Enseignante-chercheure en *OB/RH* à l'ISG de Paris, elle est titulaire d'un doctorat en sciences de gestion de l'université de Toulouse 1. Elle se spécialise dans les domaines des comportements organisationnels, du bien-être au travail (stress, *burnout*, déviance) et des phénomènes liés au travail en équipe, notamment l'adaptation et l'improvisation, ainsi que les mutations des contextes professionnels à l'ère du digital.

---

\*Auteure correspondant

## **LES MUTATIONS DES DIMENSIONS RH DE LA FONCTION DE PRODUCTION A L'ERE DIGITALE : LEÇONS DE LA FABRICATION ADDITIVE**

**RESUME :** La digitalisation de la production représente une opportunité importante pour les entreprises industrielles, mais soulève nombre de défis. L'objectif de cette étude est d'identifier les enjeux de l'implémentation industrielle de la Fabrication Additive (FA) et les conséquences, notamment RH, sur les acteurs internes et externes de la fonction de production. Nous explorons ce sujet en nous basant sur la théorie de l'acceptation des technologies (UTAUT). Nos résultats sont issus d'une étude de cas, basée sur des entretiens avec des acteurs de l'aéronautique et des experts du champ ainsi qu'une phase d'immersion sur des sites de production spécialisés en FA. Nous mettons en avant les enjeux de transformation des métiers dans ce contexte, d'apprentissage individuel et collectif et de développement d'une culture FA auprès de tous les acteurs.

**MOTS CLES :** Digitalisation, Théorie de l'acceptation (UTAUT), Fabrication Additive, Production en série, Enjeux RH, Aéronautique.

## I. INTRODUCTION

La production 4.0 et la Fabrication Additive (FA) en particulier, sont désormais des notions associées aux entreprises qui s'adaptent aux évolutions des modes de production et de consommation exigeant davantage d'ancrage dans les principes de la RSE (Morand, Rosenberg & Turcq, 2017 ; Guillouzouic-Le Corff, 2013). En effet, les différentes crises mondiales (climatiques, financières, sociales et sociétales) ont amené les entreprises à réfléchir à des sources d'avantages compétitifs qui concilient des enjeux de compétitivité avec des enjeux sociaux et de développement durable (Paché, 2009 ; Gosse & Dancette, 2016).

Dans ce contexte, nous assistons au développement exponentiel du marché mondial de la FA dont les revenus pourraient excéder 100 milliards de USD en 2029 (Wohlens, 2021). La FA englobe « l'ensemble des procédés permettant de fabriquer couche par couche, cordon par cordon ou point par point et par ajout de matière un objet physique à partir d'un modèle numérique » (Ponche, 2013 : 4). Elle s'appuie sur des procédés de production complexes qui interrogent les modèles économiques et de gestion classiques. Certaines recherches avancent que la FA permettrait de s'affranchir de nombreuses contraintes existantes dans les procédés d'usinage classiques (Gosse & Dancette, 2016 ; Morand, *et al.*, 2017). En plus des performances économiques qu'elle permettrait, en réduisant les coûts des matières premières rares, les délais d'approvisionnement, de production et de livraison, elle réduirait aussi la pénibilité du travail, grâce à une association Homme/Machine optimisée et en offrant des espaces de travail collaboratifs et créatifs. Nous employons ici le conditionnel car il existe, à notre connaissance, peu d'études qui aient analysé ces bénéfices dans un contexte de production en série, à une échelle industrielle (Berbain, 2016).

Cette recherche s'intéresse particulièrement à ce gap et tente d'analyser les impacts de la FA sur la fonction de production, ses acteurs, ainsi que les mutations qu'ils initient. Nos interrogations portent surtout sur l'incidence de la mise en place de la FA sur les compétences, les qualifications, la formation, l'autonomie des acteurs de production et sur les interactions inter et intra-organisationnelles qu'elle exige.

Le cadre conceptuel que nous développons revient d'abord sur les principales révolutions industrielles et technologiques qui ont constitué un tournant pour l'évolution des modes de production avec une transformation importante des métiers et contextes de travail. Ensuite, nous clarifions la notion de FA pour en expliciter les contours et les caractéristiques. Enfin, en nous appuyant sur une des théories de l'acceptation des technologies (UTAUT, Venkatesh *et al.*, 2003), nous explorons les difficultés de l'implémentation industrielle de la FA et les conséquences, notamment RH, sur la fonction de production et ses acteurs. Nous étayons, par la suite, les résultats d'une étude de cas (suivi sur 4 ans) basée sur des entretiens compréhensifs avec des acteurs internes (personnel de production et direction) et externes (client principal) d'une entreprise de l'aéronautique, des observations silencieuses des ateliers de production et de conception et des échanges avec des experts du champ. Les résultats nous renseignent sur les mutations de la fonction de production et les enjeux RH accompagnant l'adoption de la FA pour la fabrication industrielle en série portant sur les paradoxes d'acceptation, de méfiance de rejet de ces nouveaux procédés de fabrication qui s'expriment de façon différenciée par l'ensemble des acteurs.

## II. CADRE CONCEPTUEL

Les mutations des modèles économiques et organisationnels suivent les changements induits par l'évolution des modes de consommation et de production. Certains spécialistes de l'histoire économique identifient quatre grandes révolutions industrielles, allant de l'usage du

charbon à l'usage d'internet (Verley, 1997 ; Woronoff, 1998 ; Bretones, 2014 ; Caron, 1997), qui ont transformé les entreprises et leurs fonctionnements. Nous explicitons dans ce qui suit les principes fondateurs de ces révolutions puis nous mettons en avant les singularités de la FA, objet de notre étude, et ses incidences sur la fonction de production et ses acteurs. Nous terminons cette partie par un exposé de la théorie de l'acceptation de la technologie (UTAUT, *Unified Theory of Acceptance and Use of Technology*, Venkatesh *et al.*, 2003) que nous mobilisons pour appréhender avec acuité les défis RH de l'implémentation industrielle de la FA dans une entreprise de l'aéronautique.

## **1. Panorama des principales révolutions industrielles et transformations du travail**

Caron (1997) et Bretones (2014), dans leurs diagnostics des révolutions industrielles, avancent que les deux premières sont reliées aux énergies fossiles (d'abord le charbon puis le pétrole) alors que les deux secondes sont soutenues par les nouvelles technologies (informatique et internet). Ces révolutions ont en commun l'introduction de ruptures dans les modes de consommation, de gestion et de production, impactant les salariés et le fonctionnement des entreprises.

