



Learner Centric Advanced Manufacturing Platform

D3.2 - M36 - Rapport de synthèse des 3 rapports : D3.2 - M36 Impacts des technologies numériques 4.0 et de la transition écologique sur la maintenance prédictive, la chaîne d'approvisionnement et l'alignement de l'offre de Centres d'enseignement et de Formation Professionnels sur les besoins de l'industrie dans le secteur de la fabrication de pointe au Pays basque

WP3 – Observatoire – D3.2 – M36 – Rapport de synthèse



**Co-funded by
the European Union**

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.



Co-funded by
the European Union

Financé par l'Union européenne. Les points de vue et opinions exprimés n'engagent toutefois que leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement ceux de l'Union européenne ou de l'Agence exécutive européenne pour l'éducation et la culture (EACEA). Ni l'Union européenne ni l'EACEA ne peuvent en être tenus responsables.



Ce travail est sous licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale 4.0 International.

Partenaires de LCAMP :

TKNIKA – Basque VET Applied Research Centre, CIFP Miguel Altuna LHII, DHBW Heilbronn – Duale Hochschule, Baden-Württemberg, Curt Nicolin High School, AFM – Association espagnole des industries de machines-outils, EARLALL – Association européenne des autorités régionales et locales pour l'apprentissage tout au long de la vie, FORCAM, CMQE : Association campus des métiers et des qualifications industrie du futur, MV : Mecanic Vallée, KIC : Knowledge Innovation Centre, Centre de compétences MADE Industria 4.0 ; AFIL : Associazione Fabbrica Intelligente Lombardia, SIMUMATIK AB ; Association HVC Association des collèges professionnels supérieurs slovènes ; TSCMB : Tehniški šolski center Maribor, KPDoNE : Kocaeli Directorate of National Education ; GEBKİM OIZ et collège CAMOSUN.



Résumé du document

Type de document :	Rapport public
Titre	Rapport de synthèse des rapports D3.2 – M36 PdM – SCM – BC
Auteur(s)	Pascal Pichoutou, Jesus Rebolledo
Co-auteurs	Vesna Novak, Eda Ipek, Camille Leonard, Ralf Steck, Richard Gale, Pablo Marino
Réviser	Hervé Danton
Date	Juin 2025
Statut du document	1.0
Description du document	Ce document décrit les principaux impacts des nouvelles technologies dans le domaine de la maintenance prédictive et leurs conséquences sur l'adaptation des organisations et des compétences.
Citez ce livrable comme suit :	Pichoutou et al., 2025. WP3 – Observatoire – D3.2 - M36 - Rapport de synthèse des 3 rapports : D3.2 - M36 Impacts des technologies numériques 4.0 et de la transition écologique sur la maintenance prédictive, la chaîne d'approvisionnement et l'alignement de l'offre des Centres d'Enseignement et de Formation Professionnels sur les besoins de l'industrie dans le secteur de la fabrication de pointe au Pays basque
Au niveau du document	Public



GLOSSAIRE ET/OU ACRONYMES

AFDET - Association Française pour le Développement de l'Enseignement Technique
AFM - Association des fabricants de machines-outils
AFNOR - Association française de normalisation
IA - Intelligence artificielle
AR - Réalité Augmentée
Rapport BC - Rapport Pays Basque
CAGR/TCAC - Taux de croissance annuel composé
CAM/FAO - Fabrication assistée par ordinateur
CMMS/GMAO - Système de Gestion de Maintenance Informatisée
CNC - Commande numérique par ordinateur
CoVE - Centres d'excellence professionnelle
EaaS – Equipement comme un Service (Equipment-as-a-Service).
EQF/CEC - European Qualification Framework/ Cadre européen des certifications
ESCO - Aptitudes, compétences, qualifications et professions européennes
FCS - Ordonnancement à capacité finie
GSCM - Gestion de la chaîne d'approvisionnement verte
HVET/EFPP - Enseignement et Formation Professionnels supérieurs
ICS - Planification de capacité infinie
IoT - Internet des objets
IT/TiC - Technologies de l'information
IUT - Institut Universitaire de Technologie
LCAMP - Plateforme de fabrication avancée centrée sur l'apprenant
LLM - Modèle de langage large
MaaS - Maintenance en tant que Service
MOOC/CLOM - Cours en Ligne Massif et Ouvert
MPS/PDP - Plan Directeur de Production
MRP/CBN - Planification des Besoins en Matières
MV - *Mecanic Vallée*
NLP - Traitement du Langage Naturel
PdM - Maintenance prédictive
PdMaaS - PdM en tant que Service
PLC/API - Automate Programmable Industriel.
ROI - Retour sur investissement
SCM - Gestion de la chaîne d'approvisionnement
S&OE – Exécution des Ventes et des Opérations
S&OP/PIC – **Plan Industriel et Commercial**
SLM - Modèles de langage spécifiques à une tâche
SME/PME - Petites et moyennes entreprises
TKNIKA - Centre de Recherche Appliquée en Formation Professionnelle au Pays Basque.
TPM - Maintenance productive totale
VR/RV - Réalité Virtuelle
XR/RE - Réalité Etendue



TABLE DES MATIÈRES

RESUME	6
1. INTRODUCTION	8
1.1. Objet du rapport	8
1.2. Méthodologies	9
1.3. Contextes et dynamiques de marché	10
2. TECHNOLOGIES EMERGENTES	12
3. TENDANCES DE LA TRANSITION NUMERIQUE ET VERTE IMPACTANT LES PME	16
3.1. Changements technologiques dans le champ d'Observation	16
3.2. Contributions à la transition écologique	22
3.3. Impacts opérationnels, organisationnels et effectifs	23
3.4. Adoption et maturité dans les PME	28
3.5. Tendances futures et recommandations stratégiques	33
4. IMPACTS DES TENDANCES DE LA TRANSITION NUMERIQUE ET ECOLOGIQUE DANS LES CENTRES D'EFP	37
4.1. Défis et opportunités pour les centres de formation professionnelle	37
4.2. Impact sur la formation et les compétences formées	41
4.3. Rôle stratégique des centres d'EFP	47
4.4. Conclusions et recommandations	48
5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	50
5.1. Résumé des principales constatations	50
5.2. Leçons stratégiques	54
5.3. Recommandations	55
5.4. Perspective	56
6. INDEX DES TABLES	58
7. ANNEXE	59
7.1. Annexe 1 - Besoins en compétences	59



RESUME

Le projet LCAMP (Learner-Centric Advanced Manufacturing Platform), dans le cadre de l'initiative CoVE, vise à renforcer les écosystèmes de compétences régionaux dans le domaine de la fabrication avancée grâce à la collaboration, à la résilience et à l'innovation.

Ce rapport de synthèse consolide les principales conclusions et les orientations stratégiques de trois études approfondies menées dans le cadre du projet LCAMP sur la **maintenance prédictive (PdM)**, la **gestion de la chaîne d'approvisionnement (SCM)** et **l'alignement de l'offre d'enseignement et de formation professionnels sur les besoins industriels (BC)**. Élaboré par l'Observatoire LCAMP et dirigé par le cluster français *Mecanic Vallée* et le Campus des Métiers et des Qualifications Industrie du Futur, avec le soutien de partenaires situés en Allemagne, en Italie, en Slovénie, au Pays basque et avec la participation du Canada, le rapport vise à fournir des informations stratégiques aux PME, aux centres de formation professionnelle et aux décideurs politiques afin d'aider à aligner la transformation industrielle sur l'éducation et le développement des compétences

Ce rapport fournit un élément clé de la feuille de route stratégique visant à améliorer la durabilité et la croissance de la fabrication avancée dans l'Union européenne (UE) et au-delà. Il synthétise les résultats de trois enquêtes ciblées - sur le **domaine de la gestion des activités et de la maintenance, la gestion de la chaîne d'approvisionnement, avec un accent sur la Planification des Profits, les processus Plan Industriels et Commercial (PIC), Plan Directeur de Production (PDP), Planification des Besoins en Matière (MRP/CBN), Ordonnancement à Capacité Finie/Infinie FCS/ICS (appelés SCM 4.0 dans ce rapport) et l'alignement de l'Enseignement et de la Formation Professionnels (EFP) sur les besoins industriels (BC)** - afin d'évaluer comment les changements technologiques et organisationnels remodelent l'écosystème des petites et moyennes entreprises (PME) et des centres qui soutiennent l'enseignement et la formation professionnels.

Le rapport souligne comment la digitalisation et les transitions vertes remodelent les processus industriels, apportant à la fois des opportunités et des défis. Alors que les transitions numérique et écologique progressent rapidement dans l'industrie, les grandes entreprises étant souvent à l'avant-garde de l'adoption de technologies telles que l'IA, les jumeaux numériques et l'analytique avancée, les PME ont besoin d'**approches plus itératives et modulaires** en raison de ressources financières et humaines limitées. Il s'agit d'un défi pour les établissements d'EFP chargés de préparer un corps étudiant diversifié à un marché du travail de plus en plus complexe. Malgré cette dichotomie, les centres d'EFP sont particulièrement bien placés pour répondre aux demandes changeantes de l'industrie grâce à une plus **grande collaboration, à l'innovation et à une intégration systémique**.

Les principales conclusions de cette synthèse sont les suivantes :

- **Adoption de la technologie numérique** : Les PME avancent progressivement dans l'adoption de technologies telles que les systèmes PdM basés sur le cloud et les plateformes SCM basées sur l'IA. Pourtant, la mise en œuvre est inégale en raison d'un manque d'expertise interne, d'une infrastructure insuffisante et d'obstacles financiers.
- **Lacunes en matière de compétences et préparation de la main-d'œuvre** : Il existe un besoin urgent de **compétences techniques** (par exemple, analyse de données, Internet des objets (IoT), intelligence artificielle (IA), cybersécurité) ainsi que **de compétences transversales et non techniques** (par exemple, adaptabilité, collaboration, pensée systémique). Les établissements d'EFP doivent remédier à ces lacunes par des approches



de formation flexibles et hybrides, en appelant à une collaboration plus étroite entre l'industrie et les centres d'EFP et à l'autonomisation des centres d'EFP dans toute l'Europe.

- **Transformation opérationnelle et organisationnelle** : les transitions numérique et écologique remodelent les opérations industrielles, entraînant des changements culturels vers l'agilité, la collaboration interfonctionnelle et la prise de décision fondée sur les données. Ces changements exigent des réformes correspondantes dans les approches de formation et le développement de la main-d'œuvre.
- **Contributions au développement durable** : Les processus PdM et SCM soutiennent directement la transition verte en améliorant l'efficacité énergétique, en minimisant le gaspillage des ressources et en favorisant les pratiques d'économie circulaire. Ces processus améliorent également la résilience industrielle et la compétitivité à long terme.
- **Obstacles à l'adoption** : Les obstacles courants comprennent les coûts de mise en œuvre élevés, la résistance au changement, les systèmes de données fragmentés et les problèmes de cybersécurité. Des stratégies et des mécanismes de soutien adaptés sont nécessaires pour aider les PME à passer de l'expérimentation à l'adoption à grande échelle.
- **Recommandations stratégiques** : Le rapport plaide en faveur d'un meilleur **alignement entre l'industrie et le milieu de l'enseignement**, d'une augmentation des **investissements dans les centres d'EFP et d'initiatives coordonnées visant conjointement à atteindre les objectifs de digitalisation et de durabilité**. L'intégration des technologies de base dans les programmes d'EFP et le développement collaboratif avec les PME sont également des facteurs clés pour la préparation à l'avenir.

La mise en place d'un secteur manufacturier durable, robuste et tourné vers l'avenir dépendra de la capacité d'**intégrer de manière transparente les technologies numériques et vertes** dans les opérations industrielles, tout en transformant les pratiques éducatives pour répondre aux demandes changeantes de l'économie. En alignant les besoins émergents de l'industrie sur des stratégies d'EFP innovantes et centrées sur l'apprenant, ce rapport présente des **mesures concrètes pour améliorer la préparation du personnel, promouvoir des pratiques durables et construire un écosystème industriel résilient pour l'Europe et le monde**.



1. INTRODUCTION

1.1. OBJET DU RAPPORT

L'objectif de ce rapport est de contribuer à l'objectif global de définir une structure et une méthodologie pour l'observation et l'analyse des tendances technologiques, des besoins en compétences et des trajectoires d'emploi dans le Secteur industriel de pointe, en vue de soutenir la réussite future des apprenants dans les centres d'enseignement et de formation professionnels (EFP) à travers l'Union européenne.

Il s'appuie sur les résultats de **trois domaines d'observation** menés dans le cadre du projet LCAMP : le **domaine PdM et maintenance**, la **SCM avec un accent sur la Planification des Profits (PP)**, les **processus Plan Industriels et Commercial (PIC)**, **Plan Directeur de Production (PDP)**, **Planification des Besoins en Matière (MRP/CBN)**, **Ordonnancement à Capacité Finie/Infinie FCS/ICS** (appelés **SCM 4.0** dans ce rapport), et **l'alignement de l'enseignement et de la formation professionnels (EFP) avec les besoins industriels (BC)** - et les synthétise pour fournir une vision unifiée des principales évolutions technologiques, opérationnelles et de la main-d'œuvre qui remodelent les écosystèmes industriels.

Ce rapport met particulièrement l'accent sur deux dynamiques de transformation fondamentales de la fabrication avancée 4.0 :

- La **transformation numérique**, qui englobe l'intégration de l'IA, de l'IoT, de l'analyse des données et de l'automatisation dans les processus de production et de planification, et
- la **transition verte**, qui favorise les pratiques durables, l'efficacité des ressources et l'innovation respectueuse du climat dans les stratégies opérationnelles.

Dans ce contexte, le rapport examine comment les **petites et moyennes entreprises (PME)** réagissent actuellement à ces changements dans les domaines de l'observation. Il explore leurs **pratiques, leurs défis et leurs niveaux de préparation** au moyen d'observations sur le terrain, d'analyses d'enquêtes et de la documentation d'analyses de **rentabilisation réelles**. Ces informations visent à fournir des points de repère exploitables et des informations stratégiques pour deux publics clés

- Pour les PME : il propose **un aperçu des technologies, concepts et outils émergents appliqués dans les domaines de l'observation, et principalement dans les domaines de la PdM et de la SCM**, permettant d'améliorer l'efficacité des processus métiers.
- Pour les établissements de formation professionnelle :
 - Fournir des **recommandations stratégiques** pour l'adaptation des programmes d'EFP et des stratégies institutionnelles en conséquence, et
 - Orienter les **décisions en matière de politiques et d'investissements** qui améliorent la capacité des centres de formation à prévoir et à répondre aux besoins changeants en matière de main-d'œuvre.

Au cœur de cette analyse se trouve un engagement en faveur de **l'innovation centrée sur l'apprenant** : doter les centres d'EFP de l'intelligence et des outils nécessaires pour préparer les étudiants non seulement aux exigences actuelles du marché du travail, mais aussi à l'avenir du travail dans des **environnements industriels résilients, durables et numériquement intégrés**.



1.2. METHODOLOGIES

La méthodologie qui sous-tend ce rapport de synthèse suit le cadre structuré de l'Observatoire LCAP, tel que défini dans le Cycle de Processus de l'Observatoire (D3.1), qui vise à identifier, analyser et valider les domaines professionnels émergents dans le contexte de la fabrication avancée. Cette année, la sélection de la Maintenance Prédictive (PdM) et de la Gestion de la Chaîne d'Approvisionnement (SCM) comme domaines d'observation, a été guidée à la fois par la pertinence technologique intersectorielle et leur fort alignement avec les transformations numériques et vertes définies dans le groupe de travail 7 (WP7) de LCAMP.

L'approche globale suit une conception en plusieurs étapes et multi-méthodes, qui a permis de combiner une analyse industrielle quantitative, l'engagement qualitatif au sein de l'EFP et des explorations territoriales approfondies :

Méthodologie pour les rapports PdM et SCM

Les volets PdM et SCM ont adopté une approche axée sur la technologie combinant :

- Discussions d'experts avec des partenaires de France, d'Allemagne, de Suède, d'Italie, de Turquie et de Slovénie pour définir les priorités ;
- Une revue complète de la littérature des publications scientifiques, des rapports de prospective de l'industrie et des études de cas internationales ;
- Collecte de données triangulés, y compris :
 - Enquêtes ciblant les PME et les centres d'EFP afin de recueillir des informations sur l'adoption des technologies, la maturité, les pénuries de main-d'œuvre, les besoins en formation et les obstacles à l'investissement ;
 - Entretiens semi-directifs avec des chefs d'entreprise et des experts techniques ;
- Les deux ont été examinés et validés par des experts.

Ces étapes ont permis de générer des informations solides sur les impacts opérationnels, organisationnels et de main-d'œuvre de l'adoption de la technologie, avec une validation par tous les partenaires de LCAMP pour garantir la cohérence méthodologique.

Méthodologie du rapport BC (Business Change & Education)

En parallèle, le rapport BC (Basque) a adopté une méthodologie de terrain centrée sur l'éducation, visant à comprendre comment les établissements d'EFP réagissent aux transformations de l'industrie. Il s'agissait de :

- Une étude régionale approfondie au Pays basque, basée sur l'analyse LCAMP 2024 de l'évolution de l'emploi dans la fabrication avancée ;
- Entretiens avec 21 professeurs de formation professionnelle, allant des formateurs de cours de spécialisation d'un an aux mentors impliqués dans des projets de formation en alternance et d'innovation, afin de cartographier les pratiques d'adaptation pédagogique et d'innovation ;
- Engagement auprès de 12 parties prenantes industrielles, y compris des PME et des startups technologiques, pour explorer leurs besoins en talents et leurs modèles de collaboration avec l'éducation ;
- Contribution à l'enquête de l'Association espagnole des fabricants de machines-outils (AFM) et recherches documentaires complémentaires sur quatre professions sélectionnées ;
- Alignement sur l'ESCO et d'autres cadres européens de compétences afin d'assurer la cohérence de l'analyse des qualifications et des compétences.



Cette méthodologie à deux niveaux, européenne et régionale, a permis de comprendre de manière exhaustive et verticalement intégrée, l'impact des transitions numérique et écologique sur l'offre et la demande de compétences, en particulier dans les écosystèmes de l'EFP.

En intégrant ces méthodologies complémentaires, ce rapport offre à la fois une **perspective stratégique paneuropéenne** et une **perspective fondée et orientée vers la pratique** dans la dynamique évolutive de la fabrication avancée, garantissant ainsi sa pertinence pour les décideurs politiques et les praticiens de la formation.

1.3. CONTEXTES ET DYNAMIQUES DE MARCHE

Au cours de la dernière décennie, l'adoption accélérée des technologies de l'industrie 4.0 a profondément remodelé les opérations industrielles, mises en évidence dans les domaines observés, notamment dans la **Maintenance et la Maintenance Prédictive, la Gestion de la Chaîne d'Approvisionnement (SCM), l'usinage Commande Numérique (CNC) et le contrôle qualité**. Ces transformations ne sont pas seulement technologiques, mais aussi organisationnelles et stratégiques, redéfinissant les modèles commerciaux, la dynamique du marché et les attentes en matière de main-d'œuvre dans l'écosystème européen de la fabrication avancée.