Le charbon a été un moteur de l'ère industrielle et nécessitait beaucoup de main d'œuvre tant pour l'extraction que pour l'usinage (Verley, 1997 ; Woronoff, 1998). Avec l'avènement de l'électricité et le développement des réseaux ferroviaires et des transports en général – notamment avec l'internationalisation des échanges –, le pétrole va venir progressivement se substituer au charbon et va donner une nouvelle impulsion à l'industrialisation et à l'avènement de la production de masse. Pour Verley (1997, p. 20-21), « l'industrialisation serait intervenue lorsqu'on aurait su produire mieux avec de nouvelles techniques, lorsque suffisamment de capitaux auraient été accumulés pour permettre de lancer le mouvement, [et] lorsqu'on aurait disposé de la main d'œuvre nécessaire ». Plusieurs conditions sont donc indispensables pour que l'industrialisation - en réponse à des besoins et des modes de consommation qui évoluent - s'opère avec des incidences fortes sur les modes de production, de fonctionnement et de gestion des entreprises (Woronoff, 1998).

Les innovations, à cette époque, des procédés de production, ont donc redessiné les espaces de travail, les chaînes de création de valeurs, les périmètres et profils des métiers et surtout le rapport Homme/Machine qui n'était pas du tout un enjeu pour la production artisanale... mais cela (1) a pris du temps et (2) n'a pas été sans incidences sur le rapport au travail et le sens singulier que chaque salarié lui accorde.

La donne semble changer avec l'avènement des deux révolutions industrielles suivantes ; celles basées sur le développement des nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) et l'avènement d'internet. Ce qui caractérise et distingue ces révolutions des deux précédentes c'est leur rythme d'évolution rapide. Au focal de ces révolutions nous trouvons la notion d'information qui devient l'unité génératrice de valeur ajoutée pour les entreprises et qui vient transformer les espaces de travail et les modèles et pratiques de gestion. La place active de l'utilisateur-acteur des nouvelles technologies vient interroger le travail, son sens et sa finalité. Plusieurs disciplines se saisissent de ces enjeux pour apporter des éclairages utiles aux développements de pratiques et d'espaces de travail performants et sains. Ainsi, l'ergonomie du travail se soucie de l'interface humain-machine et fournit les pistes pour réduire la distance entre ces deux entités et optimiser l'usage de ces dispositifs de travail (Brangier, 2002). Les sciences de gestion s'intéressent aux outils d'intervention pour augmenter l'acceptabilité des changements qu'engendrent les innovations technologiques au niveau des gestes professionnels et des routines de travail (Kalika, 2000). Des travaux récents en supply chain abordent les impacts de la dernière révolution industrielle

pour les acteurs de la chaîne de valeur (Berbain, 2016 ; Antomarchi, *et al.*, 2020) face aux enjeux de conception de produits personnalisés et un usage plus responsable des ressources naturelles. La FA est une illustration saillante de cette dernière révolution qui, au même titre que les précédentes, remet en cause des modes de fonctionnement, des métiers et des contextes de travail à évolution rapide.

## **2. La fabrication additive pilier de l'industrie 4.0**

La FA regroupe sept familles de procédés additifs (Morand *et al.*, 2017), se distinguant par la source d'énergie (laser, électron, etc.), le matériau (filament de plastique, poudre, etc.) et la technologie (dépôt de filament, fusion laser, etc.), utilisés pour obtenir un produit fini en une seule étape de production contrairement aux procédés conventionnels (usinage et moulage). Les premiers brevets de procédés additifs ont été déposés simultanément aux USA et en France dans les années 1980. Ils ont été longtemps cantonnés à un usage exclusif pour la fabrication de prototypes visuels puis de prototypes fonctionnels avec une meilleure maîtrise des procédés. L'expiration des brevets a permis à de nombreux industriels de se saisir et d'améliorer ces procédés. Dès lors, ils ont connu une forte progression avec de nombreuses innovations suite à la création de nouveaux matériaux, l'amélioration de la vitesse d'impression des imprimantes 3D et le développement de nouveaux procédés (par exemple la fusion sur lit de poudre).

Gibson et ses collègues (2021) détaillent le processus de production des procédés additifs en différentes étapes que nous résumons en trois phases principales : **(1)** réglages, paramétrages et chargement du matériau dans l'imprimante 3D nécessitant une intervention humaine (à distance ou à proximité de l'imprimante), **(2)** fabrication s'opérant de manière autonome et pouvant être lancée à distance, et **(3)** déchargement des produits finis et réalisation d'opérations de finition parfois nécessaires pour augmenter la résistance mécanique des pièces ou tout simplement améliorer leur état de surface. Cette dernière phase nécessite aussi une intervention humaine à proximité de l'imprimante. Il faut noter que de nombreuses opérations peuvent être pilotées à distance (réglages, paramétrages et lancement de la fabrication), mais certaines nécessitent une manipulation physique par des opérateurs de production qualifiés et à proximité de l'imprimante 3D. Les procédés additifs sont dits numériques car ils permettent, à partir d'un fichier numérique (conception 3D des pièces) transmis à l'imprimante, de réaliser un objet physique. Ils offrent aussi une plus grande liberté de conception car ils s'affranchissent des contraintes dues aux outillages nécessaires dans les procédés conventionnels. Ainsi, des pièces plus complexes peuvent être désormais fabriquées.

Ces procédés rencontrent un franc succès dans les industries aéronautique, armement et aussi celles nécessitant des produits personnalisés à forte valeur ajoutée (joaillerie, prothèses, etc.). Cette croissance d'usage pose néanmoins quelques problèmes et défis aux entreprises (Patil, *et al.*, 2023 ; Friedrich, *et al.*, 2022 ; Antomarchi, *et al.*, 2020) surtout concernant l'acceptation par les usagers de cette nouvelle technologie qui questionnent l'évolution des métiers, avec des déficits en compétences et en formations, les modifications des routines de travail et les interactions hommes-machines liées à l'adoption de cette technologie.

## **3. Les éclairages de l'UTAUT sur les transformations RH de la fonction de production induites par l'adoption industrielle de la FA**

L'analyse des enjeux de l'adoption de la FA peut être appréhendée selon les apports des théories de l'acceptation de la technologie, qui ont d'abord été développées dans le champ des systèmes d'information, puis, progressivement, inscrites dans les recherches en sciences de gestion. Une abondante littérature existe aujourd'hui au sujet des environnements numériques

de travail (ENT). Les premières questions qu'ont soulevées les ENT concernent le niveau de connaissance, de maîtrise et d'usage des technologies nécessaires à la création des biens et des services. Les secondes questions ont quant à elles trait aux conditions d'acceptation de ces nouveaux environnements de travail. Deux modèles, fondés sur des approches en psychologie sociale, dominent ce champ : le TAM (*Technology Acceptance Model*) (Davis, 1989, 1993) et l'UTAUT (*Unified Theory of Acceptance and Use of Technology*) (Venkatesh *et al.*, 2003 ; Venkatesh *et al.*, 2016). Ils permettent d'éclairer les perceptions d'utilité et de facilité d'usage pour expliquer l'intention d'usage, puis l'usage effectif des technologies. En intégrant divers stimuli internes (sentiment d'auto-efficacité, perception de contrôle...) et externes (infrastructure organisationnelle, niveau de technicité de la solution...), ils proposent une approche processuelle pour analyser les conditions d'acceptation des nouvelles technologies ou de résistance face à leur usage.