Selon le **rapport PdM**, le marché mondial de la PdM - évalué à **10,93 milliards USD en 2024** - devrait dépasser **70 milliards USD d'ici 2032**, avec des projections allant au-delà de **100 milliards USD d'ici 2033**. Les principaux moteurs comprennent le déploiement de l'IA, de l'IoT, des **systèmes cloud (Cloud Computing)** et de **l'analyse basée sur des capteurs**, permettant une surveillance en temps réel de l'état des machines, des stratégies de maintenance proactives et l'optimisation des coûts du cycle de vie. La maintenance prédictive est devenue un catalyseur stratégique dans des secteurs tels que l'automobile, l'aérospatiale et la fabrication industrielle, avec une adoption rapide en Amérique du Nord et en Europe et une dynamique croissante en Asie-Pacifique.

Néanmoins, le **rapport PdM** révèle également d'importantes lacunes. Alors que les grandes entreprises sont souvent les premières à déployer des technologies prédictives, **les PME sont confrontées à des contraintes structurelles** (capacité d'investissement limitée, préparation numérique insuffisante et manque d'expertise technique) qui ralentissent leur adoption. Le passage d'une maintenance réactive à une maintenance prédictive exige non seulement des capacités technologiques, mais aussi de nouveaux modèles organisationnels et de nouveaux rôles de main-d'œuvre.

Dans le même temps, le **rapport SCM** souligne comment les récents chocs mondiaux - COVID-19, tensions géopolitiques, inflation et dérèglement climatique - ont mis en évidence les vulnérabilités des chaînes d'approvisionnement mondiales. En réponse, les entreprises investissent dans **les réseaux d'approvisionnement numériques (DSN)**, les stratégies d'approvisionnement local et les technologies telles que **la blockchain, l'IA, les jumeaux numériques** et les **systèmes de planification avancés** pour atteindre la visibilité, l'agilité et la résilience. La SCM passe d'une fonction d'optimisation des coûts à un **pilier stratégique de l'innovation et de la durabilité**, avec un accent particulier sur **les émissions de scope 3**, la circularité et l'anticipation des risques.

Pourtant, les **PME européennes peinent à suivre le rythme**. Le rapport SCM identifie des obstacles persistants tels que :

- Des systèmes hérités fragmentés et une interopérabilité technologique limitée ;
- Des contraintes financières et coûts d'entrée élevés pour les nouveaux outils ;



- Les préoccupations en matière de cybersécurité et les défis de la gouvernance des données ;
- La résistance interne à la transformation de l'organisation et des processus.

Ces défis affectent directement l'évolution de la main-d'œuvre. À mesure que les rôles deviennent de plus en plus centrés sur les données et interdisciplinaires, les travailleurs doivent combiner le savoir-faire traditionnel avec des compétences en matière d'outils numériques, de pensée systémique et de prise de décision en temps réel.

Ces tendances européennes sont reflétées et renforcées par les résultats de l'étude de **cas régionale au Pays basque**, telle que présentée dans ledit rapport. L'écosystème manufacturier basque, qui comprend un fort mélange de PME et d'entreprises axées sur l'innovation, connaît des changements structurels similaires. Selon ce rapport, plus de **44 000 nouvelles embauches** industrielles sont prévues dans la région pour 2024 seulement, dont **plus de 70 %** se concentreront sur **la production, la maintenance, la qualité et l'ingénierie**.

Le cluster AFM met en évidence la demande urgente d'**opérateurs CNC, de techniciens de maintenance et de contrôleurs qualité** capables de naviguer dans des environnements de données et des systèmes interconnectés.

Des entretiens menés dans la région basque soulignent la pression exercée sur les **centres de formation** pour répondre aux demandes de compétences hybrides. Les entreprises signalent que les rôles deviennent plus fluides, mêlant des fonctions auparavant cloisonnées et obligeant les professionnels à s'adapter rapidement à tous les processus. Cela renforce l'importance des **compétences transversales** - résolution de problèmes, collaboration, adaptabilité - ainsi que des **compétences numériques techniques**.

Ces changements ne sont pas isolés. Elles reflètent une tendance plus large à l'échelle de l'Europe : une convergence des **transitions numérique et écologique** entraînant de nouvelles normes de performance, de nouveaux modèles organisationnels et de nouvelles exigences en matière de main-d'œuvre. Comme le montre ce rapport, les centres d'**EFP** doivent non seulement suivre ces changements, mais aussi les anticiper, grâce au renouvellement des programmes d'études, à des partenariats avec l'industrie et à des parcours d'apprentissage flexibles.

Dans ce contexte, l'**Observatoire LCAMP** joue un rôle stratégique en consolidant les connaissances de différents territoires, en validant les signaux technologiques et en soutenant l'alignement des systèmes de formation professionnelle sur les dynamiques des marchés émergents. En combinant la prospective au niveau macro avec des données de terrain provenant de régions telles que le Pays basque, ce rapport fournit une image complète de l'évolution de la **fabrication avancée 4.0 - et de la manière dont l'éducation et la formation doivent évoluer avec elle**.



2. TECHNOLOGIES EMERGENTES

La transformation numérique de l'industrie est stimulée par une série de technologies de pointe qui remodelent la fabrication avancée 4.0 grâce à une constellation de technologies clés habilitantes. Ces innovations améliorent non seulement les performances, mais alignent également les opérations sur les objectifs de durabilité. Sur la base des rapports PdM, SCM et Basque, ce chapitre présente un aperçu des technologies les plus importantes dans leurs domaines d'observation.

- **Internet des objets (IoT)** : l'IoT joue un rôle fondamental dans de nombreux domaines. Il connecte les actifs physiques aux systèmes numériques à l'aide de capteurs et d'appareils, devenant ainsi fondamental pour l'acquisition de données dans de nombreux domaines. La valeur ajoutée de l'IoT réside dans sa capacité à générer des données granulaires en temps réel à faible coût. Cependant, les défis comprennent l'étalonnage des capteurs, l'intégration du réseau, les risques de cybersécurité et la surcharge de données sans filtrage ou analyse appropriés.
- **Cloud et Edge Computing** : ces technologies prennent en charge le stockage, le traitement et l'analyse des données dans des environnements distribués :
 - L'informatique en nuage (cloud computing) permet aux PME d'accéder à des outils avancés tels que des plateformes d'analyse prédictive, des tableaux de bord de surveillance en temps réel, des systèmes de planification collaborative et des solutions de stockage de données évolutives, sans avoir recours à une infrastructure sur site importante. Les plateformes cloud agrègent les données, fournissent des solutions d'IA et hébergent des tableaux de bord prenant en charge la prise de décision décentralisée.
 - L'informatique en périphérie (edge computing) permet un traitement à proximité de la source de données, réduisant ainsi la latence et la dépendance au réseau, essentielles pour les besoins de réponses en temps réel. Il soutient également les opérations locales dans les entrepôts ou les lignes de fabrication.

Les plateformes cloud offrent évolutivité et interopérabilité, tandis que l'edge assure l'autonomie et la vitesse. Les principales contraintes sont la sécurité des données, l'intégration des systèmes et la fiabilité des services, en particulier lorsque l'infrastructure est fragile.

- **Jumeaux numériques** : un jumeau numérique réplique un processus ou un système physique dans un environnement virtuel, représentant virtuellement des actifs, des systèmes ou des processus physiques. Ils combinent des données de capteurs, des enregistrements historiques et des prédictions basées sur l'IA pour simuler un comportement réel. Les jumeaux numériques offrent une valeur ajoutée significative en faisant le lien entre les opérations réelles et virtuelles. Leurs contraintes comprennent la complexité de la modélisation, les besoins en données de haute qualité et l'intégration avec les systèmes existants.
- **Intelligence artificielle (IA)** : L'IA devient rapidement l'épine dorsale des systèmes prédictifs dans de grands domaines. Il permet aux systèmes d'apprendre à partir de données, d'identifier des modèles complexes, de faire des prédictions et d'appuyer la prise de décision. L'IA soutient la transition de l'automatisation basée sur des règles vers des systèmes capables d'apprendre, de s'adapter et d'optimiser les décisions. L'IA permet aux industries d'optimiser les cycles de maintenance, de rationaliser la production et d'améliorer la réactivité de la chaîne d'approvisionnement.



Le vaste domaine de l'intelligence artificielle englobe une gamme de méthodes et d'architectures avancées. L'aperçu suivant met en évidence les catégories clés : apprentissage automatique et apprentissage profond, réseaux neuronaux et transformateurs, IA générative et augmentation des données, **NLP et IA conversationnelle**, IA explicable (XAI) et apprentissage automatique interprétable (iML), **algorithmes de clustering pour l'optimisation** et algorithmes d'optimisation- chacun jouant un rôle distinct dans la prise de décision prédictive, adaptative et transparente dans tous les contextes industriels.

Machine Learning (ML) et Deep Learning (DL)

Les modèles ML, tels que les Arbres de Décision, les Forêts Aléatoires et les Machines à Vecteurs de Support (SVM), sont largement appliqués dans de nombreux domaines. Ils aident à prévoir la dégradation des équipements, à classer les défaillances des composants, à prévoir les fluctuations de la demande et à optimiser les stocks et la planification.

- Les Arbres de Décision permettent une prise de décision interprétable et basée sur des règles.
- Les Forêts Aléatoires, en tant qu'ensembles d'arbres de décision, améliorent la précision des prédictions en agrégeant plusieurs arbres.
- Les SVM sont utilisées dans les tâches de classification (par exemple, la segmentation des stocks) et les modèles de régression (par exemple, la prévision de la demande), efficaces dans les ensembles de données de grande dimension.
- Valeur ajoutée : Haute précision et flexibilité dans les environnements structurés.
- Contraintes : Nécessite des jeux de données volumineux et de haute qualité et un réglage des paramètres.

Réseaux neuronaux et transformateurs

Les architectures neuronales, y compris les réseaux de neurones récurrents (RNN) et les réseaux de mémoire à long terme et à court terme (LSTM), sont particulièrement adaptées à la prévision de séries chronologiques et à la planification prédictive. Ceux-ci sont essentiels pour modéliser les demandes de production, les cycles de maintenance ou les tendances d'approvisionnement.

- Les modèles de transformateurs (par exemple, BERT, GPT) sont adoptés pour l'analyse complexe basée sur le texte, comme l'interprétation de rapports ou l'analyse de contrats.
- Valeur ajoutée : Gérez les dépendances séquentielles et les données non structurées avec une puissance prédictive élevée.
- Contraintes : Gourmand en ressources et difficile à interpréter sans outils spécifiques.

IA générative et augmentation des données

Les modèles LLM (Large Language Models), tels que BERT et GPT, traitent de grands ensembles de données et détectent les anomalies de planification en temps réel. Ils sont particulièrement efficaces pour gérer les dépendances à longue portée dans les données, ce qui les rend adaptés par exemple pour :

- Ajustements dynamiques de la planification
- Génération de données de défaillance synthétiques, pour remédier à la rareté des données de panne historiques. Cela prend en charge des modèles robustes, même lorsque les jeux de données historiques sont clairsemés.
- Entraînement amélioré des modèles d'IA en simulant des événements rares mais critiques.
- Génération de langage naturel, par exemple, synthèse des journaux de maintenance, génération d'ordres de travail ou production de conseils techniques.



- Valeur ajoutée : Permet l'utilisation de l'IA même dans des contextes à faible niveau de données en améliorant la capacité de généralisation.
- Contraintes : Nécessite des cadres d'entraînement de modèles robustes, des mécanismes de validation.

NLP et IA conversationnelle

Le traitement du langage naturel (NLP) permet à l'IA d'analyser des données non structurées telles que des e-mails, des journaux de chat ou des notes techniques :

- Les chatbots simplifient la communication avec les fournisseurs.
- La reconnaissance d'entités nommées (NER) extrait des données structurées à partir de textes.
- La modélisation thématique (LDA) et l'analyse des sentiments aident à la détection des risques et à la gestion de la main-d'œuvre.
- Valeur ajoutée : Automatise l'extraction des connaissances et la communication.
- Contraintes : Sensible aux nuances linguistiques et aux préoccupations relatives à la confidentialité des données.

IA explicable (XAI) et apprentissage automatique interprétable (iML)

L'intégration de l'intelligence artificielle (IA), de l'Internet des objets (IoT) et des interfaces homme-machine connecte les systèmes matériels et logiciels pour optimiser les processus d'automatisation. À mesure que les industries passent à l'industrie 5.0, l'accent est mis sur l'IA plutôt que sur les opérations centrées sur la machine au profit de l'humain, où les technologies d'IA améliorent la prise de décision humaine pour améliorer la productivité.

Cependant, **son déploiement efficace dépend en grande partie de la disponibilité de données de haute qualité, du personnel qualifié** pour développer et tenir à jour les modèles et de la **confiance des utilisateurs dans les résultats du système**. Pour de nombreuses PME, ces conditions préalables restent un obstacle, en particulier en l'absence de structures de support externes ou de solutions modulaires et faciles à intégrer.

Pour répondre aux préoccupations relatives à la confiance et à la facilité d'utilisation, de nouvelles approches émergent pour rendre l'IA plus transparente et accessible grâce à des solutions d'explicabilité et d'interprétabilité :

- L'IAE (Intelligence Artificielle Explicable), par exemple, SHAP, LIME, renforce la confiance des utilisateurs en fournissant des explications claires sur la façon dont les systèmes d'IA parviennent à leurs conclusions. Cela aide les opérateurs à comprendre la raison d'être des décisions générées par l'IA, ce qui favorise la confiance et facilite l'adoption.
- L'iML (Apprentissage automatique Interprétable) utilise des modèles intrinsèquement interprétables tels que les arbres de décision, les modèles additifs généralisés (GAMs) et les machines de boosting explicables (EBM). IML garantit que les modèles de décision utilisés sont intrinsèquement transparents et interprétables. En permettant aux utilisateurs de retracer la logique derrière les prédictions ou les recommandations, l'iML contribue à une intégration plus responsable et contrôlable de l'IA dans des contextes opérationnels
- Valeur ajoutée : Augmente la transparence, soutient la conformité réglementaire.
- Contraintes : Nécessite une adaptation à des architectures de modèle spécifiques.



Algorithmes de clustering pour l'optimisation

L'IA exploite les techniques de clustering pour améliorer la planification, la classification et l'ordonnement :

- Les K-Means, DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) et les modèles de mélange gaussien (GMM) sont des algorithmes d'apprentissage non supervisé largement utilisés pour regrouper des points de données similaires.
- Valeur ajoutée : Automatise la classification, améliore l'efficacité du processus.
- Contraintes : Sensible aux valeurs aberrantes, nécessite un réglage.

Algorithmes d'optimisation

L'optimisation alimentée par l'IA est utilisée pour équilibrer les problèmes complexes d'allocation des ressources :

- Algorithmes Génétiques (AG) : Ordonnement multi-objectifs et équilibrage des ressources.
- Optimisation des colonies de fourmis (ACO) : routage et séquençage dynamiques.
- Optimisation en essaim de particules (PSO) : équilibrage adaptatif de la charge de travail et planification des achats.

En résumé, ces méthodes sont essentielles pour la planification de la production, l'alignement des achats et la logistique.

- Valeur ajoutée : Résout les problèmes d'allocation à grande échelle en temps réel.
- Contraintes : Forte demande de calcul et sensibilité aux paramètres définis.

- **Cybersécurité** : La cybersécurité n'est pas seulement une préoccupation technique, mais un élément fondamental de la confiance dans les systèmes numériques. À mesure que la dépendance à l'égard de l'IA, du cloud et de l'IoT s'étend, il devient essentiel d'assurer une cyber-résilience robuste, en particulier pour les PME qui peuvent ne pas disposer de l'infrastructure ou de l'expertise nécessaires. Ces avancées introduisent des vulnérabilités, rendant les systèmes de contrôle industriel (ICS) et les infrastructures de technologie opérationnelle (OT) plus vulnérables aux cyberattaques. Le rapport met en évidence trois risques majeurs :
 - **Menaces persistantes avancées (APT)** ciblant les données sensibles des fournisseurs ou de la logistique.
 - **L'empoisonnement de la chaîne d'approvisionnement**, où des composants malveillants sont introduits lors des processus en amont.
 - **Violations de données**, entraînant des perturbations opérationnelles et une atteinte à la réputation.

Pour atténuer ces risques, des initiatives telles que DETECTA 2.0 se concentrent sur l'intégration de mesures de cybersécurité dans la PdM, améliorant ainsi la résilience des petites et moyennes entreprises (PME).

- **Blockchain** : Bien que son adoption n'en soit qu'à ses balbutiements parmi les PME, la blockchain est identifiée comme une solution prometteuse pour la traçabilité, la transparence, l'intégrité des données dans les systèmes décentralisés et la gestion des contrats et un catalyseur stratégique pour la cybersécurité, offrant des enregistrements immuables et décentralisés des transactions.
La valeur ajoutée de la blockchain réside dans la transparence et la confiance. Cependant, il reste complexe à mettre en œuvre et n'est pas encore largement adopté dans les environnements des PME en raison de barrières techniques et financières.



3. TENDANCES DE LA TRANSITION NUMERIQUE ET VERTE IMPACTANT LES PME

3.1. CHANGEMENTS TECHNOLOGIQUES DANS LE CHAMP D'OBSERVATION

En nous appuyant sur les technologies de pointe décrites précédemment, nous nous penchons maintenant sur leurs applications concrètes dans les domaines examinés dans les rapports PdM, SCM et Basque.

Cette suite de technologies avancées remodèle la maintenance prédictive (PdM) et la gestion de la chaîne d'approvisionnement (SCM). Bien que les deux domaines diffèrent par leur portée et leur logique opérationnelle,

Ces technologies numériques ne sont pas seulement des outils, mais des catalyseurs de nouvelles pratiques industrielles, avec l'adoption de ces technologies 4.0 dans les domaines de la maintenance prédictive (PdM) et de la gestion de la chaîne d'approvisionnement (SCM). Bien que ces domaines servent des objectifs commerciaux différents, ils s'appuient de plus en plus sur des technologies et des modèles d'innovation qui se chevauchent : ils partagent une dépendance croissante à l'intelligence artificielle (IA), à l'Internet des objets (IoT), aux systèmes cloud et aux jumeaux numériques. Ces technologies ne se contentent pas de soutenir l'automatisation, elles redéfinissent la façon dont les décisions sont prises, les ressources sont allouées et les performances sont optimisées.

Les technologies PdM sont principalement utilisées pour prédire les défaillances des équipements, améliorer le temps de fonctionnement des machines et réduire les interventions imprévues. Ils remodèlent la façon dont les entreprises surveillent, entretiennent et assurent la maintenance de leurs équipements. Les capteurs IoT assurent une surveillance de l'état en temps réel. L'IA permet de détecter précocement les risques de dégradation et de défaillance. Les jumeaux numériques simulent le comportement opérationnel, et les plateformes cloud agrègent et analysent les données à grande échelle.