Le TAM, modèle de référence dans la littérature, présente, selon nombre de recherches (King & He, 2006 ; Bagozzi, 2007 ; Venkatesh, *et al.*, 2003), certaines limites. Il s'agit principalement du fait que les résultats des études empiriques ne soient pas constants, que ce modèle soit centré sur les intentions, et qu'il soit focalisé sur l'individu, marginalisant ainsi le poids du contexte et les impacts organisationnels de l'adoption d'une nouvelle technologie.

L'UTAUT (Venkatesh, *et al.*, 2003 ; Venkatesh, *et al.*, 2016 ; Marikyan & Papagiannidis, 2023) semble dépasser ces limites et permet d'appréhender l'adoption d'une nouvelle technologie en intégrant une analyse de l'intention et du comportement d'adoption et en tenant compte de la dimension sociale et organisationnelle dans les comportements d'adoption. Ce modèle permet, selon Jawadi (2014) et Marikyan et ses collègues (2023), de retenir des déterminants directs de l'intention (performance, effort et influence sociale), des déterminants de l'usage (conditions facilitatrices de culture managériale) et des déterminants liés aux expériences passées, à la familiarité avec les innovations technologiques et au caractère volontaire ou contraint de l'usage de la technologie. La technologie est, dans ce contexte, la variable qui vient interroger les pratiques professionnelles, voire le rapport au travail.

Appréhender l'usage et l'acceptation d'une nouvelle technologie, comme la FA, par le recours à l'UTAUT suppose selon Sagnier *et al.* (2019) de s'attarder conjointement sur l'acceptabilité pratique (utilisabilité et bonne expérience utilisateur) et sur l'acceptabilité sociale (située dans un contexte et vécu par des usagers). Cela permettrait de mieux comprendre les transformations des structures socio-organisationnelles existantes et l'impact des nouvelles technologies sur les savoir-faire, les compétences, les habitudes de travail et les gestes professionnels (Bobillier-Chaumon, 2003 ; Kalika, 2000), ainsi que les niveaux d'acceptation ou de résistance des acteurs face à ces changements. Nous confrontons, dans ce qui suit, ces explications théoriques à une réalité organisationnelle singulière, celle d'une entreprise de l'aéronautique suivie pendant quatre ans et qui a mis en place la FA pour la production industrielle de pièces fonctionnelles.

### **III. METHODOLOGIE**

#### **1. Contexte de la recherche**

Le recours à une recherche qualitative et exploratoire nous semble pertinent puisque la FA pour la production industrielle reste un fait peu répandu dans les entreprises. Cette méthode permet une analyse approfondie des sujets nouveaux, des impressions et des perceptions des acteurs centraux d'une problématique (Miles & Huberman, 2003). À l'instar de récentes

recherches sur le sujet (Antomarchi, *et al.*, 2020 ; Friedrich, *et al.*, 2022 ; Patil, *et al.*, 2023), nous adoptons une approche inductive à partir d'une étude de cas unique (Yin, 2009).

Il s'agit d'une entreprise d'aéronautique française spécialisée dans la FA pour la production de pièces fonctionnelles en série dont les exigences diffèrent de celles des prototypes et des pièces de rechange en termes de coût de production, de délai, de répétabilité, de qualité et de compétences du personnel en charge de la production. Cette entreprise est parmi les rares entreprises à l'échelle mondiale à avoir été certifiée par un grand constructeur pour la fabrication de pièces métalliques avec des procédés additifs. Cette certification lui a permis un développement international rapide en 3 années avec l'ouverture de 6 usines (4 en Europe, 1 aux USA et 1 au Japon) et une maîtrise de la chaîne de valeur totale pour un usage industriel de la FA, à savoir : Conception 3D/Optimisation topologique, Impression 3D, Post-processing et transport en créant des partenariats et joint-venture avec trois entreprises maîtrisant les compétences et métiers de la conception 3D, l'usinage de pièces mécaniques de précision et la fabrication d'aciers spécifiques à l'industrie aéronautique.

## **2. Données collectées et échantillon**

La collecte des données a duré quatre ans et se fonde sur : **(1)** des entretiens compréhensifs (menés dans l'entreprise étudiée et avec certains de ses fournisseurs et clients ; voir tableau 1), **(2)** des visites de sites de production, **(3)** des conférences spécialisées et **(4)** des rapports annuels sur l'impression 3D effectués par des cabinets spécialisés en FA. Les données primaires sont les entretiens compréhensifs et les visites et observations silencieuses des sites de production. Les autres données (secondaires), notamment les entretiens avec des experts du champ FA et enseignants-chercheurs, nous ont permis de nous familiariser avec ce sujet récent et de situer nos observations dans un contexte précis (Voir encadré 1 pour plus de détails).

## **3. Démarche d'analyse des résultats**

Les données primaires et secondaires recueillies permettent d'avoir une vision claire de ce cas d'entreprise afin d'appréhender avec rigueur l'impact de la mise en place de la FA dans les espaces de production et auprès des acteurs de cette fonction. Les entretiens compréhensifs réalisés se basent sur la conversation usuelle comme méthode de restitution de vécus (Knuth, 2000). Ils permettent une plus grande liberté des répondants et des thèmes abordés. En cohérence avec cette posture, et compte tenu du caractère stratégique des données concernant la FA, nous n'avons pas été autorisés à enregistrer tous les entretiens. Mais une prise de notes précise nous a permis de garder une qualité de verbatims et de récits satisfaisante.

Une fois le corpus constitué (prise de notes, observations et retranscriptions) nous avons réalisé une lecture flottante des données collectées (Bardin, 2013) et structuré les propos recueillis autour de trois thèmes (Miles & Huberman, 2003) que les répondants ont associé à la mise en place de la FA et ses enjeux RH. Il s'agit **(1)** de la transformation des métiers et des besoins en compétences et en formations ; **(2)** du nécessaire recours à une intelligence et un apprentissage collectif ; et **(3)** de la construction d'une culture FA qui transcende les frontières de l'entreprise et de son écosystème local.