Les technologies SCM, en revanche, sont appliquées à la prévision, à la planification, à l'ordonnancement et à l'orchestration du réseau. Ce changement est évident dans l'utilisation croissante de l'IA pour la prévision de la demande et l'analyse des risques, de l'IoT pour le suivi des actifs et des expéditions, et des systèmes cloud pour synchroniser les opérations entre les fournisseurs et les clients. Les processus SCM – liés au champ d'observation dans la planification, l'exécution et le suivi – sont en cours de refonte pour tirer parti des capacités numériques en matière d'agilité et de résilience.

3.1.1. RECITS TECHNOLOGIQUES ET ORIENTATION STRATEGIQUE

Alors que les applications PdM se concentrent sur les performances internes, la fiabilité du système et l'optimisation des coûts, les applications SCM sont motivées par la coordination du réseau, la flexibilité et la durabilité. Cela reflète des récits distincts :



- La maintenance prédictive privilégie la disponibilité et l'excellence des processus, avec pour objectif l'absence de temps d'arrêt imprévu et la rentabilité de la maintenance.
- La SCM met l'accent sur l'agilité, la coordination de bout en bout et la résilience, en particulier sur des marchés volatils ou dans des contextes réglementaires.

Les deux domaines convergent vers des systèmes plus autonomes, explicables et basés sur des services. Cependant, leurs chemins de déploiement diffèrent :

- Les grandes entreprises sont les leaders avec des plateformes intégrées d'IA et de jumeaux numériques.
- Les PME, bien que plus lentes à adopter, montrent leur potentiel grâce à des solutions modulaires, des services basés sur le cloud et des écosystèmes collaboratifs.

3.1.2. TECHNOLOGIES DE MAINTENANCE PREDICTIVE

La maintenance prédictive évolue rapidement, passant des approches traditionnelles de maintenance réactive et basée sur le temps à des modèles basés sur les données et l'état. Ce changement est en grande partie rendu possible par le déploiement des technologies numériques décrites ci-dessus, comme décrit ci-dessous.

Internet des objets (IoT)

Les appareils IoT collectent des données en temps réel sur les machines et permettent une surveillance continue en suivant des paramètres clés tels que les vibrations, la température, la pression, la consommation d'énergie et les niveaux de lubrification. Ces données alimentent les modèles prédictifs pour détecter les anomalies et planifier la maintenance de manière proactive.

Ces données sont essentielles pour la surveillance de l'état et alimentent directement les modèles d'IA et les plateformes de diagnostic.

L'IoT permet d'anticiper les pannes avant qu'elles n'impactent la production et permet la surveillance à distance.

Cloud et Edge Computing

Les plates-formes cloud prennent en charge le stockage de données, l'analyse et les tableaux de bord de maintenance évolutifs, ce qui permet aux PME de mettre en œuvre la PdM sans créer leur propre infrastructure informatique. Ils soutiennent le développement du PdM-as-a-Service (PdMaaS).

L'edge computing traite les données au niveau de l'équipement, ce qui permet de prendre des décisions en temps réel et de réduire la latence, ce qui est essentiel dans les environnements de production à haut débit.

Jumeaux numériques

Les jumeaux numériques simulent le comportement dynamique des actifs, ce qui permet des analyses de simulation et des prédictions du cycle de vie.

Utilisés en combinaison avec un logiciel PdM, ils fournissent des informations sur les facteurs de stress, la consommation d'énergie et le temps de défaillance prévu.

Ces simulations permettent d'optimiser les interventions préventives et la planification des pièces de rechange.



Intelligence artificielle (IA)

En maintenance, l'IA permet de construire des modèles prédictifs qui permettent de prévoir les défaillances des équipements, de détecter les anomalies et de préconiser des actions de maintenance optimisées.

Différentes approches d'IA sont déployées en fonction du contexte :

- Machine Learning (ML) : Les algorithmes de ML sont largement utilisés dans la PdM pour la prédiction des défaillances, la détection d'anomalies et l'analyse des tendances. Ces systèmes s'améliorent au fil du temps en apprenant des données historiques.
- Deep Learning (DL) : Sous-ensemble du ML, le DL est utilisé dans la PdM pour traiter les données des capteurs et détecter des modèles subtils, par exemple dans les vibrations, les changements de température ou les lectures de pression.
- Grands modèles d'apprentissage automatique (LMM) : ces modèles intègrent de vastes ensembles de données pour offrir des informations évolutives. En PdM, les LMM aident à interpréter des données multi capteurs complexes.
- IA générative / Grands modèles de langage (LLM) : Dans la PdM, les LLM offrent une nouvelle interface pour les techniciens en permettant l'interaction en langage naturel avec des outils de diagnostic ou des instructions de maintenance. Ils peuvent résumer les journaux de maintenance historiques ou répondre à des questions procédurales.

Confiance et facilité d'utilisation :

- Intelligence Artificielle Explicable (XAI) : dans la PdM, les techniques XAI telles que GradCAM, DIFFI et ARCANA sont utilisées pour aider les opérateurs à comprendre pourquoi un modèle d'IA a signalé un composant comme défectueux. Ces méthodes mettent en évidence les variables (par exemple, les vibrations, la température) qui ont le plus contribué à la prédiction d'une anomalie ou d'une défaillance. Par exemple, DIFFI classe les caractéristiques causant la détection d'anomalies dans les données de séries chronologiques, tandis qu'ARCANA identifie les causes profondes en analysant les erreurs de reconstruction dans les modèles basés sur l'auto-encodeur. De tels outils renforcent la confiance et permettent une prise de décision plus éclairée.
- Apprentissage automatique Interprétable (IML) : dans la PdM, l'IML se concentre sur l'utilisation de modèles transparents tels que les arbres de décision, les LionForests et les machines de boosting explicables (EBM) qui offrent une logique claire et des prédictions basées sur des règles. Par exemple, les LionForests génèrent des règles IF-THEN lisibles par l'homme à partir de forêts aléatoires pour expliquer les classifications des pannes, tandis que les EBM montrent comment chaque caractéristique d'entrée contribue aux résultats de la maintenance. Ces méthodes aident les opérateurs et les ingénieurs à retracer le raisonnement derrière les prédictions, soutenant ainsi l'intégration responsable de l'IA dans les environnements industriels.

Blockchain

En PdM, la blockchain est rarement utilisée mais peut prendre en charge l'enregistrement sécurisé des opérations de maintenance ou des remplacements de pièces pour la garantie et la traçabilité.

Cybersécurité

La PdM met l'accent sur la protection des données des machines et la continuité des opérations.

Aperçu des études de cas

Deux cas décrits dans le rapport PdM montrent l'évolution de la maintenance prédictive (PdM) de modèles réactifs basés sur le temps à des systèmes avancés axés sur les données. Il met l'accent sur la façon dont l'IA, l'intégration de la qualité et l'automatisation modulaire remodelent les



stratégies de maintenance prédictive. Ces deux études de cas illustrent le déploiement de modèles avancée 4.0 et leurs avantages pratiques dans tous les secteurs.

- Cas 1 - Amélioration de la maintenance prédictive grâce à l'intégration de la qualité du produit
 - Méthodes utilisées :
 - Intégration du ML et de la qualité du produit pour la PdM
 - Développement d'un cadre en trois étapes avec **une** précision de 91 %.
 - Résultats :
 - Le mélangeur sous vide a été identifié comme l'élément le plus critique ayant un impact sur la QP (85 % des déchets totaux)
 - Le cadre a démontré que la prévision des besoins de maintenance en fonction des variations de qualité du produit permet de réaliser d'importantes économies et d'améliorer l'efficacité.
 - Impact financier :
 - Réduction de 50 % des coûts d'arrêt des machines.
 - Réduction de 64 % des coûts liés aux rebuts.
- Cas 2 - Détection d'anomalies dans les moteurs à induction à l'aide de données IoT en temps réel
 - Méthodes utilisées :
 - L'étude a comparé trois algorithmes de ML en fonction de leur sensibilité, de leur spécificité et de leur temps d'inférence (performances moyennes sur les ensembles de données de validation et de test).
 - Résultats :
 - L'étude a réussi à développer un système de maintenance prédictive en temps réel à faible coût utilisant des capteurs IoT et des algorithmes de ML pour la détection d'anomalies dans les moteurs à induction.

3.1.3. TECHNOLOGIES DANS LA GESTION DE LA CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT

Dans le SCM, la transformation numérique est axée sur l'amélioration de l'agilité, de la visibilité et de la réactivité tout au long de la chaîne de valeur. Comme décrit ci-dessous, les technologies sont déployées à tous les niveaux analysés dans le domaine de l'observation dans le cadre de la planification et de l'exécution de la SCM.

Internet des objets (IoT)

Les capteurs IoT prennent en charge l'exécution opérationnelle en permettant :

- Un suivi en temps réel des expéditions et des conteneurs,
- La surveillance de l'état de l'entrepôt (par exemple, marchandises sensibles à la température),
- L'automatisation des inventaires et des déclencheurs de réapprovisionnement.

Il prend en charge la visibilité, les alertes et la traçabilité en temps réel.

L'IoT est considéré comme une technologie habilitante et est déjà la norme dans de nombreuses grandes entreprises. Par exemple, les résultats des projets pilotes montrent que la surveillance basée sur l'IoT dans les réseaux de production peut réduire les déchets de matériaux de 12 à 20 %.



Cloud Computing

Les plateformes cloud constituent l'épine dorsale de l'intégration des systèmes de planification et des outils de visibilité de la chaîne d'approvisionnement :

- Les systèmes cloud hébergent des tableaux de bord, des indicateurs clés de performance en temps réel et des interfaces de planification collaborative.
- Utilisé pour synchroniser les flux de données entre les départements et les partenaires externes (fournisseurs, transporteurs, clients), permettre le partage de données entre les réseaux et soutenir la prise de décision décentralisée.

Les systèmes d'edge computing peuvent prendre en charge les opérations locales dans les entrepôts ou les lignes de fabrication.

Jumeaux numériques

Bien qu'ils soient encore émergents dans le domaine de la SCM, les jumeaux numériques sont utilisés pour :

- Simuler les réseaux de la supply chain et les flux de production,
- Évaluer les changements de capacité ou les ruptures d'approvisionnement,
- Testez l'impact des mesures de durabilité ou des variations de délais.

Ils sont souvent couplés à des tours de contrôle, offrant une « vue du cockpit » des opérations SCM.

Blockchain

Dans SCM, la blockchain permet de suivre l'origine et le mouvement des marchandises, de vérifier la conformité et d'automatiser les transactions via des contrats intelligents. Il est particulièrement utile dans les industries réglementées ou les chaînes d'approvisionnement certifiées en matière de durabilité. Elle offre des échanges de données sécurisés et transparents pour garantir le respect des contrats.

Cybersécurité

Identifiée à la fois comme un pilier central des stratégies digitales et l'une des principales préoccupations des entreprises dans l'enquête SCM, avec 100 % des moyennes entreprises et 60 % des petites entreprises la qualifiant de « critique », la cybersécurité dans la SCM est identifiée comme présentant des risques élevés dans les écosystèmes complexes de fournisseurs et indique que la blockchain est une solution prometteuse.

Intelligence artificielle (IA)

L'IA permet des prévisions, une gestion des risques et une synchronisation de planification intelligentes :

- Dans le domaine de la SCM, il prend en charge les prévisions, l'optimisation des stocks, le contrôle dynamique des stocks, la planification et l'ordonnancement. Selon le rapport SCM, l'IA a été mentionnée dans 9 cas d'utilisation sur 31 et a permis de réduire jusqu'à 15 % les coûts logistiques et d'améliorer de 35 % la précision des stocks. Néanmoins, l'adoption de l'IA reste limitée chez les PME, mais son potentiel stratégique est largement reconnu. Différentes approches d'IA sont déployées en fonction du contexte :
 - Machine Learning (ML) : dans SCM, le ML est utilisé pour les prévisions, l'évaluation des risques et la planification adaptative. Ces systèmes s'améliorent au fil du temps en apprenant des données historiques.
 - Deep Learning (DL) : un sous-ensemble de ML, dans SCM, DL peut prendre en charge la reconnaissance d'images (par exemple, pour la qualité du produit) et l'extraction de motifs à partir de grands ensembles de données.
 - Grands modèles d'apprentissage automatique (LMM) : dans SCM, ils prennent en charge la prévision de la demande mondiale et l'optimisation du réseau.



- IA générative / Grands modèles de langage (LLM) : Dans SCM, ils peuvent prendre en charge l'automatisation des documents ou les chatbots de service client.

Pour répondre aux préoccupations relatives à la confiance et à la facilité d'utilisation, de nouvelles approches émergent pour rendre l'IA plus transparente et accessible :

- Intelligence Artificielle Explicable (XAI) : dans le SCM, les systèmes de gestion des risques utilisent de plus en plus **des méthodes XAI** telles que **SHAP**, **LIME** et **GradCAM** pour clarifier la façon dont les modèles d'IA prennent des décisions, par exemple en classant les fournisseurs en fonction des délais, des performances ESG ou des coûts. Ces outils aident les parties prenantes à comprendre et à faire confiance aux prévisions ou aux évaluations automatisées, ce qui rend les recommandations basées sur l'IA plus transparentes et acceptables pour les décideurs.
- Apprentissage automatique Interprétable (IML) : dans les domaines de la prévision et de la logistique, **les modèles IML** tels que les **arbres de décision**, les **machines de boosting explicables (EBM)** et les **GAM** sont utilisés pour fournir une logique claire et traçable derrière les recommandations de planification. Par exemple, **DIFFI** et **LionForests** aident à identifier les causes profondes des anomalies ou des perturbations de la chaîne d'approvisionnement, en veillant à ce que les décisions soient explicables et vérifiables, ce qui est particulièrement important pour les industries réglementées ou les processus de planification collaborative.

Appliquée aux niveaux SCM définis dans le domaine de l'observation, l'application de l'IA peut être résumée comme suit :

- Planification des Profits (PP) : l'IA simule les résultats financiers et soutient la planification de scénarios.
- Plan Industriel & Commercial (PIC) : L'IA permet d'optimiser la prévision de la demande, permettant une meilleure coordination entre les prévisions de ventes et les plans de production.
- Plan Directeur de Production (PDP) & Planification des Besoin en Matières (MRP) : L'IA calcule les quantités optimales de production et d'approvisionnement en cas d'incertitude.
- Ordonnancement à capacité finie/infinie (FCS/ICS) : Les algorithmes pilotés par l'IA améliorent l'allocation et le séquençage des ressources.

Gains de performance :

Certains cas d'utilisation de SCM intégrant l'IA montrent jusqu'à 15 % de réduction des coûts logistiques et 35 % d'amélioration des niveaux de stock.

3.1.4. MODELES OPERATIONNELS ET D'INNOVATION EMERGENTS

Au-delà des technologies, de nouveaux modèles opérationnels gagnent du terrain :

- Collaboration basée sur des plateformes entre les PME et les prestataires de services (par exemple, plateformes PdM ou tours de contrôle logistique intégrées SCM).
- Architectures orientées services qui réduisent les besoins en infrastructure interne. Par exemple, la PdMaaS (Predictive Maintenance as a Service) permet aux entreprises, en particulier aux PME, d'externaliser les capacités prédictives sans posséder l'infrastructure. Il est rentable et généralement fourni par le biais de plates-formes cloud ou d'OEM (Original Equipment Manufacturer), regroupant les diagnostics avec l'équipement (Equipment-as-a-Service).
- Des bancs d'essai et des partenariats public-privé, qui aident les PME à réduire les risques liés à l'expérimentation.

Le rapport basque offre également des exemples concrets de PME accédant à des infrastructures numériques partagées, à des services intégrés ou à des modules de formation par le biais d'écosystèmes régionaux. Ces modèles et écosystèmes offrent un accès partagé aux



infrastructures, à la formation et aux services de soutien, en particulier dans les régions où les clusters industriels sont actifs, jouant un rôle essentiel pour rendre les technologies haut de gamme accessibles aux petits acteurs.

3.2. CONTRIBUTIONS A LA TRANSITION ECOLOGIQUE

La transformation numérique dans l'industrie manufacturière avancée et les domaines observés dans les trois rapports sont étroitement liés à la transition écologique. Les technologies décrites sont non seulement des catalyseurs d'efficacité opérationnelle, mais aussi de puissants leviers de performance environnementale. Ce chapitre résume comment les technologies 4.0 appliquées aux activités observées contribuent aux objectifs de durabilité - en réduisant les émissions, en optimisant les ressources et en soutenant les pratiques d'économie circulaire - et comment elles s'alignent sur des cadres politiques et réglementaires plus larges.

3.2.1. DURABILITE : OPPORTUNITE ET OBLIGATION

Les rapports PdM et SCM mettent en évidence un double récit autour de la durabilité :

- Dans le contexte de la maintenance prédictive, la durabilité est considérée comme un moteur d'innovation et d'efficacité. Il améliore les performances, réduit les coûts et renforce la compétitivité, ce qui en fait une amélioration « autofinancée ».
- Dans le contexte de la SCM, la durabilité est également un impératif réglementaire. Les entreprises doivent se conformer aux critères ESG (environnementaux, sociaux et de gouvernance), aux objectifs du Green Deal de l'UE et aux cadres juridiques émergents (par exemple, le devoir de diligence dans les chaînes d'approvisionnement, la surveillance des émissions de portée 3).
- Dans le contexte commun des PME, l'intégration de la transformation numérique aux objectifs environnementaux reste sous-développée. De nombreuses petites et moyennes entreprises (PME) ne disposent pas de l'expertise nécessaire en matière de gestion de la durabilité, en particulier pour l'application de la pensée systémique dans le cadre de l'économie circulaire. Bien que les objectifs environnementaux soient de plus en plus communiqués, il existe encore un écart important dans les approches de formation pratiques qui intègrent les considérations écologiques dans les activités commerciales et les programmes de développement des employés.

Cela crée à la fois une opportunité stratégique et une obligation de conformité : les technologies numériques permettent aux entreprises d'anticiper et de répondre à des exigences environnementales de plus en plus strictes tout en se positionnant comme leaders de l'innovation verte.

3.2.2. LA PDM COMME CATALYSEUR DE L'EFFICACITE ENVIRONNEMENTALE

Le rapport PdM présente la maintenance prédictive comme une stratégie gagnant-gagnant : elle améliore les performances opérationnelles tout en faisant progresser les objectifs de durabilité. Ses contributions environnementales sont tangibles et mesurables :

- Réduction de la consommation d'énergie : en détectant à temps les inefficacités et en maintenant les machines dans des conditions de fonctionnement optimales, la PdM évite le gaspillage d'énergie.



- Réduction du gaspillage de matériaux : la maintenance programmée en fonction des besoins réels réduit les réparations d'urgence et les remplacements prématurés de pièces, minimisant ainsi l'utilisation de pièces de rechange et de matières premières.
- Durée de vie prolongée des actifs : la détection et la correction précoces des défauts permettent de prolonger la durée de vie utile des équipements, conformément aux objectifs d'économie circulaire.
- Optimisation des émissions logistiques et de transport : la prévention des pannes signifie moins d'interventions imprévues et de livraisons urgentes de pièces de rechange, ce qui permet de réduire les émissions liées à la logistique.
- Soutien à l'économie circulaire : la PdM facilite le réemploi et la remise à neuf, réduisant ainsi le besoin de nouveaux équipements et contribuant à une gestion durable des actifs.