## **IV. RESULTATS**

Nos résultats permettent d'observer des modifications progressives (parfois lentes) des usages et des résistances face à un changement de technologie, pourtant radical, introduit par la FA ainsi que la conjugaison, à parfaire, de l'adoption individuelle, organisationnelle, et

situationnelle de la FA par l'ensemble des acteurs de l'écosystème de l'entreprise. Au-delà des spécifiques techniques de la FA qui impactent les flux d'information et de matière au niveau de la chaîne de valeur, les modifications observées, dans notre cas, concernent, particulièrement, des dimensions RH de la fonction de production et ses acteurs (voir tableau 2 en annexe).

### **1. Transformation des métiers et des compétences des acteurs de production**

Le premier constat qui se dresse concerne la transformation des métiers et des besoins en compétences et en formation qui accompagnent l'adoption de la FA. Comme le souligne [R2] lors des premiers entretiens réalisés : « *Le passage de la phase de prototypage à la production en série est en train de nous faire poser beaucoup de questions. Il va y avoir un impact sur tous les métiers et sur toutes les entreprises impliquées dans la chaîne de valeur* ». Les propos des dirigeants de l'entreprise sont en résonance avec les conclusions des experts de la FA interrogés lors des conférences. Ces derniers avancent qu'il est crucial d'avoir un personnel technique de production avec des compétences avancées en matière de design 3D (optimisation topologique) et de maîtrise des procédés de FA tout au long du processus de production (paramétrage, chargement et déchargement de l'imprimante 3D et post-processing) pour une adoption réussie de la FA. La variété des compétences à mobiliser est également saisie par les acteurs de proximité comme l'affirme le responsable de production qui précise qu' : « *avec [la FA] en théorie on peut tout faire, ... Mais quand on passe en série, il faut maîtriser plusieurs métiers : il est important de maîtriser l'électronique et la mécanique si l'on veut s'occuper des machines, la conception mécanique en 3D si l'on veut travailler plus en amont sur la conception des pièces et le post-processing si l'on veut travailler plus en aval sur la finition et la qualité des pièces ... D'ailleurs je pense qu'il faut au minimum être ingénieur pour gérer la production [rires]* » [R4].

Pour notre cas, la transformation des métiers et des compétences est un sujet très saillant pour l'entreprise puisqu'elle a adopté une stratégie d'intégration verticale – en rachetant des entreprises spécialisées dans la correction du fichier numérique et la production de la poudre de titane pour fiabiliser les approvisionnements – qui s'accompagne par un élargissement de l'éventail des compétences et des métiers détenus désormais par l'entreprise. De plus, la rareté des profils spécialisés en FA contraint davantage l'entreprise, comme le constate un membre de la direction : « *les profils qualifiés en [FA] sont rares, il y a très peu de formations en [FA], on a du mal à recruter* » [R1]. Cela a conduit l'entreprise à adopter une démarche proactive pour pallier les besoins futurs en compétences FA en s'associant, très tôt, à des organismes de formation spécialisés (universités et écoles d'ingénieurs).

Les défis en matière de développement et d'acquisition des compétences FA semblent stimuler les membres de la direction ; mais le son de cloche est plus nuancé chez les techniciens de la production qui voient les conditions de travail, les rythmes et les modalités de contrôle changer et susciter autant d'avantages (flexibilité, autonomie, créativité) que d'inconvénients (intervention urgente si dysfonctionnement, même si en dehors des horaires classiques de travail) comme l'illustre cet événement relaté par l'un des techniciens interrogés : « *en théorie, une fois que l'imprimante est lancée, elle est indépendante et fonctionne seule... mais si la production s'arrête en pleine nuit ou le WE... il faut gérer. On est connecté à distance à l'imprimante, mais au moindre incident (une coupure électrique, une coupure d'air comprimé, un défaut d'argon, etc.) il faut intervenir vite sinon les pièces se déforment et c'est fichu... ça m'est arrivé de revenir le dimanche pour intervenir... j'avoue que ça ne m'emballait pas trop...* » [R10].

### **2. Importance de l'intelligence et de l'apprentissage collectif**



Le second constat de nos résultats concerne l'importance de l'intelligence et de l'apprentissage collectif. Cette idée est présente dans la collaboration initiée avec les organismes de formation pour anticiper les besoins en compétences FA qui diffèrent des procédés classiques de production : [R1] « *Il est important de faire prendre conscience de l'impact de cette nouvelle technologie ; pour des patrons, il faut qu'ils aient une réflexion différente, et qu'ils prennent conscience que demain les besoins de métiers sont totalement différents... si je prends la partie conception, la formation de designer aujourd'hui est totalement différente entre quelqu'un qui faisait du design sur 2D, quelqu'un qui demain va devoir se projeter dans la fonctionnalité de la pièce pour pouvoir faire le design approprié en 3D* ». Cette technologie est nouvelle et son application concerne souvent des secteurs hautement sensibles et stratégiques. Cependant, les acteurs évoluant dans ces industries, telle l'entreprise étudiée, sont conscients que pour suivre ces innovations et accélérer leur développement et leur adoption il est nécessaire de bénéficier des retours d'expérience d'implémentations industrielles de la FA dans d'autres entreprises. En ligne avec cet objectif, [R2] nous rapporte que : « *après le réseau, bien en fait on est, on est rentré partout, [Louis] et moi, mais partout, partout, dans tous les pôles de compétitivité de chaque région. [Louis] est à l'AFNOR qui est en train d'écrire les normes mondiales. Voilà, on est au GIFAS, on consulte toutes les thèses qui apparaissent...* ». Les dirigeants de l'entreprise étudiée exercent ainsi une veille sur tous les sujets et aspects de la FA afin d'augmenter leur performance, adapter l'usage de la FA par les collaborateurs et maintenir un avantage concurrentiel sur un marché mondial hyperconcurrentiel.

Cependant, constituer, dans un tel contexte, un réseau d'acteurs pour un apprentissage collectif optimisé reste très difficile à mettre en place tant les talents en FA sont rares et les résistances des parties prenantes multiples. Identifier et retenir les talents qui détiennent un savoir et savoir-faire rare représente un enjeu essentiel dans la construction de l'apprentissage collectif qui permet le partage des savoirs entre des entreprises de l'aéronautique davantage habituées au secret professionnel, ce qui constitue un premier niveau de résistance de ces acteurs. Le second niveau de résistance qui peut freiner l'intelligence et l'apprentissage collectif réside dans les craintes des acteurs quant aux caractéristiques des pièces produites par des procédés additifs. À titre d'exemple, nous citons le cas d'un client de l'entreprise étudiée, qui a exigé outre la certification des pièces fabriquées par la FA, la certification de la machine qui a produit les pièces ; ou le cas de la saturation des laboratoires à cause des tests répétés sur chacune des pièces produites (et non sur un échantillon comme pour l'usinage classique), comme l'affirme [R3] : « *Dans le cas de la FA, même pour les produits fabriqués en série on fait des essais systématiques, ce qui est en train de démultiplier le nombre d'essais et donc la capacité laboratoire sature, ça aussi ça va être un effet limitant* ».