Dans l'ensemble, la PdM soutient à la fois les objectifs de réduction des émissions de CO₂ et la compétitivité économique, en aidant les PME à trouver un équilibre entre les objectifs environnementaux et la rentabilité. Les rapports présentent la PdM comme un levier stratégique qui concilie action climatique et efficacité industrielle.

3.2.3. SCM 4.0 ET GESTION DE LA CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT VERTE

Le rapport SCM va plus loin en positionnant la SCM 4.0 comme un catalyseur essentiel de la gestion de la chaîne d'approvisionnement verte (GSCM). Grâce à la digitalisation, les entreprises gagnent en visibilité et en contrôle sur les impacts environnementaux tout au long de la chaîne de valeur, de l'approvisionnement à la production, en passant par le transport et la fin de vie.

Les principales contributions sont les suivantes :

- Réduction de 12 à 20 % des déchets de matériaux grâce à la surveillance des flux de ressources basée sur l'IoT.
- Réduction de 5 à 10 % des émissions de CO₂ dans la logistique grâce à l'optimisation des itinéraires et à l'équilibrage de charge basés sur l'IA.
- La traçabilité basée sur la blockchain augmente jusqu'à 15 % la part des matériaux recyclés utilisés dans la production, grâce à une transparence accrue et à la responsabilité des fournisseurs.
- L'intégration de l'économie circulaire, avec des outils numériques permettant la logistique en boucle fermée, le reconditionnement et le suivi du cycle de vie.
- L'accompagnement à l'éco-conception, qui permet aux acteurs de la supply chain de collaborer au développement de produits plus écologiques dès la phase de conception.

Malgré ces avancées, seules 27 % des entreprises interrogées ont officiellement aligné leurs stratégies numériques et de durabilité, ce qui laisse entrevoir une opportunité majeure de synergie.

3.3. IMPACTS OPERATIONNELS, ORGANISATIONNELS ET EFFECTIFS

S'appuyant sur les chapitres précédents, qui décrivaient comment les technologies émergentes peuvent améliorer les activités commerciales et soulignaient leur contribution à la durabilité, la présente section se concentre sur leurs impacts plus larges. Les technologies émergentes offrent non seulement des solutions numériques à des défis concrets, mais elles remodelent aussi fondamentalement la façon dont les entreprises fonctionnent, se structurent et font évoluer leur main-d'œuvre. Nous résumons ci-dessous les principaux changements identifiés dans les trois rapports, tels qu'ils se manifestent dans la maintenance et la maintenance prédictive (PdM), la



gestion de la chaîne d'approvisionnement (SCM), **l'automatisation, le contrôle de la qualité et l'exploitation CNC**.

La PdM et la SCM sont toutes deux des catalyseurs de changements plus larges dans les flux de travail et les structures organisationnelles, nécessitant une adaptation significative des organisations et des rôles du personnel.

Dans les deux domaines, de nouveaux rôles émergent qui combinent l'expertise en ingénierie et la maîtrise du numérique. On attend de plus en plus des professionnels de la maintenance et de la logistique qu'ils interprètent des tableaux de bord, interagissent avec des systèmes pilotés par l'IA et collaborent entre les départements.

Dans le domaine de la maintenance prédictive, de nouveaux modèles tels que le PdMaaS transfèrent des tâches des techniciens aux analystes de données et aux opérateurs de services à distance.

Dans la SCM, des transformations similaires se produisent. La prise de décision devient de plus en plus axée sur les données, ce qui nécessite une coordination entre l'informatique, la logistique, les achats et la planification. Les travailleurs doivent gérer des plateformes intégrées, valider des suggestions algorithmiques et collaborer avec des parties prenantes externes. Ces changements mettent en évidence l'importance croissante des compétences transversales et de la culture numérique.

3.3.1. IMPACTS OPERATIONNELS

Au niveau opérationnel, la PdM et la SCM 4.0 ont introduit des changements majeurs dans la façon dont les décisions sont prises, dont les flux de travail sont structurés et dont les ressources sont gérées en temps réel.

Dans le domaine **de la maintenance prédictive**, les opérations passent de routines préventives traditionnelles à une approche plus dynamique **et axée sur les données**. Dans le cadre de la maintenance prédictive, les interventions sont basées sur des modèles d'usure réels ou des anomalies détectées par des capteurs, ce qui permet de réduire les temps d'arrêt des machines et d'utiliser plus efficacement les ressources.

Cette transition apporte plusieurs améliorations opérationnelles tangibles :

- **Réduction des temps d'arrêt** imprévus grâce à la surveillance continue de l'état et aux alertes en temps réel.
- **Planification stratégique** des tâches de maintenance pendant les temps d'arrêt planifiés ou les périodes de faible activité.
- **Prise de décision éclairée par les données**, remplaçant l'intuition par des diagnostics basés sur des capteurs et des tableaux de bord prévisionnels.
- **Automatisation des décisions de routine**, telles que le déclenchement d'ordres de maintenance en cas de dépassement des seuils.

De même, dans la SCM, les outils numériques tels que l'IA, l'IoT et les plateformes cloud améliorent l'agilité et la réactivité tout au long de la chaîne d'approvisionnement. La planification devient moins réactive et plus anticipative, grâce aux données en temps réel et à la modélisation automatisée des scénarios.

Les changements opérationnels comprennent :

- **La visibilité en temps réel** des flux logistiques et des stocks, améliorant la réactivité face aux perturbations.
- **La planification et replanification dynamiques**, basées sur des entrées en direct provenant d'appareils IoT et de jumeaux numériques.



- **La prise de décision assistée par l'IA**, y compris l'approvisionnement automatisé ou l'optimisation des itinéraires de livraison.
- **L'intégration du flux de travail de bout en bout**, éliminant les silos entre les départements tels que les ventes, la production et la logistique.

Ces changements sont illustrés par les conclusions du rapport régional du Pays basque. Les impacts opérationnels de la transformation numérique remodelent la façon dont les professionnels effectuent leurs tâches quotidiennes et interagissent avec les systèmes technologiques. On observe une nette évolution vers des approches prédictives dans tous les profils, passant d'une maintenance réactive à une maintenance prédictive et à un contrôle qualité basé sur l'état, soutenu par des réseaux de capteurs, des alertes en temps réel et des systèmes de surveillance avancés.

La redistribution des tâches est évidente. Par exemple, les opérateurs de machines ou de lignes acquièrent certaines des responsabilités traditionnelles du contrôle de la qualité, faisant de la qualité une responsabilité partagée entre les équipes de production. Les techniciens de maintenance sont désormais confrontés à des responsabilités élargies qui vont au-delà des tâches de réparation traditionnelles et incluent la contribution à l'optimisation des processus et à l'intégration technologique des systèmes d'automatisation.

3.3.2. IMPACTS ORGANISATIONNELS

Les améliorations opérationnelles ne sont possibles que si elles sont soutenues par des **structures organisationnelles appropriées et des changements culturels**. La mise en place d'outils PdM et SCM 4.0 bouscule les hiérarchies traditionnelles et favorise des modèles plus collaboratifs et agiles.

Dans les deux domaines, les organisations adoptent de plus en plus **le travail d'équipe interfonctionnel** et des **méthodes de travail agiles**. Plutôt que des projets longs et linéaires, ils s'appuient désormais sur des cycles pilotes courts, avec des boucles de rétroaction itératives. Cela permet une innovation plus rapide et un meilleur alignement avec les paysages technologiques en évolution rapide.

Les principales évolutions organisationnelles sont les suivantes :

- **Des départements cloisonnés à la collaboration interfonctionnelle**, impliquant les équipes informatiques, opérationnelles, de maintenance et de données.
- **Développement de modèles de projets agiles**, basés sur l'expérimentation et la mise à l'échelle rapides.
- **Utilisation accrue des plateformes numériques**, permettant la transparence et la coordination entre les équipes.
- **Des rôles de leadership plus forts dans la gestion du changement**, les managers agissant comme des catalyseurs de l'adoption numérique.

D'après l'étude de cas du Pays basque, la transformation au niveau organisationnel comprend l'émergence de rôles hybrides qui font le lien entre des fonctions traditionnellement séparées dans les domaines de la maintenance, de l'automatisation et de la qualité. L'automatisation n'est plus isolée, mais interconnectée à des plateformes de production et de données plus larges, ce qui oblige les employés à naviguer dans les interfaces homme-machine et les protocoles de communication.

Cette convergence des rôles apporte une nouvelle dynamique collaborative, où les professionnels doivent travailler au-delà des frontières traditionnelles et s'engager activement dans des systèmes intégrés. De plus, l'adoption de processus de prise de décision basés sur les données a fait de l'analyse en temps réel un élément central des opérations quotidiennes.

Les entreprises sous-traitent de plus en plus de services liés à l'IA, à la cybersécurité et à la maintenance prédictive, ce qui souligne le besoin croissant de rôles internes conscients du



numérique. Ces professionnels ne sont peut-être pas des experts techniques approfondis, mais possèdent suffisamment de connaissances de base pour assurer une communication fluide avec les fournisseurs de technologie externes. Leur fonction est de traduire les innovations technologiques en pratiques opérationnelles qui s'alignent sur les besoins internes et les objectifs stratégiques de l'organisation.

L'émergence de nouveaux modèles économiques tels que la maintenance en tant que service (MaaS) est un changement particulièrement notable. Rendu possible par la PdM, ce modèle permet aux fournisseurs d'offrir **des garanties de disponibilité des équipements ou des contrats basés sur la performance**, redéfinissant ainsi les relations client-fournisseur :

- La maintenance devient un **service à valeur ajoutée**, et non pas seulement un centre de coûts.
- Les fabricants évoluent vers **des modèles orientés services**, avec des diagnostics prédictifs intégrés à distance.
- Cette transformation soutient **des flux de revenus récurrents** et des **partenariats clients plus étroits**.

Cependant, ces changements ne se font pas sans défis. D'après le rapport SCM, plusieurs **obstacles organisationnels à la transformation** ont été identifiés :

- **Problèmes d'intégration technologique**, en particulier dans les PME avec des systèmes hérités.
- **Les préoccupations en matière de cybersécurité**, exacerbées par une plus grande exposition numérique.
- **Résistance au changement**, en particulier chez les travailleurs âgés ou plus expérimentés.
- **Contraintes financières**, limitant la capacité des PME à investir dans les infrastructures ou les talents.

Malgré ces obstacles, les organisations qui réussissent sont celles qui gèrent le changement de manière proactive en développant des capacités internes et en favorisant une **culture d'apprentissage, de confiance dans les données et d'expérimentation**.

3.3.3. IMPACTS SUR LA MAIN-D'ŒUVRE

L'adoption de la technologie va de pair avec une transformation du travail. La PdM et la SCM 4.0 exigent de **nouveaux rôles, de nouvelles compétences et de nouveaux états d'esprit**.

Dans le domaine de **la maintenance prédictive**, les professionnels de la maintenance s'éloignent des tâches purement mécaniques pour se tourner vers **la surveillance, l'analyse et la stratégie**. Les techniciens traditionnels sont de plus en plus appelés à interpréter les données des capteurs, à comprendre les modèles statistiques et à travailler avec les systèmes informatiques.

Ce changement implique :

- **Transformation des rôles**, comme l'émergence d'analystes PdM ou de stratèges en maintenance digitale.
- **Intégration des compétences IT et OT**, les techniciens devant désormais interagir avec des logiciels de maintenance conditionnelle et des outils d'IA.
- **Formation croisée entre les départements**, favorisant la collaboration entre les équipes de maintenance, de données et d'ingénierie.

En parallèle, l'étude du Pays Basque a révélé une demande croissante de profils professionnels hybrides qui combinent expertise technique traditionnelle et compétences numériques. Par exemple :



- Les techniciens qualité doivent désormais combiner leurs compétences en inspection avec la gestion numérique et des données, à l'aide de systèmes de vision industrielle, de scanners 3D et d'outils de vérification numériques.
- Les opérateurs CNC interagissent de plus en plus avec les systèmes MES et ERP, effectuent des ajustements de programme et appliquent des techniques d'analyse de données, y compris la maintenance prédictive.

Pour la **SCM**, les changements d'effectifs reflètent ces évolutions. La saisie manuelle des données et la planification basée sur des règles sont de plus en plus automatisées. Les employés supervisent désormais les sorties des algorithmes, gèrent les exceptions complexes et fournissent des informations stratégiques aux décisions de planification.

Le rapport SCM identifie plusieurs impacts majeurs sur la main-d'œuvre :

- **Émergence de rôles hybrides**, tels que des analystes de la chaîne d'approvisionnement dotés d'une expertise digitale et opérationnelle.
- **Demande croissante de connaissances en matière de données et de systèmes**, même dans des rôles traditionnellement non techniques.
- **Besoin accru de sensibilisation à la cybersécurité**, compte tenu de la sensibilité des systèmes connectés.
- **L'accent est mis sur les courbes d'apprentissage et la formation continue**, car les technologies évoluent plus rapidement que les programmes existants.

Cependant, de nombreuses entreprises, en particulier les PME, sont confrontées à des défis majeurs :

- **Les pénuries de compétences numériques et de talents** limitent leur capacité à adopter efficacement les outils SCM 4.0.
- **Le décalage entre les programmes de formation et les systèmes du monde réel** compromet le retour sur investissement.
- **La résistance des employés à l'automatisation**, souvent liée à la crainte de perdre leur emploi ou de la complexité perçue, crée des frictions.

Pour réussir dans ce nouvel environnement, les travailleurs doivent développer à la fois **des compétences techniques et relationnelles** :

Les principales compétences techniques et analytiques sont les suivantes :

- **Analyse et visualisation** des données (par exemple à l'aide de tableaux de bord)
- **Compréhension des algorithmes** prédictifs et les modèles de pannes
- **Familiarisation avec les plateformes** cloud et les outils de diagnostic

Les compétences non techniques essentielles comprennent :

- Adaptabilité et apprentissage continu
- Travail d'équipe entre les départements
- Communication efficace des résultats techniques.

Ces résultats soulignent l'urgence pour les entreprises d'intégrer le développement de la **main-d'œuvre et la gestion du changement** dans leurs stratégies numériques.



3.4. ADOPTION ET MATURITE DANS LES PME

L'adoption de technologies avancée 4.0 et les contributions à la transition écologique décrites précédemment s'accroissent dans les petites et moyennes entreprises (PME). Cependant, ce processus demeure inégal et se heurte à divers obstacles opérationnels, culturels et stratégiques. Cette section présente une synthèse des niveaux d'adoption, des principales contraintes et des implications connexes pour le développement des compétences.

Les données et les chiffres présentés ici sont tirés des études référencées dans les trois rapports, ainsi que d'enquêtes spécifiques menées auprès des PME.

3.4.1. TAUX D'ADOPTION ACTUELS ET CHIFFRES CLES

Dans l'ensemble, les PME reconnaissent de plus en plus la valeur stratégique des technologies PdM et SCM 4.0. Leurs motivations découlent à la fois de facteurs internes (tels que l'amélioration de l'efficacité et la réduction des coûts) et de pressions externes (exigences de conformité, attentes des clients et intégration de la chaîne d'approvisionnement).

3.4.1.1. ÉLÉMENTS CLES DE L'ADOPTION DE LA PDM :

- Le marché mondial de la maintenance prédictive affiche une croissance robuste, l'industrie manufacturière étant un secteur de pointe.
 - Alors que le rapport PdM note que 81 % des entreprises investissaient dans des approches prédictives en 2018, 40 % la qualifiant de priorité stratégique, les pratiques les plus courantes restent la maintenance basée sur le temps ou curative.
 - L'intérêt pour la recherche autour du PdM a triplé depuis 2017, dépassant les autres recherches liées à la maintenance, ce qui indique son importance croissante en tant que solution industrielle incontournable.
 - La méthode PdM la plus utilisée est la surveillance des vibrations (28 % des mises en œuvre).
- Les résultats de l'enquête indiquent que même si les PME reconnaissent l'importance de la maintenance prédictive (PdM) dans l'amélioration de l'efficacité et de la compétitivité, son adoption n'en est qu'à ses débuts pour de nombreuses entreprises.
- Quelques pionniers ont mis en place des systèmes pilotes de maintenance prédictive, en particulier sur des actifs critiques.

3.4.1.2. ÉLÉMENTS CLES DE L'ADOPTION DE LA SCM :

- Les résultats de l'enquête révèlent de grandes variations en matière de maturité numérique, allant de réseaux logistiques hautement connectés à des flux de travail manuels basés sur Excel.
- ont adopté des stratégies de gestion de la chaîne d'approvisionnement intégrant à la fois le numérique et le développement durable : 3 % des PME de l'UE font preuve d'une forte intensité numérique, contre 98 % des grandes entreprises.
- 64 % des PME signalent des difficultés à analyser leurs propres données opérationnelles, et 74 % estiment qu'elles ne génèrent pas suffisamment de valeur avec les investissements numériques actuels.
- Les résultats de l'enquête auprès des PME indiquent que les fonctions d'exécution et d'ordonnancement sont les plus couramment numérisées. Cependant, les fonctions de



prévision, PIC et PDP montrent une intégration plus faible, en particulier dans les petites entreprises.

- L'adoption spécifique à SCM se concentre sur l'exécution et la planification, à l'aide d'outils tels que l'IA, l'IoT et l'informatique basée sur le cloud.
- Les fonctions de prévision et de PIC sont sous-développées, en particulier dans les petites entreprises.

3.4.2. OBSTACLES ET CONTRAINTES

Bien que la proposition de valeur des technologies PdM et SCM 4.0 soit largement reconnue par les PME, **la nature et l'intensité des obstacles à l'adoption diffèrent** légèrement entre ces deux domaines.

3.4.2.1. CONTRAINTES FINANCIERES

Pour **la PdM**, les obstacles financiers sont souvent liés à :

- Le **coût initial élevé** des capteurs, des équipements de surveillance, des plateformes d'analyse et de l'intégration dans l'infrastructure de maintenance existante.
- Le besoin de **services spécialisés ou de consultants externes**, ce qui ajoute des coûts opérationnels en l'absence de capacités internes. Même avec des modèles cloud ou « as-a-service », les coûts opérationnels permanents restent une préoccupation.
- Sensibilisation ou accès limité à un **financement ciblé** pour l'innovation en médecine prédictive — de nombreuses PME ne sont toujours pas au courant des subventions disponibles ou les trouvent difficiles d'accès.

Dans le cas de la **SCM**, les contraintes financières découlent :

- Du **coût cumulé de la digitalisation de plusieurs fonctions** (par exemple, les achats, les stocks, la logistique), qui peut nécessiter une refonte de la plateforme ou une migration vers le cloud.
- Du manque de visibilité sur le retour sur investissement dû à des **outils numériques sous-utilisés** - de nombreuses PME investissent dans des extensions ou des tableaux de bord ERP mais ne parviennent pas à les adopter pleinement.
- Des difficultés à justifier des investissements pour **des composantes de la transition verte** telles que le suivi carbone ou la logistique circulaire en l'absence de gains à court terme.