### **3. Construction d'une culture FA commune : Maturité d'usage et appropriation par les acteurs**

Le troisième résultat qui interroge des dimensions RH de la fonction de production concerne la construction d'une culture FA qui transcende les frontières de l'entreprise et son écosystème local. Le cas étudié nous permet de mesurer l'enthousiasme des dirigeants, leur maîtrise des enjeux de la FA pour la production industrielle et les efforts continus qu'ils consentent pour maîtriser cette technologie en interne et la faire accepter par les acteurs de l'écosystème. Les dirigeants impulsent, par leur engagement et par leurs actions, les fondements d'une culture d'entreprise favorable au développement de la FA. Même si les entreprises évoluant dans le secteur de l'aéronautique sont familières des transformations et des innovations technologiques, nous observons que la diffusion d'une culture FA auprès des acteurs internes et externes de l'entreprise rencontre certaines résistances. C'est ce que constate [R5] quand il affirme qu'« en FA, la façon de penser pour le design doit être

différente, donc il faut avoir une ouverture d'esprit, donc il faut changer les mentalités et ça prend du temps... ».

Ce besoin de changement des mentalités ne concerne pas seulement les acteurs internes de l'entreprise et touche également des acteurs externes comme le constate [R15] qui affirme que « *les fabricants d'imprimante 3D sont tous quasiment des fabricants qui viennent du B to C ... et on s'aperçoit que toute la supply chain de maintenance de ces machines n'existe pas et c'est aussi un frein pour un usage industriel de la FA* ». Le constat dressé par les experts rejoint ces idées en précisant que la technologie est mature mais qu'il y a un manque d'une culture industrielle FA alimentée par un manque d'expérience et de recul, surtout lorsqu'il s'agit de production industrielle en série.

## V. DISCUSSION

Le recours à l'UTAUT (Venkatesh, *et al.*, 2003 ; Venkatesh, *et al.*, 2016 ; Marikyan & Papagiannidis, 2023) pour comprendre les évolutions de la fonction de production induites par l'usage industriel de la FA nous éclaire sur les mutations de ses dimensions RH mettant en avant les conditions d'une acceptation pratique, au plus proche de l'exécution des tâches, et celles d'une acceptation sociale, située dans un contexte, une temporalité et des acteurs en interaction. Le cas étudié éclaire les moteurs et les freins à l'adoption de la FA dans un contexte de production en série.

L'acceptation pratique (Sagnier, *et al.*, 2019) situe l'analyse au niveau de l'individu et de son rapport à la nouvelle technologie. Nos résultats démontrent un rapport différencié entre les acteurs qui ont choisi la FA et se sont investi dans son adoption dans l'entreprise et ceux qui ont « subi » cette nouvelle technologie. Ainsi, les dirigeants, impliqués dans divers organismes et associations professionnelles en recherche d'une intelligence et d'un apprentissage collectifs, ont manifesté un enthousiasme certain tout au long de la période d'observation de notre cas. L'utilité perçue de la FA pour la production industrielle n'a jamais été remise en question par ces acteurs et elle a motivé les stratégies de développement et d'intégration mises en place. Elle a également permis de justifier les investissements importants réalisés en matière de machines mais surtout en matière de développement de compétences et de fidélisation des talents rares. Les acteurs ayant davantage « subi » l'adoption de la FA ont été plus mitigés quant à l'usage de cette technologie puisqu'ils ont vu leurs métiers se transformer (compétences, gestes professionnels, périmètre, temporalité, autonomie, technicité), positivement pour certains, et plus difficilement pour d'autres.

L'acceptation sociale (Sagnier, *et al.*, 2019) déplace l'analyse au niveau de l'organisation exigeant de considérer l'adoption de la FA dans un contexte situé qui tient compte de l'ensemble des acteurs de l'entreprise et ses parties prenantes internes et externes. L'utilité perçue a suscité, auprès des parties prenantes externes (principalement les clients et les fournisseurs) des attitudes et des comportements de prudence en exigeant plus de certifications, et parfois même, une forme d'ingérence. Cette défiance s'exprime avec intensité dans les premiers temps d'observation mais semble devenir moins intense, lorsque l'entreprise a consacré du temps et des efforts de pédagogie pour expliquer à ses partenaires les avantages d'une production industrielle avec la FA. Les investissements dans la construction d'une culture facilitatrice de l'intégration des innovations technologiques permet à celle-ci de se diffuser progressivement auprès de toutes les parties prenantes du cas analysé.

Apparaissent en filigrane de ces processus d'acceptation et de résistance des questions éminemment liées à des dimensions RH de la fonction de production. Formation, compétence, gestion des talents, intelligence et apprentissage collectif sont les défis que les entreprises adoptant la FA rencontrent situant ainsi les ressources humaines comme un facteur clé de

succès (Urbain, 2018). L'importance de ces questions lors des grandes mutations des révolutions industrielles se fait également ressentir pour la 4<sup>ème</sup> révolution industrielle. Les changements observés au niveau des métiers et des qualifications nous permettent d'avancer que nous faisons le chemin inverse de celui engagé par l'organisation scientifique du travail, puisque la FA impose le regroupement en une seule opération complexe la production d'une pièce mais en ayant recours à du personnel très hautement qualifié (Morand, *et al.*, 2017). Le défi du recrutement de cette main d'œuvre apparaît comme le premier enjeu souligné par les membres de la direction dans notre cas et par les spécialistes du secteur.

Cet enjeu n'est pas spécifique à cette entreprise puisque toute l'industrie semble pâtir du manque de main d'œuvre qualifiée comme l'atteste la Société des Ingénieurs Industriels : 9 industriels sur 10 ont du mal à recruter une main d'œuvre qualifiée. Ce résultat est en cohérence avec les constats du rapport de Vazquez et ses collègues (2016). S'intéressant au cas de la FA aux Etats Unis, il nous alerte sur divers faits : **(a)** la retraite anticipée de la main d'œuvre qualifiée et le vieillissement du personnel de production avec le passage de l'âge moyen de 40,5 ans en 2000 à 44,9 ans en 2013 ; **(b)** la perception négative des milléniaux de l'industrie manufacturière ("*sale, dangereuse et offrant une sécurité de carrière limitée*") ; **(c)** la baisse des salaires de 4,4 % en une décennie (2003-2013) ; **(d)** le manque de compétences en technologie, ingénierie et mathématiques sur le marché manufacturier et la rareté des profils. Les données relatives au contexte français vont dans le même sens puisque la dernière enquête *Besoins en Main d'Œuvre* menée par le Pôle Emploi (Crédoc, 2023), montre que l'industrie manufacturière peine à recruter et le métier de techniciens qualifiés en traitement thermique et de surface (opérations de post-processing) apparaît en deuxième position dans le top dix des métiers pour lesquels les entreprises ont du mal à recruter avec un ratio de 80,2%.