Dans les deux domaines :

- La capacité d'investissement limitée des PME, qui opèrent souvent dans des conditions de trésorerie tendues, reste un obstacle majeur. Même les modèles de paiement à l'utilisation ou « as-a-service » sont parfois perçus comme des dépenses récurrentes risquées.
- De nombreuses PME n'ont pas accès au financement public ou aux investissements privés, ce qui ralentit l'adoption de la technologie.

3.4.2.2. OBSTACLES TECHNIQUES

Dans le domaine de **la maintenance prédictive**, les défis techniques sont souvent liés aux :

- **Difficultés d'intégration** : Connecter des capteurs et des systèmes de données modernes à des machines plus anciennes ou à des outils de GMAO disparates.
- **Problèmes d'interopérabilité** : des formats de données ou des interfaces machine incompatibles entravent la surveillance sans faille.



- **Risques de cybersécurité** : l'augmentation de la connectivité ouvre des vulnérabilités, en particulier dans les appareils de périphérie sans surveillance.

Dans le SCM, les obstacles techniques se manifestent par :

- Des systèmes hérités qui ne prennent pas en charge la collaboration ou l'automatisation en temps réel.
- Des difficultés à relier les **systèmes de planification aux opérations** - par exemple, l'intégration des tableaux de bord d'inventaire avec les données réelles de l'entrepôt ou du transport.
- Un manque de qualité des données et de cadres de gouvernance, ce qui entraîne une prise de décision médiocre ou retardée.

Dans les deux domaines :

- **L'absence de structures internes de support informatique robustes** exacerbe les obstacles techniques. Les PME dépendent souvent du personnel généraliste ou de l'aide de tiers, ce qui retarde la résolution et l'innovation.
- La cybersécurité est une préoccupation transversale, 100 % des moyennes entreprises et 60 % des petites entreprises la qualifiant de « critique », exacerbée par l'expertise interne limitée
- **La complexité et la fragmentation des infrastructures informatiques existantes** freinent l'intégration des solutions PdM/SCM.

3.4.2.3. OBSTACLES ORGANISATIONNELS ET STRATEGIQUES

Pour la **PdM**, les obstacles organisationnels comprennent :

- **L'absence de stratégie de maintenance digitale**, conduisant à des initiatives pilotes fragmentées ou isolées.
- **La faible visibilité de la valeur PdM** au niveau de la direction, ce qui entraîne une faible hiérarchisation.
- La réticence à changer des approches préventives ou réactives traditionnelles, en particulier chez les techniciens expérimentés.

En **SCM**, les barrières stratégiques ont tendance à être plus transversales :

- **Pas de feuille de route numérique unifiée** entre les départements, ce qui entraîne une adoption fragmentaire et non coordonnée.
- Une résistance du personnel habitué aux systèmes Excel ou papier, en particulier dans les rôles de logistique et d'approvisionnement.
- Un décalage entre les ambitions de la chaîne d'approvisionnement verte et les décisions opérationnelles quotidiennes, souvent en raison **d'un manque d'alignement stratégique**
- De nombreuses PME n'ont pas de rôles tels que celui de directeur des données, de responsable des processus SCM ou de responsable de la sécurité informatique, ce qui limite la capacité d'innovation interne.

Dans les deux domaines, la **résistance culturelle au changement** et le manque de leadership dans la transformation numérique sont des problèmes récurrents. Les efforts numériques sont souvent menés par des champions isolés sans soutien organisationnel plus large.



3.4.2.4. BESOINS EN COMPETENCES

Chacune des contraintes ci-dessus souligne le besoin croissant de nouvelles compétences et capacités.

Ces **déficits de compétences** peuvent être **multidimensionnels** et affecter à la fois les travailleurs de première ligne et les organisations de gestion.

Sur la base des trois rapports PdM, SCM et BC, nous consolidons les résultats afin de les partager avec le Work Package 5, qui est responsable de la formation en LCAMP. En identifiant les compétences clés propres à chaque domaine, ce groupe de travail pourra s'appuyer sur les données pour soutenir ses activités. La collaboration entre les différents Work Packages est un aspect clé du projet LCAMP.

On peut trouver dans le tableau complet disponible en annexe 1 :

- **44 entrées** décrivant des aptitudes, des compétences et des attitudes.
- Il s'étend sur **9 professions différentes**.
- La catégorisation la plus courante est « **Compétence** », suivie de « Compétence » et « Attitude ».
- **4 types de compétences distincts** sont identifiés, reflétant la diversité des capacités nécessaires : IA, Digitale, Professionnelle et Transversale.
- L'analyse met l'accent sur les **compétences liées à l'IA et à la cybersécurité** dans tous les domaines.

En voici un extrait reflétant le type d'informations disponibles à l'annexe 1 :

Table 1. Besoins en compétences (extrait)

Domaine de compétence LCAMP	Categorisation	Sous-catégories recommandées dans le cadre LCAMP	Profession/Origine du rapport	Aptitude / Compétence / Attitude
Littératie en IA	Compétence	Compétence numérique critique	Maintenance prédictive (PdM)	IA de base ou apprentissage automatique - Connaissance de base des modèles d'IA/ML
	Habileté	Vision par ordinateur	Technicien en contrôle de la qualité (BC)	Vision par ordinateur et CNN pour la détection des défauts - appliquer des réseaux neuronaux pour le contrôle qualité automatisé
Numérique	Attitude	Cybersécurité	Gestion de la chaîne d'approvisionnement (SCM)	Sensibilisation à la cybersécurité - Sensibilisation à la sécurité informatique
	Compétence	Résolution de problème	Maintenance prédictive (PdM)	Résolution de problèmes (maintenance) - pensée analytique pour une prise de décision basée sur les données
		Conception du système	Technicien en automatisation-robotique (BC)	Intégration de la robotique industrielle - connecter les robots aux systèmes de ligne de production
	Habileté	Littératie des données	Maintenance prédictive (PdM)	Interprétation des données des capteurs - capacité à lire et à utiliser les données des capteurs IoT



		TIC	Technicien en automatisation-robotique (BC)	Protocoles de communication (OPC-UA, Ethernet) - mettre en œuvre des normes de communication industrielle
			Opérateur CNC (BC)	Interfaces numériques et IHM - actionnez les commandes à écran tactile sur les machines CNC.
			Technicien d'entretien (BC)	Installer et configurer des capteurs IoT industriels - mettre en place des capteurs connectés pour la collecte de données
		Résolution de problème	Technicien d'entretien (BC)	Résoudre les problèmes de connectivité des données dans les réseaux IoT - résoudre les problèmes de communication dans les systèmes connectés
		Littératie des données	Technicien en contrôle de la qualité (BC)	Fonctionnement des systèmes d'inspection numériques - utilisation d'équipements de mesure et d'essai automatisés
			Opérateur CNC (BC)	Intégration du système MES/ERP - connectez les opérations d'usinage aux systèmes d'entreprise
			Technicien d'entretien (BC)	Utilisez des plates-formes basées sur le cloud pour surveiller les performances des machines - accédez aux systèmes de surveillance à distance
		Fabrication numérique	Opérateur CNC (BC)	Fonctionnement d'un logiciel de CAO/FAO - utilisez des programmes de conception et de fabrication assistés par ordinateur
Transversal	Attitude	Communication	Gestion de la chaîne d'approvisionnement (SCM)	Communication et coordination - ouverture et volonté d'adopter la transformation numérique
		Flexibilité/Agilité	Maintenance prédictive (PdM)	Adaptabilité - volonté de s'adapter à l'évolution des rôles et des technologies
	Compétence	Collaboration/Travail d'équipe	Maintenance prédictive (PdM)	Collaboration - collaboration interdépartementale (maintenance, opérations informatiques)
		Pensée critique	Gestion de la chaîne d'approvisionnement (SCM)	Réflexion stratégique - compréhension holistique des chaînes d'approvisionnement complexes
	Habilité	Collaboration/Travail d'équipe	Compétences transversales (BC)	Collaboration interfonctionnelle - travailler efficacement avec des équipes multidisciplinaires dans des environnements numériques
		Communication	Compétences transversales (BC)	Communication et coordination - partagez clairement l'information entre les services et les quarts de travail
		Flexibilité/Agilité	Compétences transversales (BC)	S'adapter aux technologies émergentes - volonté d'apprendre et d'utiliser de nouveaux outils technologiques



		Résolution de problème	Compétences transversales (BC)	Résolution de problèmes et prise de décision - analyser des situations et prendre des décisions techniques efficaces
		Amélioration continue	Compétences transversales (BC)	Mentalité d'amélioration continue - identifier les opportunités d'optimisation dans les processus de fabrication numérique
Professionnel	Compétence Habileté	Conception du système	Technicien en automatisation-robotique (BC)	Intégration de la robotique industrielle - connecter les robots aux systèmes de ligne de production
		Conception du système	Technicien en automatisation-robotique (BC)	Configuration des systèmes de vision - configuration des caméras et du traitement d'images pour le guidage et l'automatisation des robots

Cultiver une culture de l'apprentissage est essentiel. Les PME doivent non seulement se former aux outils, mais aussi favoriser des environnements où la curiosité, le retour d'information et l'expérimentation numérique sont normalisés.

3.4.3. VARIATIONS DANS LE MONDE REEL : EXEMPLES BASQUES

Le rapport basque confirme que l'adoption varie considérablement d'une région et d'un secteur à l'autre :

- Dans les écosystèmes numériquement avancés, les PME s'engagent avec des plateformes partagées, des hubs régionaux et des fournisseurs de services pour les capacités de maintenance et de gestion de la chaîne de production.
- Dans d'autres, l'adoption est fragmentée ou superficielle, motivée davantage par des exigences externes que par une stratégie interne.

Ces différences soulignent l'importance des systèmes d'innovation territoriaux, qui aident les PME à surmonter les contraintes structurelles grâce à l'expérimentation et à l'apprentissage collaboratifs.

3.5. TENDANCES FUTURES ET RECOMMANDATIONS STRATEGIQUES

Les transitions numérique et écologique continuent de remodeler le paysage industriel des PME. Les tendances futures et les recommandations qui se dégagent des trois rapports mettent en évidence les avancées technologiques, les nouveaux modèles organisationnels et les orientations stratégiques que les PME et les acteurs de l'écosystème devraient adopter. Bien que les domaines observés partagent des directions communes, leurs trajectoires spécifiques diffèrent en fonction de la logique opérationnelle et de l'application technologique.

3.5.1. ORIENTATIONS FUTURES DE LA MAINTENANCE PREDICTIVE (PDM)

Le rapport PdM souligne l'importance d'élaborer des stratégies évolutives, centrées sur l'humain et axées sur la performance pour rendre la maintenance prédictive plus accessible et plus percutante dans les PME :

- Élargir l'accès au soutien financier et à l'adoption de la technologie :



De nombreuses PME restent réticentes à adopter la PdM en raison du coût, du risque ou de la complexité. Le rapport recommande des actions concrètes pour réduire les obstacles financiers et techniques :

- Faciliter les incitations financières et l'accès à des technologies PdM abordables, notamment par le biais de partenariats public-privé ou de programmes au niveau de l'UE.
- Promouvoir des modèles PdM-as-a-Service évolutifs et basés sur le cloud afin de réduire les dépenses d'investissement et d'abaisser le seuil d'adoption.
- Encourager les plateformes de démonstration collaboratives où les PME peuvent observer et tester des applications réelles de solutions PdM.
- Investir dans la formation de la main-d'œuvre et le développement des compétences numériques :
Le capital humain reste un facteur de succès essentiel pour la PdM. Le rapport souligne la nécessité d'aligner la formation sur l'évolution des pratiques de maintenance :
 - Développer les compétences numériques et la formation à l'analyse de la maintenance, en particulier chez les techniciens et les opérateurs.
 - Travailler avec les centres d'enseignement et de formation professionnels (EFP) pour intégrer des modules spécifiques à la PdM dans les programmes d'études.
 - Encourager l'apprentissage tout au long de la vie et les approches transversales pour aligner les équipes de maintenance sur les outils en évolution (par exemple, diagnostics assistés par l'IA, surveillance à distance).
- Optimiser les stratégies de maintenance prédictive pour une compétitivité à long terme :
Pour générer de la valeur sur le long terme, la PdM doit dépasser les cas d'usage isolés et devenir un pilier de la gestion d'actifs stratégiques :
 - Passez de cas d'utilisation PdM isolés à des plans de transformation de la maintenance stratégiques au niveau de l'entreprise.
 - Intégrez des protocoles de gouvernance des données et de cybersécurité dans la conception du système PdM.
 - Suivez et optimisez les KPI PdM pour démontrer la valeur commerciale et l'impact sur le développement durable au fil du temps.

3.5.2. PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS FUTURES POUR SCM 4.0

Le rapport SCM présente une vision holistique de la digitalisation de la chaîne d'approvisionnement qui met l'accent sur la transparence, le partenariat et l'alignement stratégique sur les attentes des clients et de l'environnement

- Instaurer la confiance, la transparence et le partage de l'information :
Alors que les chaînes d'approvisionnement deviennent plus numériques et décentralisées, le rapport SCM souligne le rôle fondamental de la confiance :
 - La digitalisation (par exemple, les plateformes de gestion des relations avec les fournisseurs) doit être utilisée non seulement pour l'automatisation, mais aussi pour permettre une communication ouverte et traçable entre les partenaires.
 - Il convient de favoriser les mécanismes de renforcement de la confiance, tels que les outils collaboratifs, les tableaux de bord partagés et les plateformes de co-innovation.
 - Les PME devraient être soutenues dans l'équilibre entre l'efficacité technologique et l'interaction humaine personnalisée, afin de maintenir la fidélité et la coopération à long terme.
- Recommandations stratégiques (10 actions clés) :
Pour naviguer dans la transformation numérique et la complexité mondiale, le rapport propose un cadre structuré avec dix leviers actionnables :



- Numérisez la gestion des achats et de la relation fournisseur – Mettez en œuvre des plateformes collaboratives et des outils modulaires tels que l'EaaS (Tout en tant que service) pour renforcer la transparence et la réactivité.
- Tirez parti des outils numériques pour favoriser la transparence – Créez des démonstrateurs régionaux de SCM 4.0 et utilisez la blockchain ou l'IA pour des flux d'informations ouverts.
- Renforcez la gouvernance des données et la sécurité de l'information – Assurez un échange de données sécurisé et conforme entre les partenaires de la chaîne d'approvisionnement.
- Alignez les services des fournisseurs sur les attentes des clients – Utilisez des boucles de rétroaction numériques pour vous adapter à l'évolution des besoins des clients.
- Équilibrez l'efficacité numérique avec l'engagement humain – Privilégiez l'intelligence émotionnelle, la négociation et la confiance dans les interactions numériques.
- Promeuvez une culture de partenariat collaboratif – Passez d'un modèle transactionnel à un modèle de partenariat, en mettant l'accent sur la valeur partagée et la co-innovation.
- Investir dans le développement des compétences de la main-d'œuvre et les capacités relationnelles – Fournissez une formation numérique en logistique, en planification et en compétences relationnelles via des partenaires EFP et l'apprentissage hybride.
- Renforcez l'accompagnement à la gestion du changement – Offrez des diagnostics, des services-conseils et de la facilitation du changement pour accompagner les PME dans leur transformation.
- Intégrez le numérique dans les stratégies vertes – Intégrez des indicateurs clés de performance en matière de durabilité dans les projets numériques (par exemple, les émissions de portée 3, la logistique circulaire).
- Effectuez régulièrement des audits de confiance et de relations – Évaluez la maturité de la collaboration et abordez les risques émergents dans les relations avec les fournisseurs.

3.5.3. STRATEGIES DE TRANSFORMATION NUMERIQUE POUR LA FABRICATION AVANCEE : PERSPECTIVES DU PAYS BASQUE

Le rapport du Pays basque fournit des informations précieuses sur les réalités pratiques de la transformation numérique dans la fabrication avancée, en mettant en évidence à la fois les défis et les opportunités pour le développement des PME. L'analyse révèle que la résistance humaine au changement reste le principal obstacle à la transformation numérique, dépassant même la complexité technologique et les contraintes financières. Les entreprises évoluent vers des profils de main-d'œuvre hybrides qui exigent à la fois une expertise technique traditionnelle et des compétences numériques. Ce changement est particulièrement évident dans des professions telles que technicien de maintenance, technicien en automatisation, opérateur CNC et technicien qualité, où les compétences numériques sont de plus en plus essentielles pour la performance au travail et le développement de carrière.

Sur la base de ces résultats, plusieurs stratégies clés émergent pour les entreprises dans leur parcours de transformation numérique :

- Mettre en œuvre des stratégies de gestion du changement axées sur les personnes en abordant l'adaptation culturelle parallèlement à la formation technique.
- Développer des rôles internes pour les employés sensibilisés au numérique, issus des programmes de formation professionnelle. qui peuvent faire le lien entre les opérations traditionnelles et les technologies émergentes et servir d'intermédiaires efficaces avec les fournisseurs de technologies externes tels que les spécialistes de l'IA et les experts en maintenance prédictive.



- Adopter des approches d'adoption progressive de technologies en utilisant des fonds publics et des projets collaboratifs pour explorer les technologies émergentes dans des environnements à faible risque
- Reconnaître la valeur stratégique des centres d'EFP du Pays basque dans la conduite de la transformation numérique en contribuant activement à des projets d'innovation appliquée et en apportant un soutien clé au perfectionnement et à la reconversion de la main-d'œuvre.

3.5.4. PRIORITES COMMUNES POUR LA TRANSFORMATION A LONG TERME DES PME

Malgré les approches spécifiques à un domaine, plusieurs priorités transversales se dégagent des trois rapports :

- L'accessibilité financière est essentielle : qu'il s'agisse de capteurs, de logiciels ou de conseil, les PME ont besoin de points d'entrée plus faciles grâce aux subventions, au leasing ou aux services partagés.
- La transformation des effectifs est essentielle : les compétences digitales et relationnelles doivent être développées en parallèle. Dans le SCM, cela inclut la pensée systémique, la gestion de la confiance et la maîtrise de l'IA. Dans la maintenance prédictive, cela signifie la surveillance de l'état, le diagnostic et l'analyse prédictive.
- Intégration des objectifs numériques et écologiques : les stratégies futures doivent intégrer des considérations environnementales, telles que l'efficacité énergétique, la réduction des déchets ou le suivi des émissions de carbone.
- Le facteur humain reste central : que ce soit dans la maintenance ou les relations avec la supply chain, la transformation dépend du leadership, de la collaboration et de l'adoption par les utilisateurs.



4. IMPACTS DES TENDANCES DE LA TRANSITION NUMERIQUE ET ECOLOGIQUE DANS LES CENTRES D'EFP

Ce chapitre présente une synthèse des principaux résultats concernant l'impact de la transition verte et numérique sur les centres de formation, tels que décrits dans les trois rapports produits (PdM, SCM et Pays basque). L'analyse est basée sur une revue de littérature, ainsi que sur les résultats des enquêtes et des entretiens menés dans le cadre de ces rapports.

4.1. DEFIS ET OPPORTUNITES POUR LES CENTRES DE FORMATION PROFESSIONNELLE

4.1.1. INTRODUCTION

La transition verte et numérique entraîne une profonde transformation de l'industrie, obligeant les centres de formation à adapter leurs programmes et leurs stratégies. Compte tenu de la rapidité des changements, il est essentiel pour ces centres de rester à jour afin de fournir aux apprenants les compétences exigées par le marché du travail. La section suivante présente les principales opportunités et défis liés à cette transition.

4.1.2. RENFORCER LES COLLABORATIONS AVEC LES PARTENAIRES INDUSTRIELS

Pour répondre à la nécessité de rester alignés aux exigences du secteur productif, les centres de formation cherchent de plus en plus une collaboration directe avec l'industrie. De nombreuses institutions disposent déjà de réseaux de partenaires industriels qui soutiennent l'intégration d'expériences pratiques dans leurs programmes, telles que des formations en alternance, des stages et des projets communs.

Cette tendance a été confirmée par les enquêtes menées : dans les domaines de la PdM et de la SCM, la majorité des centres de formation interrogés privilégient les partenariats avec les entreprises plutôt que les collaborations avec d'autres centres de formation, visant à aligner leurs programmes de formation sur les besoins réels et actuels du monde industriel.

L'alignement des centres de formation professionnelle avec les partenaires industriels par le biais d'une collaboration accrue reste essentiel pour faire correspondre les programmes de formation aux besoins réels du marché du travail. Une collaboration plus étroite permet de développer conjointement des parcours d'apprentissage, d'intégrer les technologies émergentes dans les programmes, et de mieux répondre à l'évolution des besoins en matière de compétences. Le rapprochement entre les étudiants de l'EFP et les partenaires industriels conduit à une meilleure



compréhension mutuelle, renforce les capacités d'innovation et prépare les étudiants à participer activement à la transformation numérique et industrielle des entreprises.

4.1.3. FORMATIONS POUR LES FORMATEURS

L'un des résultats les plus significatifs de l'enquête SCM a été l'identification des principaux obstacles à l'intégration des technologies numériques émergentes 4.0 dans les centres de formation. La plupart des répondants ont indiqué que le manque de formation pour les formateurs était le principal obstacle, suivi des coûts élevés associés à la transition.

Ce problème n'est pas propre à un seul pays, mais touche des secteurs industriels dans toute l'Europe. Le rapport « Tensions sur la main-d'œuvre et les compétences dans l'industrie et les formations associées » met déjà en évidence cet écart en France, où il existe un besoin reconnu et urgent de renforcer la formation des enseignants. De même, un centre de formation en Turquie, interrogé lors de l'étude SCM, a déclaré : « Le ministère devrait rendre obligatoire la formation à la transition numérique et écologique pour les enseignants, dans tous les établissements d'enseignement professionnel. »

Le Pays basque a mis en place des programmes de formation pour les formateurs des centres d'EFP afin de maintenir les connaissances du personnel enseignant sur les développements industriels modernes, les méthodes éducatives et les progrès technologiques. Les programmes se concentrent sur l'enseignement à la fois des compétences techniques et des méthodes éducatives modernes, y compris des approches d'apprentissage par projet et hybrides. Les initiatives actuelles doivent être étendues, systématisées et plus accessibles afin que les éducateurs soient pleinement prêts à travailler dans des environnements industriels intelligents et connectés.

4.1.4. AUTONOMIE DES CENTRES DE FORMATION

Un autre défi majeur pour les centres de formation est de s'adapter aux nouvelles tendances malgré une autonomie limitée. Dans de nombreux pays européens, ces centres doivent suivre des directives établies par les autorités supérieures, telles que les ministères de l'éducation, qui limitent leur capacité à prendre des décisions indépendantes concernant les programmes et les méthodes d'enseignement.

Selon l'enquête PdM, 44 % des centres de formation ont déclaré avoir une autonomie limitée, et 36 % ont décrit leur autonomie comme contrôlée. De même, l'enquête SCM a montré que seulement 29 % des centres disposaient d'une autonomie complète.

4.1.5. FORMATIONS HYBRIDES

La transformation numérique a permis une plus grande flexibilité et une plus grande accessibilité dans les parcours de formation, avec l'essor des modèles hybrides combinant l'apprentissage en ligne et en personne. Ce modèle facilite non seulement la transmission des compétences techniques mais favorise également la mise en réseau et l'insertion professionnelle.

De plus, la formation hybride est particulièrement pratique pour les travailleurs, car elle leur permet de poursuivre leurs études et d'obtenir une qualification formelle tout en restant employés. Cette flexibilité fait des modèles hybrides une stratégie clé pour soutenir l'apprentissage tout au long de la vie, le perfectionnement et l'adaptation continue de la main-d'œuvre aux exigences changeantes des environnements industriels intelligents et connectés.

4.1.6. DEMANDE CROISSANTE

Les établissements de formation sont confrontés à une demande croissante de formations spécialisées et à une augmentation des inscriptions, ce qui crée une opportunité de moderniser et



de diversifier leurs programmes. En Espagne, le lancement d'un master en gestion de la chaîne d'approvisionnement en 2024, bien que le niveau 7 du CEC ne soit pas au centre de ce rapport, sert d'exemple clair de cette tendance.

Les centres d'EFPP doivent donc renforcer les compétences transversales et favoriser l'adaptabilité des étudiants. Bien que les centres de formation basques appliquent déjà des méthodologies d'apprentissage collaboratives et basées sur des projets visant à développer des compétences techniques et transversales, ces dernières prennent une importance accrue face aux mutations actuelles du paysage industriel. Des compétences telles que la résolution de problèmes, la communication, le travail d'équipe, l'autonomie d'apprentissage et la créativité sont de plus en plus valorisées par les entreprises, notamment dans le contexte de la transformation numérique et du changement continu. Ces compétences favorisent non seulement la polyvalence professionnelle, mais permettent également aux diplômés de s'adapter rapidement aux nouvelles technologies, aux flux de travail et aux modèles organisationnels.

4.1.7. DEFIS FINANCIERS ET SOLUTIONS FINANCIERES

L'un des principaux défis pour les centres de formation est d'investir dans les nouvelles technologies, souvent limitées par des contraintes financières. Pour y remédier, beaucoup s'appuient sur d'autres sources de financement. Selon l'enquête PdM, les centres bénéficient principalement de financements publics, de partenariats avec l'industrie et, dans une moindre mesure, de collaborations avec d'autres centres de formation professionnelle. Dans l'enquête SCM, le financement public et industriel reste la principale source, tandis que le financement interne est limité. Il convient de noter qu'aucun centre de l'enquête SCM n'a déclaré collaborer avec d'autres centres de formation professionnelle. Certains ont également mentionné les parrainages et les projets de l'UE tels que le LCAMP comme des mécanismes de soutien précieux.

4.1.8. LES NOUVELLES TECHNOLOGIES SUR LES STRATEGIES PEDAGOGIQUES

Les technologies émergentes mentionnées dans ce rapport ont non seulement influencé le contenu des programmes de formation, mais commencent également à avoir un impact sur les stratégies et les ressources pédagogiques. Voici un bref aperçu de certaines applications possibles de ces technologies dans le domaine pédagogique :

- **Intelligence artificielle - Apprentissage personnalisé** : L'IA permet d'adapter la formation au rythme et aux besoins de chaque apprenant, en proposant des ressources ciblées en fonction de ses performances.
- **Réalité virtuelle et augmentée - Immersion en toute sécurité** : La VR et la RA peuvent fournir des environnements simulés pour les expériences pratiques, idéales pour la formation dans des domaines techniques sans risques réels.
- **Plateformes en ligne et MOOC - Flexibilité et accès** : Ces outils peuvent faciliter l'apprentissage à distance à son propre rythme, en élargissant l'accès à l'éducation indépendamment du lieu ou du moment.
- **Big Data et analyse de la performance - Amélioration continue** : Le Big Data peut être utilisé pour analyser les données des apprenants, ce qui permet d'affiner les méthodes d'enseignement et d'améliorer continuellement les résultats de la formation.
- **Dans le cas spécifique du secteur de la maintenance prédictive** :
 - **MAAS en formation - Accès aux technologies PdM via des plateformes cloud collaboratives** : Les solutions basées sur le cloud peuvent permettre aux étudiants de travailler avec des données réelles et des outils de maintenance prédictive, développant ainsi des compétences pratiques dans l'utilisation de ces technologies.
 - **MAAS en formation - Utilisation de simulations et d'études de cas réels** : Les simulations et les jumeaux numériques peuvent permettre aux étudiants de pratiquer en



toute sécurité des techniques de maintenance prédictive, améliorant ainsi leurs compétences avant de travailler avec des machines réelles.

4.1.9. INITIATIVES EUROPEENNES

La recherche documentaire a révélé de multiples initiatives financées par l'UE qui se concentrent sur les tendances technologiques et le développement des compétences dans la fabrication avancée. Les projets ont généré d'importants supports de formation qui couvrent différents domaines d'expertise. Le tableau suivant présente une sélection de ressources qui fournissent des contenus éducatifs et des bonnes pratiques au niveau européen que les centres d'EFP et d'autres parties prenantes clés peuvent utiliser pour s'inspirer et se soutenir.

Table 2. Exemples de projets européens en tendances technologiques et développement des compétences dans la fabrication avancée

PROJET	DESCRIPTION
OPTIMAI	Améliore la qualité et l'efficacité industrielles grâce à la détection des défauts basée sur l'IA, aux jumeaux numériques et à la RA ; offre une formation à l'industrie 4.0/5.0.
I4MS	Initiative européenne visant à aider les PME manufacturières à adopter les technologies numériques.
DATA.ZERO	Projet de l'UE promouvant la fabrication zéro défaut avec des solutions basées sur les données et une formation à l'IA, à l'IoT et à l'apprentissage automatique.
PreMETS	Projet Erasmus+ visant à améliorer l'enseignement de la maintenance prédictive grâce à des boîtes à outils, des micro-certifications et des cours Moodle gratuits.
DRIVES	Projet Erasmus+ soutenant les compétences automobiles à travers un MOOC sur la maintenance, la cybersécurité, l'IA et la robotique.
4CHANGE	S'attaque aux lacunes en matière de compétences des métallurgistes grâce au numérique, à la formation entrepreneuriale et à l'apprentissage en milieu professionnel.



4.2. IMPACT SUR LA FORMATION ET LES COMPETENCES FORMEES

4.2.1. COMPETENCES FORMEES DANS LE DOMAINE DE LA PDM

Les nouvelles technologies sont de plus en plus souvent intégrées dans les programmes de formation à des degrés divers. Le tableau ci-après présente des exemples de programmes liés à la Pdm, qui ont intégré des technologies et des domaines émergents.

Table 3. De nouvelles technologies et de nouveaux domaines dans les formations liées à la Pdm

TECHNOLOGIE	FORMATIONS / COURS
Durabilité	• Bac Pro en Sciences et Technologies de l'Industrie et du Développement Durable (CEC 4) (France) • BTS en Sciences et Technologies de l'Industrie et du Développement Durable (CEC 5) (France)
Cybersécurité	• Bac Pro et BTS en Cybersécurité, Informatique et Réseaux Électroniques (CEC 4) (CEC 5) (France)
IoT	• BUT en Génie Mécanique et Productique, spécialité Innovation pour l'Industrie (CEC 6) (France)
IoT et IA	• BTS en Maintenance Industrielle
IoT, IA, Cybersécurité	• Licence Professionnelle Maintenance d'Équipements Biomédicaux (CEC 6) (France) • Diplôme Professionnel Maintenance de l'Industrie 4.0 (CEC 6) (France)
IoT, IA, Cybersécurité, Durabilité, Cloud	• Bac Pro Fabrication de Produits Mécaniques, spécialité Exécution et Suivi de Production (CEC 4) (France) • BTS en Conception du Processus de Développement de Produit (CEC 5) (France) • BTS en Conception et Production de Systèmes Automatisés (CEC 5) (France) • Licence Professionnelle Conception et Production de Systèmes Électroniques (CEC 6) (France) • Licence Professionnelle en Conception et Amélioration des Procédés et Procédés Industriels (CEC 6) (France) • BTS en Conception de Produits Industriels (CEC 5) (France)
Exemples de cours dans les domaines : IoT, IA, Cybersécurité, Durabilité, Cloud	• Pour la France : Module Robotique. • Pour la Slovénie : Enseignement numérique ; Durabilité ; Interface utilisateur ; Utilisation efficace des outils ; Piratage éthique - Formation pratique ; Cybersécurité ; Intelligence artificielle dans les technologies de l'information - Formation pratique ; Intelligence artificielle ; Systèmes de serveurs ; Réseaux informatiques avancés ; Installations électriques intelligentes IoT ; Durabilité ; Utilisation efficace et sources d'énergie renouvelables ; Cybersécurité, Sécurité et protection ; Cybersécurité, protection des systèmes d'information ; Cybersécurité, protection des systèmes d'information. • Italie : systèmes et réseaux ; technologies et conception des systèmes d'information et de télécommunication ; Informatique ; Télécommunication ; Gestion de projet, organisation d'entreprise.

4.2.2. COMPETENCES FORMEES DANS LE DOMAINE DE LA SCM

Dans le domaine de la gestion de la chaîne d'approvisionnement (SCM), l'intégration de nouvelles technologies devient également de plus en plus évidente. Vous trouverez ci-dessous un tableau détaillé des programmes de formation et des compétences liées à ce domaine.



Table 4. De nouvelles technologies et de nouveaux domaines dans les formations liées à la SCM

TECHNOLOGIES	FORMATIONS	COMPÉTENCES
Durabilité	- BUT Management de la logistique et des transports parcours mobilité et supply chain durables - Durabilité dans la gestion de la chaîne d'approvisionnement	- Gérer la chaîne logistique et de transport en mettant l'accent sur la durabilité - Optimiser l'utilisation des ressources - Mettre en œuvre des stratégies de développement durable - Intégrer des pratiques responsables en logistique et mobilité - Réaliser des audits logistiques durables - Développer des solutions innovantes avec des critères environnementaux - Appliquer des stratégies de Responsabilité Sociétale des Entreprises (RSE) dans le domaine de la logistique - Réaliser des chaînes d'approvisionnement et de production durables sur les plans social, écologique et économique - Interpréter et appliquer des réglementations telles que la loi sur le devoir de diligence de la chaîne d'approvisionnement et les futures directives de l'UE, en utilisant des outils pour évaluer et optimiser les performances en matière de durabilité. - Intégrer la durabilité dans la planification stratégique et la gestion opérationnelle, en abordant l'équilibre entre l'économie, l'écologie et les aspects sociaux - Comprendre le cadre juridique et les stratégies pour atteindre la durabilité à long terme de la chaîne d'approvisionnement
Cybersécurité	- Qualité, Logistique Industrielle et Organisation, avec une spécialisation dans l'Organisation et la Supply Chain - Gestion de la logistique et du transport, spécialisée dans la mobilité et les chaînes d'approvisionnement durables - Licence Professionnelle en Logistique et Gestion des Flux - Technicien en infrastructure informatique et sécurité	- Assurer la sécurité informatique et la protection des systèmes - L'utilisation d'outils numériques et l'application de règles de cybersécurité pour acquérir, traiter, produire et diffuser des informations - Mettre en œuvre des politiques de sécurité pour la protection des données stockées dans une infrastructure cloud - Appliquer des mesures préventives contre les intrusions, les fraudes, les violations de données ou les fuites grâce à la configuration du système d'information - Assurer le bon fonctionnement des réseaux informatiques et des télécommunications de l'entreprise - Protéger les données liées à la logistique - Infrastructure cloud sécurisée - Appliquer des stratégies de cybersécurité - Atténuer les cyber-risques
IA	- Licence en Sciences et Ingénierie, spécialité Maintenance des Systèmes Intelligents et Connectés - Licence en Sciences et Ingénierie - Systèmes d'Information (CEC 6) - Bachelor en sciences et ingénierie - Informatique et systèmes numériques (CEC 6) - Coordinateur de projets informatiques (infrastructures cloud, applications ou données) (CEC 6) - Logistique et Intelligence Artificielle (IA)	- Optimiser la maintenance prédictive, la robotique, la mécatronique et la gestion de la maintenance assistée par ordinateur - Traiter et analyser les données pour en extraire des informations stratégiques et les communiquer à leurs collègues afin de faciliter la prise de décision. - Traitement et synthèse des données - Développer et gérer des bases de données - Intégrer l'IA dans le développement d'applications - Concevoir et optimiser des solutions d'intelligence artificielle pour l'industrie - Organiser et gérer des projets d'IA - Développer des outils d'intelligence artificielle - Effectuer une analyse prédictive des données à l'aide de l'intelligence artificielle - Automatiser les processus logistiques grâce à la robotique et à la RPA - Gérer les données à l'aide du Big Data - Appliquer l'analyse prédictive pour anticiper la demande



		- Optimiser les itinéraires de livraison à l'aide d'algorithmes avancés et mettre en œuvre des stratégies de cybersécurité dans les systèmes automatisés - Appliquer des principes éthiques lors de l'utilisation de l'IA - Maximiser l'efficacité opérationnelle et assurer le retour sur investissement, avec une vision vers la logistique 4.0 et l'avenir de l'automatisation dans le secteur
Cloud Computing	Coordinateur de projets informatiques (infrastructures cloud, applications ou données)	- Orchestrer l'infrastructure cloud - Gérer la sécurité de l'information - Déployer et maintenir des services de cloud computing - Mettre en œuvre des politiques de sécurité pour protéger les données stockées dans une infrastructure cloud
Blockchain	Chef de projet Solutions Blockchain (CEC 6)	- Concevoir, coder et améliorer des systèmes spécifiques à la blockchain à l'aide de langages de programmation appropriés tels que Solidity, C++ ou JavaScript - Développer des applications et des frameworks web - Analyser les besoins des clients et mettre en place des architectures blockchain robustes et sécurisées - Appliquer des connaissances avancées en blockchain et en cryptographie - Créer des solutions innovantes dans divers secteurs, tels que la finance, la logistique et la santé - Gérer les projets blockchain, en assurant une coordination efficace pour atteindre les objectifs et répondre aux besoins des clients - Fournir des solutions techniquement fiables et évolutives
IoT	Concepteur et intégrateur de solutions IoT	- Mettre en œuvre des architectures d'appareils connectés, leur permettant d'envoyer, de recevoir et de traiter des signaux, des informations ou des instructions. - Relever les enjeux spécifiques des entreprises, en fonction de leurs besoins métiers, managériaux ou opérationnels - Faciliter l'automatisation des activités, optimiser les processus métier et renforcer la prise de décision managériale

Dans le tableau suivant, vous trouverez un aperçu plus détaillé des programmes de formation en Supply Chain Management (SCM) ou dans des domaines connexes, ainsi que les principales compétences enseignées.