Cette pénurie peut favoriser une compétition accrue entre les industriels pour dénicher des talents rares surtout en FA. Ceci peut être expliqué par une offre très limitée de programmes de formation spécifiques. Dans le rapport de la Chambre de Commerce et de l'Industrie Paris IDF (Rosenberg, Morand & Turcq, 2015) la 14<sup>ème</sup> recommandation, pour favoriser l'implémentation réussie de la FA, met en avant la nécessité d'« *encourager et permettre l'émergence et l'appropriation des compétences nouvelles exigées par ces technologies* ». Certains grands industriels européens (Michelin, Airbus...) assurent la formation de leurs propres personnels de production. L'entreprise étudiée a fait le choix de s'associer à des organismes de formations pour garantir la qualité de la formation dans une démarche de construction collective des connaissances pour un apprentissage opérationnel et utile.

Outre ces enjeux, garder ces talents dans l'entreprise relève du parcours du combattant en raison de la tension observée sur le marché du travail concernant cette catégorie de main d'œuvre. Les résultats de notre étude nous alertent sur cet enjeu puisque plusieurs répondants l'ont souligné et que le turnover, constaté lors de nos observations, dans le personnel de production en FA le prouve. Ce constat est en phase avec les conclusions du rapport de Vazquez et ses collègues (2016) qui précise que pour les industries mettant en place la FA, le turnover est plus important que dans l'industrie manufacturière conventionnelle.

Pour appréhender ces défis RH, notre cas alerte sur la nécessaire diffusion d'une culture FA qui oriente l'ensemble de ces pratiques RH touchant toutes les parties prenantes pour garantir la réussite de la transformation de la fonction de production. En nous appuyant sur les travaux traitant de culture d'entreprise (Schein, 1983 ; Schwartz & Davis, 1981), nous considérons que la culture FA est un ensemble de principes directeurs, d'une philosophie et d'un langage communs, d'un système de contrôle ainsi qu'une gestion symbolique des rites et des rituels de fonctionnement, qui dépasserait le cadre des acteurs internes de l'entreprise et de la fonction de production en particulier, pour intégrer tous les acteurs participant à la

chaîne de valeur. La figure 1, en annexe, présente le caractère central de la culture FA qui vient définir la raison d'être des pratiques RH et orienter leur mise en œuvre effective.

## VI. CONCLUSION

La FA révolutionne la production en transformant, en une seule opération complexe, un matériau en un produit fini s'affranchissant ainsi des contraintes de conception, de longs délais dus aux ruptures de charges et de grands volumes de stocks d'en-cours de production dus à des gammes de fabrication complexes. La digitalisation de la fabrication représente une opportunité pour les produits fonctionnels fabriqués en série, mais elle soulève également de nombreux défis (structurels et humains). Les explicitations fournies par notre développement théorique et par notre investigation de terrain nous permettent d'apporter des éléments de réponses à l'analyse des mutations des dimensions RH de la fonction de production. Le regard croisé entre la supply chain et les ressources humaines permet de conjuguer les logiques économiques et humaines et d'apporter plusieurs contributions théoriques et managériales.

Concernant les apports théoriques, cette recherche alimente les connaissances au sujet de la FA et de l'incidence de sa mise en œuvre sur les modes de fonctionnement des entreprises et ses parties prenantes. En effet, la FA est éminemment un sujet dont la technicité est importante. Les clarifications conceptuelles apportées à ce sujet nous semblent une contribution en soi puisqu'elles sont en mesure d'aider les recherches futures en disposant d'une compréhension claire de ce procédé de fabrication. De plus, en mobilisant la théorie de l'UTAUT nous offrons la possibilité d'observer avec acuité un phénomène qui interpelle les perceptions des acteurs de la fonction de production dans un contexte organisationnel situé. Le dernier apport théorique concerne le recours conjoint à une littérature sur la fonction de production et une littérature plus spécialisée en RH pour saisir la complexité des incidences de la FA dans les organisations.

Nos contributions pratiques sont, quant à elles axées sur trois points : **(1)** la transformation des métiers avec de nouveaux besoins en compétences et en formations ; **(2)** l'évolution rapide des procédés additifs nécessitant le concours de tous les acteurs pour une mutualisation des savoirs et des connaissances ; **(3)** la nécessité de bâtir collectivement (à l'échelle de l'écosystème) et de diffuser une culture FA.

S'agissant du premier point, la FA transforme de nombreux métiers associés directement et indirectement à la fonction de production. Concernant les métiers directs, les changements observés sont liés à la conception 3D, à la gestion et au pilotage de la production, aux opérations de post-processing et ceux liés à la maintenance et la gestion de la qualité. Quant aux métiers indirects, ils concernent la production de nouveaux matériaux et la conception et développement d'imprimantes 3D compatibles avec l'usage industriel de la FA. Cette transformation, voire création, de ces métiers nécessite une étroite collaboration entre les organismes de formation et les associations industrielles pour constituer un vivier de talents et assurer l'actualisation de leurs compétences. Une élaboration de nouveaux programmes semble importante et le recours à des modalités de formation innovantes est nécessaire comme le souligne Gosse et Dancette (2016 : 31) « Le développement des nouvelles techniques de formation, d'auto-apprentissage, de capitalisation des connaissances pour tous les acteurs de l'organisation et de la chaîne hiérarchique est la clé du succès de la mise en œuvre de l'usine du futur et de l'attractivité de notre appareil productif ». Pour Cai et ses collègues, (2013) le recours à l'« *immersive learning and advanced manufacturing* » est une alternative à retenir pour une formation de qualité en se basant sur les avantages de l'expérientiel et garantir la construction de sens qui semble nécessaire aux millénaires (Vazquez, *et al.* 2016).

La seconde recommandation concerne l'importance du concours de tous les acteurs pour une mutualisation des savoirs et des connaissances. Les évolutions industrielles en FA sont rapides, que ce soit pour les matériaux, les procédés, les imprimantes, les logiciels et la conception, nécessitant le maintien à jour des connaissances des talents. Pour contribuer et bénéficier de l'intelligence et de l'apprentissage collectif, être un membre actif d'instances de réflexion et de décision au niveau régional, national et international nous paraît un moyen efficace. Ces instances sont diverses pouvant être des associations professionnelles (chambre des métiers), partenariat avec des universités et des écoles d'ingénieurs pour la formation et la recherche et des organismes nationaux ou internationaux de normalisation et de certification (ex. Afnor).