Table 5. Formations liées à la SCM et ses principales compétences formées

PAYS	FORMATION	COMPÉTENCES
France	Diplôme Universitaire en Gestion de la Logistique et du Transport (CEC 6)	Logistique, transport, éco-responsabilité, durabilité, transition numérique, gestion des flux
	Certificat de qualification professionnelle: Technicien Logistique Industrielle (CEC 6)	Gestion des flux d'informations, cohérence industrielle, supervision des approvisionnements et de la distribution, systèmes informatisés
	BUT Management de la logistique et des transports, spécialité Mobilité et supply chain durables (CEC 6)	Sécurité informatique, durabilité, logistique innovante et stratégies de transport
	Licence en technologie : gestion de la logistique et du transport, spécialisation mobilité durable et chaîne d'approvisionnement (CEC 6)	Technologies innovantes, solutions digitales dans la logistique et le transport



Bachelor en Sciences et Ingénierie, spécialisation Maintenance des Systèmes Intelligents et Connectés (CEC 6)	Transition numérique et énergétique, IA, mécatronique, maintenance prédictive, GMAO (Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur)
Licence Professionnelle en Gestion de la Logistique et des Flux (CEC 6)	Automatisation des entrepôts, logistique durable, cybersécurité, RSE (Responsabilité Sociétale des Entreprises), gestion des flux
BUT Qualité, Logistique Industrielle, et Organisation, Supply Chain & Organisation Spécialisation (CEC 6)	Outils numériques, sécurité informatique, gestion des flux d'informations, supply chain, optimisation des processus
Bachelor en sciences et ingénierie - Systèmes d'information (CEC 6)	Éco-responsabilité, économie circulaire, gestion et analyse des données, IA, digitalisation
Bachelor en sciences et ingénierie - Informatique et systèmes numériques (CEC 6)	IA, Deep Learning, Vision par ordinateur, NLP, bases de données, transformation numérique
Développeur IA et Data Science (CEC 6)	Développement de l'IA, Data Science, optimisation des processus, maintenance prédictive, marketing digital
Coordinateur de projets informatiques (infrastructures cloud, applications ou données) (CEC 6)	Sécurité de l'information, cloud computing, automatisation, IA, cybersécurité, protection des données
Développeur et concepteur en science des données (CEC 6)	Analyse prédictive, IA, big data, apprentissage automatique, traitement des données
Chef de projet en solutions blockchain (CEC 6)	Blockchain, cryptographie, Solidity, développement d'applications blockchain, contrats intelligents
Concepteur intégrateur de solutions pour l'Internet des objets (IoT) (CEC 6)	IoT, automatisation, réseaux d'objets connectés, traitement des données, optimisation des processus
Technicien en infrastructure informatique et sécurité (CEC 5)	Réseaux, cybersécurité, cloud, supervision d'infrastructures, gestion des incidents informatiques
Diplôme d'Etudes Universitaires Scientifiques et Techniques : Webmaster et métiers liés à l'internet (CEC 5)	Développement web, objets connectés, réalité virtuelle, réalité augmentée, création de contenus numériques
Licence Professionnelle en Conception et Amélioration des Procédés Industriels (CEC 6)	Transition numérique, chaîne de production, maintenance, robotique, outils numériques, cybersécurité, éthique, responsabilité environnementale.
Bac Pro en Logistique (CEC 4)	Réception, stockage, préparation de commandes, expédition, cariste, transport routier, sécurité, qualité, réglementations environnementales, entreprises de logistique, plateformes de distribution, services logistiques d'entreprise.
Certification Gestionnaire opérationnel de la chaîne d'approvisionnement opérationnelle (CEC 6)	Gestion logistique, négociation, supply chain, transport, stockage, approvisionnement, planification, répartiteur, responsable d'expédition



Slovénie	Mécatronicien (CEC 4)	Génie mécanique, génie électrique, informatique, automatisation et robotique
	Technicien logistique (CEC 4)	Logistique, entreposage et gestion de la chaîne d'approvisionnement
	Ingénieur logistique (CEC 5)	Logistique, gestion de la chaîne d'approvisionnement et optimisation des processus
	Ingénieur mécatronique (CEC 5)	L'automatisation, la robotique et l'intégration de technologies avancées 4.0 dans les processus de production.
Turquie	Licence en logistique (CEC 6)	Gestion de la chaîne d'approvisionnement, contrôle des stocks, distribution, systèmes d'information logistique
	Diplôme d'Associé en Logistique (CEC 5)	Stockage, transport, procédures douanières, gestion des stocks
	Cycle d'études secondaires professionnelles en logistique	Expédition, entreposage, stockage, logiciels logistiques, stages, superviseur d'entrepôt, personnel d'expédition
Allemagne	Gestion de la chaîne d'approvisionnement	Gestion de la chaîne d'approvisionnement, optimisation des coûts, satisfaction client, modélisation SCOR
	La durabilité dans la gestion de la chaîne d'approvisionnement	Réglementation, durabilité sociale et écologique, stratégies d'optimisation durable
	Gestion stratégique de la chaîne d'approvisionnement (CEC 6)	Planification et gestion des réseaux logistiques, réduction des coûts, simulation et planification stratégique
	Gestionnaire certifié de la chaîne d'approvisionnement (CEC 6)	Optimisation de la chaîne de valeur, réduction des coûts, gestion de projets logistiques
	Formation certifiée Responsable de la supply chain (CEC 6)	Optimisation des chaînes de valeur, réduction des coûts, processus orientés client, principes fondamentaux de la gestion de la chaîne d'approvisionnement, gestion de projet, outils pratiques.
	Utilisateur SAP certifié en planification de la production (CEC 4 à 6)	Navigation dans le système SAP, gestion des données de base, ordres de fabrication, mouvements de matériaux, gestion des stocks, intégration avec les modules SAP (gestion des matériaux, ventes), outils de reporting, gestion des capacités/ressources
	Préparation efficace du travail – planification et contrôle du processus de production (CEC 4 à 6)	Optimisation de l'ordonnancement des commandes, contrôle de la production, gestion des matériaux, systèmes ERP/MES, planification des capacités, dimensionnement des lots, outils de planification informatique, amélioration du service de livraison.
Italie	Chaîne d'approvisionnement, logistique et opérations (CEC 6)	Compétences Supply Chain, Optimisation des flux logistiques, Gestion des stocks, ERP, Blockchain, RFID, IoT, Automatisation, Robotique, IA, Machine Learning, Analyse de données, Prise de décision stratégique, Gestion des risques
	Gestion de la chaîne d'approvisionnement (CEC 5)	Gestion des approvisionnements, pratiques collaboratives, processus de la commande à la livraison, de la demande à l'offre, intégration des partenaires commerciaux, efficience, efficacité et réactivité
	Gestion de la chaîne d'approvisionnement	Approvisionnement en matériaux, gestion de la production, distribution de produits, gestion de la chaîne d'approvisionnement de bout en bout, modèles de gouvernance d'entreprise



4.2.3. PROGRAMMES DE SPECIALISATION AU PAYS BASQUE

Le Pays basque a développé une gamme complète de programmes de spécialisation d'un an (CEC5), dispensés en double format, combinant l'apprentissage en classe et la formation pratique en entreprise. Ces cours sont conçus pour les étudiants qui ont obtenu une qualification professionnelle supérieure de deux ans et qui cherchent à acquérir des compétences avancées alignées sur les besoins de la fabrication avancée et de la transformation numérique. Ces programmes s'inscrivent dans une stratégie d'avenir du système de formation professionnelle basque visant à aligner la formation sur les besoins réels et futurs de l'industrie. Pour plus de détails, consultez le site officiel de l'Institut basque de connaissance de la formation professionnelle.

Les formations de spécialisation suivantes sont actuellement proposées, y compris celles liées à l'industrie intelligente et numérique :

Table 6. Programmes de spécialisation au Pays basque

PROJET	COMPÉTENCE GÉNÉRALE
Fabrication intelligente	Développer et gérer des projets qui adaptent les processus de production en identifiant les objectifs de production, en appliquant des indicateurs clés de performance (KPI) et en utilisant des technologies avancées 4.0 pour le contrôle de la production, tout en garantissant les exigences de qualité et de sécurité.
Digitalisation de la maintenance industrielle	Mettre en œuvre et gérer des projets de digitalisation pour la maintenance en milieu industriel, en appliquant des technologies avancées 4.0 et en respectant les normes de qualité, de sécurité et d'environnement.
Robotique collaborative	Développer des projets de robotique collaborative impliquant à la fois des bras robotiques et des robots mobiles autonomes, et en assurer l'assemblage, la mise en service et la maintenance.
Cybersécurité dans les technologies de l'information (TI)	Définir et mettre en œuvre des stratégies de sécurité dans les systèmes d'information, en réalisant des diagnostics de cybersécurité, en identifiant les vulnérabilités et en appliquant des mesures d'atténuation conformes à la réglementation en vigueur et aux normes sectorielles, tout en respectant les protocoles de qualité, de sécurité au travail et de protection de l'environnement.
Cybersécurité dans les technologies opérationnelles (OT)	Définir et mettre en œuvre des stratégies de cybersécurité dans les organisations et les infrastructures industrielles, à travers le diagnostic, l'identification des vulnérabilités et l'application de mesures d'atténuation conformément à la réglementation en vigueur et aux normes de l'industrie, en garantissant le respect des protocoles de qualité, de sécurité au travail et d'environnement.
Contrôle de la qualité métrologique	Effectuer le contrôle de la qualité des produits, des systèmes de production et des systèmes de mesure, en assurant la validité des mesures lors des tests et des vérifications conformément aux normes de qualité applicables, et en délivrant la documentation appropriée tout en respectant les réglementations en matière de sécurité et d'environnement.
Intelligence artificielle et Big Data	Concevoir et appliquer des systèmes intelligents qui optimisent la gestion de l'information et l'exploitation des mégadonnées, en garantissant un accès sécurisé aux données et le respect des normes établies en matière d'accessibilité, de convivialité et de qualité, ainsi que des principes éthiques et juridiques.



4.2.4. PRIORITES ET MANQUE DE COMPÉTENCES

Selon le rapport PdM, les centres de formation ont identifié l'intelligence artificielle (IA) et la durabilité comme les domaines prioritaires parmi les technologies émergentes. Dans le domaine de la gestion de la chaîne d'approvisionnement (SCM), l'accent est mis sur l'IoT, la durabilité et la cybersécurité. Près de 70 % des centres ont souligné les principales lacunes en matière de compétences dans les systèmes IoT, les outils d'IA et l'analyse des données. Le cloud computing a été cité par 40 %, tandis que seulement 14 % ont mentionné le travail collaboratif, ce qui suggère que cette compétence non technique est déjà bien couverte. Les résultats par pays montrent que :

- La France manque de compétences en IA et en analyse de données,
- L'Italie dans les systèmes IoT,
- la Turquie dans le cloud computing et l'analyse de données, et
- La Slovénie dans les outils IoT et IA.

Un représentant d'un centre de formation français a souligné l'importance de privilégier le développement des compétences plutôt que les connaissances théoriques. Ils ont également souligné l'intérêt d'intégrer la formation initiale et la formation professionnelle, ainsi que le potentiel de l'IA et de la XR non seulement en tant qu'outils de formation, mais aussi en tant que supports du processus d'apprentissage global.

4.3. RÔLE STRATÉGIQUE DES CENTRES D'EFP

Les centres d'enseignement et de formation professionnels (EFP) apparaissent aujourd'hui comme des acteurs dynamiques et stratégiques, capables d'agir comme des catalyseurs des transitions numérique et écologique. Face à l'évolution rapide des technologies et des demandes du marché du travail, ces centres jouent un rôle clé dans l'adaptation des compétences et le soutien aux secteurs industriels en transformation.

Comme nous l'avons souligné tout au long de ce chapitre, et malgré les défis existants, les nouvelles technologies sont déjà progressivement intégrées dans les programmes de formation et les compétences enseignées.

Conscients de ces enjeux, les centres de formation ont renforcé leurs partenariats stratégiques avec l'industrie, et dans une moindre mesure, avec d'autres centres de formation professionnelle. Ces collaborations favorisent non seulement l'échange de connaissances, mais donnent également accès à des sources de financement supplémentaires, qui sont essentielles pour éliminer l'un des principaux obstacles à la transition : son coût financier.

Dans ce contexte, les centres de formation se sont également tournés vers le mécénat et la participation à des projets financés par l'UE, en particulier ceux soutenus dans le cadre du programme Erasmus+.

De plus, les centres ont saisi cette opportunité pour élargir leur offre de formation, en la rendant de plus en plus spécifique et spécialisée, tout en intégrant activement les nouvelles technologies dans leurs stratégies pédagogiques. Cela leur a permis d'offrir des approches d'apprentissage plus modernes, interactives et pertinentes pour l'industrie, mieux alignées sur les réalités de l'environnement professionnel d'aujourd'hui.

Les centres d'EFP sont des moteurs essentiels de la transformation de l'industrie, car ils permettent l'innovation et le développement des talents tout en améliorant la compétitivité régionale. Les centres remplissent désormais des fonctions de formation de base, en participant activement à la co-crédation de solutions avec les entreprises, en développant des programmes spécialisés et en



menant des projets de recherche appliquée et d'innovation dans des environnements de fabrication avancée et de digitalisation.

4.4. CONCLUSIONS RECOMMANDATIONS

ET

4.4.1. CONCLUSIONS

Le rôle stratégique des centres d'EFP en tant qu'acteurs dynamiques de la transition numérique et écologique est clairement réaffirmé. Ces institutions progressent régulièrement dans l'intégration de technologies et de domaines émergents tels que l'intelligence artificielle (IA), la durabilité, l'Internet des objets (IoT), la cybersécurité, la blockchain, l'infonuagique, la réalité virtuelle et augmentée, l'apprentissage profond et la robotique.

D'après des enquêtes menées auprès des centres de formation, l'IA et la durabilité ont été identifiées comme les principales priorités dans le domaine de la Maintenance Prédictive (PdM). Dans le domaine de la gestion de la chaîne d'approvisionnement (SCM), l'accent est mis sur l'IoT, la durabilité et la cybersécurité.

Le contexte de la transition écologique et numérique a offert aux centres de formation professionnelle plusieurs opportunités, notamment :

- L'augmentation de la demande de formation, qui a permis d'élargir l'offre éducative.
- La possibilité de parvenir à une plus grande diversification et à une plus grande spécialisation dans les programmes de formation, qui intègrent désormais non seulement des compétences techniques, mais aussi des compétences interdisciplinaires. Un exemple clair est l'initiative menée au Pays basque, où des programmes de spécialisation d'un an en double format ont été développés, axés sur des compétences avancées en matière de fabrication intelligente, de digitalisation, de robotique collaborative, de cybersécurité et de contrôle de la qualité.
- Une collaboration plus étroite avec le secteur industriel.
- L'utilisation croissante des nouvelles technologies comme outils pédagogiques.
- Amélioration de l'accessibilité et de la flexibilité de la formation grâce à des modèles d'apprentissage hybrides, qui combinent l'enseignement en ligne et en face à face. Ces formats sont particulièrement bénéfiques pour les travailleurs.
- L'impulsion donnée par les initiatives européennes qui favorisent la modernisation de l'EFP.
- Accès au financement par le biais des programmes de l'UE.
- Diversification des sources de financement grâce à des collaborations avec d'autres centres de formation et l'industrie.
- Au Pays basque, bien que des obstacles tels que le manque de culture numérique dans les entreprises persistent, les centres d'EFP peuvent jouer un rôle clé en tant qu'agents de transformation en formant des professionnels équipés pour faire face aux défis de la digitalisation industrielle.

Cependant, l'intégration de nouvelles technologies a également posé des défis importants, notamment :

- L'autonomie institutionnelle limitée, qui entrave la capacité de réagir efficacement aux changements constants.
- L'augmentation des coûts associés à l'adoption de nouvelles technologies.
- Le manque de formation spécialisée pour les éducateurs, ce qui limite la mise en œuvre efficace.



- Des lacunes existantes en matière de compétences ont été identifiées dans des domaines clés du domaine de la gestion de la chaîne d'approvisionnement (SCM). Les résultats par pays mettent en évidence les carences suivantes : la France est confrontée à des pénuries de compétences en IA et en analyse de données ; l'Italie dans l'intégration des systèmes IoT ; la Turquie dans le cloud computing et l'analyse de données ; et la Slovénie pour les outils IoT et IA.
- Pour l'EFP basque, les centres ne considèrent pas encore pleinement les diplômés de l'EFP comme une véritable option pour conduire leur transformation numérique. Bien que de nombreux centres proposent des programmes avancés en automatisation et digitalisation (CEC5), ces qualifications ne sont pas largement reconnues ou exigées par l'industrie. En conséquence, les étudiants trouvent souvent des opportunités limitées dans les rôles de haute technologie, et le potentiel de l'EFP à contribuer à l'innovation industrielle reste sous-utilisé.

4.4.2. RECOMMANDATIONS

- Promouvoir les modèles d'apprentissage hybrides : Développer des parcours d'apprentissage flexibles qui combinent des formats en ligne et en personne pour soutenir divers profils d'apprenants, en particulier les professionnels, et favoriser l'apprentissage tout au long de la vie.
- Diversifier l'offre de formation et augmenter le nombre de programmes spécialisés.
- Combler les lacunes critiques en matière de compétences.
- Renforcer la formation des formateurs.
- Renforcer la collaboration avec les entreprises et autres centres de formation.
- Diversifier les sources de financement : encourager les centres d'EFP à mobiliser des fonds publics, des parrainages industriels, des projets européens et des mécanismes de financement collaboratif pour surmonter les limites financières.
- Tirer parti des initiatives européennes : maximiser l'utilisation des outils et des ressources mis à disposition par l'Union européenne pour soutenir les transitions écologique et numérique ainsi que l'éducation en général.
- Développer des initiatives de formation spécifiques à chaque pays pour combler les principales lacunes en matière de SCM : IA et analyse de données en France, systèmes IoT en Italie, cloud computing et analyse de données en Turquie, et IoT et outils d'IA en Slovénie.
- Privilégier le développement des compétences plutôt que les connaissances théoriques en intégrant la formation initiale et la formation professionnelle, et en utilisant l'IA et la XR non seulement comme des outils pédagogiques mais aussi comme des supports tout au long du processus d'apprentissage.



5. CONCLUSION PERSPECTIVES

ET

Afin de soutenir la croissance, la résilience et la durabilité continues du secteur de la fabrication avancée 4.0 dans l'Union européenne et au-delà, il est essentiel d'anticiper l'évolution des besoins en main-d'œuvre, d'améliorer les systèmes d'éducation et de formation et de renforcer l'alignement entre l'industrie et les prestataires d'enseignement et de formation professionnels (EFP). Ce rapport, qui est une synthèse de trois études complémentaires sur la maintenance prédictive (PdM), la gestion de la chaîne d'approvisionnement (SCM) et les perspectives régionales du Pays basque (BC), offre une perspective intégrée sur la manière dont les transitions numérique et verte remodelent à la fois le paysage industriel et les écosystèmes éducatifs qui l'alimentent.

S'appuyant sur un travail de terrain approfondi, des enquêtes multi-pays, des études de cas institutionnelles et un engagement direct auprès des PME, des grands fabricants, des établissements d'EFP et des éducateurs, ce travail dresse un tableau dynamique et nuancé de la transformation en action. En se concentrant sur deux domaines à fort impact de la fabrication avancée, la PdM et la SCM, le rapport examine non seulement les technologies à l'origine du changement, mais aussi les changements opérationnels, organisationnels et humains nécessaires à une adaptation réussie.