La troisième recommandation porte sur la construction et la diffusion d'une culture FA développée avec et pour les acteurs de l'écosystème. La troisième révolution industrielle a poussé les entreprises à se focaliser sur le cœur de leurs métiers et donc la spécialisation. L'usage industriel de la FA semble interroger ce paradigme et les force à aller au-delà de leur cœur de métiers pour maîtriser l'ensemble des compétences de la chaîne de valeur de la FA. Cela passe par des joint-ventures, des partenariats et des incubations de start-up. Il apparaît nécessaire pour une bonne diffusion de la technologie dans cet écosystème, au-delà de partager des connaissances, de coconstruire une culture industrielle FA impliquant des valeurs et des visions communes.

Les apports tant théoriques que pratiques doivent être étudiés à la lumière des limites de cette étude. S'agissant d'une étude de cas unique, les conclusions que nous dressons ne peuvent pas être généralisés. De plus, même si la durée de notre observation est significative (4 ans), elle n'a malheureusement pas pu être continue et certains événements critiques ont pu nous échapper. Dépasser ces limites est en soi une perspective de recherche. Nous pouvons également ajouter l'intérêt à porter dans les recherches futures à la comparaison de plusieurs cas pour explorer les différences locales qui peuvent freiner/motiver l'adoption de la FA. Nous pensons également que la jeunesse de ce champ de recherche ouvre des perspectives intéressantes pour questionner la transformation des identités des professions avec la présence de plus en plus importante de l'IA dans la fonction de production ou encore les questions éthiques et de développement durable liées à ces procédés additifs.

## REFERENCES

- Antomarchi, A.L., Durieux, S. & Duc, E. 2020. "Impact de la fabrication additive sur la supply chain : état des lieux et diagnostics". *Logistique & Management*. Vol. 28, n° 1, p. 29-47.
- Bardin, Laurence. 2013. *L'analyse de contenu*, Coll. Quadrige, 2ème édition : PUF. Bobillier-Chaumon, Marc Éric. 2003. « Évolutions techniques et mutations du travail: émergence de nouveaux modèles d'activité ». *Le Travail Humain*. 66 (2) : 161-192.
- Bovey, Wayne and Hede, Andrew. 2001. "Resistance to organisational change: the role of defence mechanisms". *Journal of Managerial Psychology*. 16 (7): 534-548.
- Brangier, Éric. 2002. « L'assistance technique comme forme de symbiose entre l'homme et la technologie. Esquisse d'un modèle de la symbiose homme-technologie- organisation ». *Revue d'Interaction Humain-Machine*. 3 (2) : 19-34.
- Bretonès, Daniel. 2014. « L'accélération de la troisième révolution industrielle: quelle place pour l'Europe? ». *Vie et Sciences de l'Entreprise*. 2, 6-9.
- Caron, François. 1997. *Les Deux révolutions industrielles du XX<sup>ème</sup> siècle*. Albin Michel.
- Cai Yiyu, Chor Ter Tay and Boon Keong Ngo. 2013. *Introduction to 3D Immersive and Interactive Learning*. In: Cai Y. (eds) *3D Immersive and Interactive Learning*, Singapore: Springer, 127 pages.
- Crédoc. 2023. *Enquête Besoins en Main-d'Œuvre*, France : Crédoc et Pôle Emploi, 74 pages.
- Davis, Fred D. 1989. "Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology". *MIS Quarterly*. 319-340.
- Davis, Fred D. 1993. "User acceptance of information technology: system characteristics, user perceptions and behavioral impacts". *International Journal of Man-Machine Studies*. 38 (3): 475-487.
- Woronoff, Denis. 1998. *Histoire de l'industrie en France du 16<sup>ème</sup> siècle à nos jours*, Coll. : Points.
- Friedrich, A., Lange, A. and Elbert, R. 2022. "Supply chain design for industrial additive manufacturing". *International Journal of Operations & Production Management*. Vol. 42 n° 11, p. 1678-1710.
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. & Khorasani, M. 2021. *Additive Manufacturing Technologies*, 3rd edition, Springer, New York.
- Gosse, Karine et Dancette, Michel. 2016. « À quoi l'usine du futur ressemblera-t-elle ? ». *Annales des Mines-Réalités Industrielles*. (4) : 27-31.
- Guillouzouic-Le Corff, Arthur. 2013. « L'impression tridimensionnelle, une technologie clé pour les usines du futur ? ». *Annales des Mines-Réalités Industrielles*. (4) : 88-97.
- Hoareau, É., Ageron, B. & Bidan, M. 2023. "Supply chain unicorn hunt: the elusive quest for HR". *Revue de Gestion des Ressources Humaines*. Vol. 128, no 2, p. 60-79.
- <http://www.industrie-dufutur.org/> consulté le 22 janvier 2024
- Kalika, M. 2000. « Filemanagement est mort, vive le e-management », *Revue Française de Gestion*. 129, 68-74.

- Knuth, M. 2000. "A Dialogue on Self and Work". *Organization*. 7(3): 477-488.
- Lapointe, L. and Rivard S. 2005. "A multilevel model of resistance to information technology implementation". *MIS Quarterly*. 29(3): 461-491.
- Lemaître, N. 1984. « La culture d'entreprise, facteur de performance ». *Revue Française de Gestion*. 47(48): 153-161.
- Marikyan, D. & Papagiannidis, S. 2023. *Unified Theory of Acceptance and Use of Technology: A review*. In S. Papagiannidis (Ed), TheoryHub Book.
- Miles, Matthew B. et Huberman, A. Michael. 2003. *Analyse des données qualitatives*, 2<sup>ème</sup> éd. Paris : De Boeck.
- Morand, P., Rosenberg, J. et Turcq, D. 2017. « Fabrication additive: où en sommes-nous ? ». *Annales des Mines-Réalités Industrielles*. (1) : 113-116.
- Paché, G. 2009. « Quels impacts de la crise sur la logistique? », *Revue Française de Gestion*. 3 : 51-57.
- Patil, H., Niranjana, S., Narayanamurthy, G. and Narayanan, A. 2023. "Investigating contingent adoption of additive manufacturing in supply chains", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 43, N° 3, p. 489-519.
- Ponche, R. (2013). *Méthodologie de conception pour la fabrication additive, application à la projection de poudres*. Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Nantes (ECN).
- Rosenberg, J., Morand, P. et Turcq, D. 2015. *L'impression 3D : Porte d'entrée dans l'industrie du 21<sup>ème</sup> siècle*. Rapport de la CCI Paris Ile-de-france et CGARM Conseil général de l'armement. Paris: Chambre de commerce et d'industrie de région Paris-Ile de France, 368 pages.
- Schein, Edgar H. 1983. "The role of the founder in creating organizational culture". *Organizational Dynamics*. 12(1): 13-28.
- Schwartz, H., and Davis, Stanley M. 1981. "Matching corporate culture and business strategy". *Organizational dynamics*. 10(1): 30-48.
- Sculpteo (2015-2022). *The State of 3D Printing*. France, USA: Sculpteo.
- Urbain, Xavier. 2018. « Supply Chain Management et prestataires de services logistiques ». *Revue Française de Gestion*. 44(277) : 205-216.
- Vazquez, E., Passaretti, P., and Valenzuela, P. 2016. *3D opportunity for the talent gap: Additive Manufacturing and the workforce of the future*, A Deloitte series on additive manufacturing: Deloitte University Press, 24 pages.
- Venkatesh, V., Morris, Michael G., Davis, Gordon B. and Davis, Fred D. 2003. "User acceptance of information technology: Toward a unified view". *MIS Quarterly*. 425-478.
- Venkatesh, V., Thong, James YL., et Xu, X. 2016. "Unified theory of acceptance and use of technology: A synthesis and the road ahead". *Journal of the association for Information Systems*. Vol. 17, no 5, p. 328-376.
- Verley, P. 1997. *La Révolution industrielle*, coll., Paris : Folio Histoire, Gallimard.

**Tableau 1 : Les caractéristiques de l'échantillon**

N°	Fonction	Âge	Sexe	Ancienneté	Durée des entretiens	Secteur
R1	PDG***	45	H	6 ans	1h32 / 47' / 72'	FA pièces plastiques et métal
R2	DG**	34	H	10 ans	1h33 / 42'	Usinage pièces métalliques pour l'aéronautique
R3	Chef de Projet Industriel Fabrication additive	48	H	25 ans	67'	Construction aéronautique
R4	Responsable de Production / Ingénieur #*	30	H	3 ans	3h09' / 1h29'	FA pièces plastiques et métal
R5	Ingénieur Conception 3D **	29	H	4 ans	50'	FA pièces plastiques et métal
R6	Ingénieur qualité	26	F	2 ans	30'	FA pièces plastiques et métal
R7	Directeur commercial	30	H	1 an	2h03'	FA pièces plastiques et métal
R8	Technicien de production 1	32	H	N.D	47'	FA pièces plastiques et métal
R9	Technicien de production 2	27	H	N.D	45'	FA pièces plastiques et métal
R10	Ingénieur de production 3	28	H	N.D	52'	FA pièces plastiques et métal
R11	Technicien de production 4	30	F	N.D	28'	FA pièces plastiques et métal
R12	Ingénieur de production 5	28	H	N.D	33'	FA pièces plastiques et métal
R13	Ingénieur de production 6	29	H	N.D	44'	Mécanique de précision
R14	Technicien de production 7	32	H	2 ans	75'	Startup industrie textile
R15	CEO**	45	F	10 ans	2h15/1h20	Prestataire en impression 3D
R16	Expert procédé FA***	39	H	8 ans	1h20/45'/1h15	Membre Association de FA
R17	Expert procédé FA**	55	H	30 ans	1h30/1h15	Membre Association de FA
R18	Chercheur 1	44	F	8 ans	1h45	Enseignement et recherche
R19	Chercheur 2	46	H	8 ans	1h45	Enseignement et recherche
R20	Chercheur 3	32	F	6 ans	1h45	Enseignement et recherche
R21	Chercheur 4	28	H	2 ans	1h45	Enseignement et recherche

\*\* 2 entretiens

\*\*\* 3 entretiens

# Très long entretien 3 heures (3h et 9 minutes)



### **Encadré 1** : Sources de collecte de données

*Entretiens compréhensifs* : nous avons eu plusieurs entretiens répétés avec les mêmes personnes sur une période de 4 années ; CEO, Concepteur 3D, responsable de qualité, responsable et personnel technique de production. Nous avons aussi eu un entretien avec le responsable de la fabrication additive d'un constructeur aéronautique, qui est le client principal de l'entreprise X. Nous avons également eu des entretiens avec les dirigeants des entreprises qui sont liées à l'entreprise X par une joint-venture. La complémentarité des fonctions des personnes interrogées et la répétition des entretiens dans le temps nous a permis d'avoir une vision globale et approfondie de l'industrie de la fabrication additive et de ses spécificités. Le détail des personnes interrogées figure dans le tableau suivant.

*Visite de sites de production* : l'entreprise X nous a autorisées à visiter à plusieurs reprises deux de leurs sites de production ainsi que celui de leur partenaire spécialisé en usinage de pièces mécaniques pour l'industrie aéronautique, afin de comparer l'organisation de la production par FA à celle des procédés conventionnels. Durant ces visites, nous avons eu accès à des informations qui relèvent tant de la stratégie que d'aspects opérationnels sur l'ensemble du processus, en partant de la demande jusqu'à la livraison aux clients. En marge de ces visites et des entretiens planifiés, nous avons eu des échanges informels avec le personnel technique de production instaurant un climat de confiance pour des échanges où le discours institutionnel est moins présent et pour « délier les langues » au sujet des potentielles difficultés rencontrées. Notre présence deux journées complètes et consécutives à chaque visite et le partage des moments de convivialité (déjeuner et pauses café) y ont contribué.

*Conférences* : la participation active aux conférences académiques et professionnelles portant sur la fabrication additive a été une source importante de collecte de données secondaires pour situer les résultats plus spécifiques à l'entreprise X. Nous avons pu profiter d'opportunités d'échanges uniques avec des experts nous permettant d'approfondir et compléter nos connaissances sur les procédés de fabrication additive et de comprendre l'écosystème de cette industrie avec une analyse exhaustive des ressources nécessaires. L'importance des ressources humaines a d'ailleurs été un point central soulevé lors de ces conférences.

*Rapports annuels en Impression 3D* : dans un souci de compréhension, nous avons analysé les rapports réalisés par les cabinets de conseil spécialisés en Impression 3D, comme Gartner et Wohlers Associates, ainsi que l'enquête annuelle sur l'impression 3D (Sculpteo, The State of 3D Printing, 2015-2022) menée par un prestataire d'impression 3D pour les particuliers et les industriels. Nous avons d'ailleurs eu l'occasion de réaliser un entretien de 48 minutes avec une personne qui a contribué à ces études pour analyser avec précision les résultats de ces enquêtes.

**Figure 1** : Les mutations des dimensions RH de la fonction de production dans le contexte de la FA