À travers six domaines thématiques clés – les changements technologiques et opérationnels, l'intégration verte et numérique, les obstacles spécifiques aux PME, l'évolution des compétences et des attentes en matière de main-d'œuvre, les modèles d'innovation stratégique et la transformation des systèmes d'EFP – les résultats convergent vers un objectif commun : la construction d'un écosystème manufacturier prêt pour l'avenir, ancré dans l'éducation agile, le perfectionnement inclusif des compétences et une solide collaboration intersectorielle. À ce titre, cette dernière section distille des enseignements stratégiques, esquisse des recommandations transversales et propose une vision prospective de la manière dont l'Europe peut montrer la voie en alignant l'innovation industrielle sur un développement centré sur l'humain.

5.1. RESUME DES PRINCIPALES CONSTATATIONS

La fabrication avancée 4.0 connaît une transformation rapide, façonnée par la digitalisation, les impératifs de durabilité et l'évolution de la dynamique de la main-d'œuvre. Les enseignements tirés de la maintenance prédictive (PdM), de la gestion de la chaîne d'approvisionnement (SCM) et du travail de terrain régional au Pays basque (BC) mettent en évidence les tendances communes, les défis structurels et les opportunités réalisables pour les PME et l'écosystème de l'EFP. Ces résultats sont organisés en six domaines thématiques clés :

5.1.1. VIRAGES TECHNOLOGIQUES ET OPERATIONNELS

L'émergence de l'IA, de l'IoT, des jumeaux numériques, de l'edge computing et des solutions basées sur le cloud révolutionne les processus opérationnels dans les domaines de la PdM et de la SCM. La maintenance prédictive améliore la fiabilité des actifs, réduit les temps d'arrêt et optimise les coûts du cycle de vie, tandis que la gestion de la chaîne de production est en transition vers la résilience et l'agilité grâce aux réseaux d'approvisionnement numériques (DSN). Malgré des environnements d'application différents, les deux domaines convergent vers des systèmes autonomes, basés sur des services et explicables qui exigent des flux de travail restructurés, une



collaboration interfonctionnelle et une prise de décision basée sur les données. De nouveaux modèles tels que les écosystèmes basés sur des plateformes, les architectures orientées services et les bancs d'essai soutiennent l'expérimentation, la réduction des risques et l'innovation évolutive entre les parties prenantes.

5.1.2. IMPACT DE LA TRANSITION NUMERIQUE ET VERTE

Les technologies de la PdM et de la SCM ne sont pas seulement des améliorateurs de performances, mais aussi des catalyseurs de durabilité. La PdM soutient les objectifs écologiques en prolongeant la durée de vie des équipements, en réduisant la consommation d'énergie, en limitant les émissions liées au transport et en contribuant à la circularité. SCM s'aligne sur les pratiques écologiques grâce au suivi des émissions, à la réduction des déchets de matériaux, aux stratégies d'approvisionnement circulaire et à la conception collaborative. Les outils numériques renforcent de plus en plus la capacité des entreprises à anticiper et à répondre aux obligations environnementales, en alignant l'optimisation opérationnelle sur les objectifs écologiques.

5.1.3. OBSTACLES ET DEFIS PROPRES AUX PME

La PdM et la SCM sont toutes deux limitées par des barrières structurelles communes. Les contraintes financières restent dominantes, les PME ayant du mal à accéder aux financements pour les mises à niveau technologiques, en particulier pour les systèmes modulaires ou interopérables. Les défis techniques comprennent l'infrastructure existante, le manque d'interopérabilité et les risques de cybersécurité. Sur le plan organisationnel, les PME sont souvent confrontées à une faible maturité numérique, à un support informatique interne limité, à une résistance au changement et à un manque de vision stratégique claire. La mise en œuvre de la PdM souffre également d'un accès insuffisant aux consultants et d'un retour sur investissement incertain, tandis que la transformation de la SCM est ralentie par des systèmes de planification fragmentés, des outils sous-utilisés et des lacunes en matière de gouvernance des données.

5.1.4. ÉVOLUTION DES COMPETENCES ET DES BESOINS EN MAIN-D'ŒUVRE

Le passage au numérique et aux opérations vertes est en train de remodeler le paysage des compétences industrielles. Les rôles deviennent hybrides, nécessitant des combinaisons de savoir-faire traditionnel, de pensée systémique et de maîtrise des plateformes numériques. Les compétences en IA, en diagnostic, en cybersécurité, en interfaces cloud et en interprétation des données sont de plus en plus essentielles. Les travailleurs doivent s'engager dans une formation continue, s'adapter rapidement et collaborer dans tous les domaines. Les compétences transversales et non techniques, comme la communication, la résolution de problèmes et l'adaptabilité, sont également de plus en plus demandées, en particulier à mesure que les flux de travail évoluent et que l'automatisation se développe.

Pourtant, les déficits de compétences numériques, la résistance des employés et le décalage entre les programmes de formation et les systèmes industriels persistent comme des obstacles importants. Pour relever ces défis, il faut mettre en œuvre des stratégies de gestion du changement centrées sur les personnes qui abordent l'adaptation culturelle parallèlement à la formation technique. Une telle approche permet non seulement d'améliorer la préparation du personnel, mais aussi d'assurer une intégration durable des nouvelles technologies dans les processus organisationnels.



5.1.5. PERSPECTIVES STRATEGIQUES ET MODELES D'INNOVATION

À l'avenir, la promotion de la transformation numérique et écologique au sein de l'écosystème manufacturier européen nécessitera des stratégies intégrées et tournées vers l'avenir qui alignent le développement technologique sur l'évolution de la main-d'œuvre et l'adaptabilité organisationnelle. Ce rapport s'appuie sur des analyses paneuropéennes (rapports PdM et SCM) et sur l'exploration régionale approfondie fournie par le rapport du Pays Basque (BC) pour identifier les modèles d'innovation stratégique, les meilleures pratiques émergentes et les informations exploitables. Le rapport basque met particulièrement en évidence le rôle des centres régionaux d'EFP en tant que catalyseurs clés de l'innovation industrielle, en fournissant des exemples concrets d'efforts collaboratifs de renforcement des compétences et de cadres d'expérimentation à faible risque.

Dans le domaine **de la maintenance prédictive (PdM)**, la compétitivité à long terme reposera sur l'élargissement de l'accès au financement, l'investissement dans la formation de la main-d'œuvre et la culture numérique, et l'optimisation des stratégies centrées sur les données. Dans le domaine **de la gestion de la chaîne d'approvisionnement (SCM)**, le succès futur dépend de la promotion de la transparence, de l'établissement d'un climat de confiance entre les partenaires, de l'alignement des objectifs numériques et écologiques et du renforcement de la gouvernance des données.

Pour soutenir ces résultats, une gamme de modèles et de catalyseurs d'innovation émergent déjà :

- **Stratégies de transformation modulaires et collaboratives** : Les PME adoptent des approches par étapes qui équilibrent l'innovation et l'accessibilité. Celles-ci s'articulent souvent autour d'infrastructures partagées, de projets de développement menés par des consortiums et de plateformes interpartites qui facilitent la prise de risque distribuée et les avantages mutuels.
- **Les architectures orientées services**, telles que **la maintenance prédictive en tant que service (PdMaaS)**, offrent aux PME un moyen viable d'accéder à des capacités prédictives sans investir dans des infrastructures coûteuses. Ces solutions, souvent fournies par l'intermédiaire d'OEM ou de plates-formes cloud, transfèrent les responsabilités des techniciens internes aux analystes de données et aux fournisseurs de services externes, augmentant ainsi la flexibilité tout en préservant la fiabilité opérationnelle.
- **Les bancs d'essai et les partenariats public-privé** continuent de prendre de l'ampleur en tant que mécanismes permettant de réduire les risques liés à l'expérimentation, de permettre la Recherche et Développement appliquée et de stimuler la collaboration entre l'EFP et l'industrie. Le rapport basque renforce cette affirmation en montrant que des centres d'EFP locaux codirigent des projets pilotes d'innovation avec des PME et des grappes industrielles.
- **Les stratégies d'adoption progressive** soutenues par des **financements publics et des projets collaboratifs de l'UE** (par exemple, LCAMP) permettent aux PME d'explorer les technologies émergentes dans des environnements contrôlés et à faible risque - une approche particulièrement précieuse pour les entreprises dont les capacités internes sont limitées.
- **Les centres d'EFP en tant que catalyseurs** : le rapport de la Commission et les recherches plus larges de l'UE s'accordent sur le rôle stratégique des établissements d'EFP. Ces centres servent de ponts entre les besoins industriels et l'offre de formation, tout en soutenant l'innovation appliquée. Leur capacité à adapter les cursus, à favoriser les apprentissages hybrides et à former les personnels à la pédagogie moderne les positionne comme des acteurs clés de la transformation sectorielle.
- **Les rôles d'intermédiaire à l'aise avec le numérique** deviennent essentiels dans les contextes de PdM et de SCM. Ces nouveaux profils de main-d'œuvre, souvent façonnés par la formation professionnelle, associent l'expertise traditionnelle de l'atelier à des outils



numériques avancés. Ils assurent également une liaison efficace avec des fournisseurs d'IA externes, des spécialistes de la maintenance prédictive ou des intégrateurs de logiciels.

Enfin, **les modèles d'innovation SCM mettent l'accent sur le rôle essentiel de la collaboration basée sur la confiance**. Si les outils numériques permettent la transparence, la communication en temps réel et la traçabilité, la dimension humaine de la **confiance reste fondamentale** pour les partenariats à long terme de la supply chain. L'instauration de la confiance - par l'alignement culturel, la continuité relationnelle et les objectifs communs - est de plus en plus reconnue comme essentielle à la résilience industrielle et à l'innovation.

5.1.6. TRANSFORMATION DES SYSTEMES D'EFP ET DE FORMATION

Les centres d'enseignement et de formation professionnels (EFP) sont de plus en plus reconnus comme des catalyseurs stratégiques des transitions numériques et vertes dans le secteur de la fabrication avancée 4.0. Dans toute l'Europe - et notamment au Pays basque - ces centres sont en train de passer d'institutions purement éducatives à des centres dynamiques d'innovation appliquée, de développement de la main-d'œuvre et de partenariat industriel.

Les résultats montrent que **les prestataires de formation approfondissent leur collaboration avec l'industrie**, en co-développant des programmes qui intègrent des technologies de base telles que l'IA, l'IoT, le cloud computing et la cybersécurité. Ils expérimentent également des **modèles pédagogiques hybrides**, combinant l'apprentissage en personne et en ligne pour améliorer la flexibilité et l'accessibilité. Ces innovations sont essentielles pour répondre à l'évolution rapide des besoins en matière de compétences et préparer les apprenants - qu'il s'agisse de nouveaux entrants ou de travailleurs qualifiés - aux complexités des environnements industriels modernes.

Pourtant, des défis subsistent. **Les centres d'EFP sont souvent confrontés à des obstacles structurels**, notamment une autonomie limitée dans l'élaboration des programmes, une formation insuffisante des formateurs (en particulier en matière d'outils numériques et de nouvelles méthodologies d'enseignement), des structures de programmes obsolètes et un financement limité pour la modernisation des équipements et des infrastructures. Par conséquent, de nombreux centres ont du mal à suivre le rythme de la transformation industrielle.

Pour remédier à ces lacunes, les établissements d'EFP commencent à explorer de nouveaux formats tels que **les microcertifications, les parcours de formation modulaires** et la **collaboration intercentrique** afin de mieux répondre à l'augmentation des inscriptions et à la demande des employeurs pour des qualifications hautement spécialisées.

Le **rapport du Pays basque** offre des exemples concrets de la manière dont ces défis sont relevés grâce à des **stratégies d'adoption progressive des technologies**, soutenues par des **financements publics et des projets collaboratifs**. Ces initiatives offrent des environnements sûrs et à faible risque pour l'expérimentation de technologies émergentes et la promotion de l'innovation. De plus, **les centres de formation professionnelle basque participent activement à des projets d'innovation appliquée**, se positionnant ainsi comme des acteurs incontournables des stratégies industrielles régionales. Leurs contributions au **perfectionnement et à la reconversion de la main-d'œuvre** mettent en évidence le rôle central que les centres d'EFP peuvent jouer dans le soutien des écosystèmes locaux et la transformation sur le terrain.

Enfin, les **initiatives au niveau de l'UE telles que LCAMP** offrent une couche essentielle de coordination et de soutien, alignant l'expérimentation locale sur les objectifs stratégiques continentaux. En reliant l'industrie, la politique et l'éducation, ces programmes renforcent la capacité des centres d'EFP à agir en tant que **catalyseurs de l'innovation, de la durabilité et de l'inclusion** dans l'avenir de la fabrication avancée.



5.2. LEÇONS STRATEGIQUES

La transformation de la fabrication avancée 4.0 grâce aux technologies numériques et vertes révèle six leçons stratégiques essentielles pour aligner l'évolution industrielle sur le développement de la main-d'œuvre et le renouvellement de l'éducation :

- **La technologie n'est pas neutre - l'adoption est contextuelle et inégale.** Les grandes entreprises sont généralement à la pointe de l'innovation, bénéficiant d'infrastructures internes robustes et d'une capacité d'investissement. En revanche, les PME adoptent les technologies de manière plus progressive, contraintes par des limites financières, organisationnelles et techniques. Par conséquent, les stratégies de transformation réussies doivent tenir compte de ces points de départ divergents et privilégier les solutions modulaires, évolutives et orientées services.
- **Les transitions écologique et numérique convergent et se renforcent mutuellement.** Les objectifs de durabilité ne sont plus séparés des agendas technologiques. La maintenance prédictive réduit la consommation d'énergie, les déchets de matériaux et les émissions grâce à une maintenance proactive. La digitalisation de la SCM permet des modèles d'économie circulaire et la traçabilité des émissions. Les objectifs écologiques sont de plus en plus poursuivis par le biais d'outils numériques, créant ainsi des synergies qui doivent être adoptées conjointement.
- **Tant en PdM qu'en SCM, les attentes en matière d'expertise technique et de maîtrise du numérique, de sens aigu de l'interprétation des données et de facilité avec l'interaction avec l'IA apparaissent de plus en plus dans les descriptions de poste, ainsi que la capacité à collaborer en dehors des domaines d'études.** Ces attentes émergentes illustrent la demande croissante de profils hybrides combinant une connaissance approfondie du domaine avec des compétences transverses, digitales et relationnelles.
- **Les systèmes d'EFPP deviennent des acteurs stratégiques dans les écosystèmes d'innovation.** Le rôle des centres de formation professionnelle va bien au-delà de la formation. Comme l'a montré notamment le Pays basque, ils deviennent des facilitateurs de l'innovation industrielle, des bancs d'expérimentation pour les technologies appliquées et des agents de résilience économique locale. Il est essentiel de renforcer leur autonomie, leurs capacités techniques et leurs liens avec l'industrie pour garantir des parcours de transition inclusifs.
- **Les compétences sont la monnaie de la transformation - et elles évoluent.**
- **La maîtrise technique de l'IA, du cloud computing et de l'IoT est de plus en plus essentielle.** Cependant, les compétences transversales sont tout aussi importantes : l'adaptabilité, la pensée critique, la collaboration et l'autonomie d'apprentissage. À mesure que les rôles hybrides émergent et que les environnements de travail deviennent riches en données, les travailleurs doivent combiner maîtrise opérationnelle, capacité d'analyse et résilience des compétences générales.
- **La gestion du changement est la pierre angulaire de la transformation.**
- **L'adoption de la technologie est autant culturelle que technique.** La réussite des transitions industrielles et éducatives dépend du leadership, de la communication et de la confiance. De la résistance à l'automatisation aux modèles pédagogiques dépassés, le progrès dépend de la préparation des personnes et des institutions à une réinvention continue.



5.3. RECOMMANDATIONS

En réponse à ces leçons stratégiques, les recommandations transversales suivantes sont proposées aux parties prenantes de l'écosystème de la fabrication avancée :

À l'intention des décideurs et des organismes de financement

- Assurer des investissements durables dans la transformation numérique et verte en soutenant l'adoption par les PME par le biais de partenariats public-privé, de chèques innovation et de plateformes d'expérimentation sans risque.
- Reconnaître les centres d'EFPP comme des agents de transformation stratégique et soutenir leur autonomie, la mise à niveau des infrastructures et leur capacité à s'engager dans des écosystèmes d'innovation.
- Promouvoir l'alignement entre les cadres nationaux de certification et les profils professionnels émergents, en veillant à ce que l'évolution des rôles professionnels et des compétences hybrides soient reconnus et transférables dans toute l'Europe.

Pour les PME et les acteurs industriels

- Adopter des technologies modulaires et évolutives, telles que les plateformes PdM-as-a-Service et SCM basées sur le cloud, pour réduire le risque d'investissement et accroître l'agilité.
- Investir dans le perfectionnement de la main-d'œuvre grâce aux microcertifications et à l'apprentissage tout au long de la vie, par exemple dans les domaines de l'IA, de l'interprétation des données et des opérations durables.
- Favoriser une culture de collaboration en rejoignant les écosystèmes de plateformes, en participant à des réseaux d'innovation régionaux et en instaurant la confiance entre les chaînes d'approvisionnement.

Pour les centres de formation professionnelle et les organismes de formation

- Développer et intégrer des modèles de formation hybrides qui combinent l'apprentissage en ligne et en personne, offrant ainsi une flexibilité aux étudiants et aux professionnels.
- Collaborer avec les entreprises sur la co-conception des programmes d'études et l'application concrète des compétences, notamment par le biais de bancs d'essai, d'études de cas et de projets d'innovation.
- Renforcer la formation des formateurs, en les dotant à la fois d'une expertise numérique et d'approches pédagogiques modernes.

Pour une coordination au niveau de l'UE

- Poursuivre des initiatives comme le projet LCAMP qui créent des méthodologies structurées pour observer les tendances technologiques, les besoins en compétences et les innovations en matière de formation.
- Faciliter l'harmonisation des stratégies de transition numérique et écologique dans l'ensemble des États membres, en permettant aux centres d'EFPP et aux PME d'opérer dans un cadre cohérent d'objectifs et de soutien.

En adoptant ces recommandations, l'Europe peut s'assurer que son secteur de fabrication avancée 4.0 reste compétitif à l'échelle mondiale, durable sur le plan environnemental et socialement inclusif, ancré par un écosystème d'EFPP prêt à relever les défis de demain.



5.4. PERSPECTIVE

Les transitions écologique et numérique qui remodelent actuellement le secteur de la fabrication avancée 4.0 ne sont pas seulement des défis technologiques, ce sont des opportunités humaines et systémiques. À mesure que nous nous tournons vers l'avenir, il devient clair qu'une transformation réussie nécessite plus que l'accès à de nouveaux outils ; Elle exige la capacité d'intégrer ces innovations dans les opérations quotidiennes, les attentes de la main-d'œuvre et les systèmes éducatifs.

Tant dans la maintenance prédictive (PdM) que dans la gestion de la chaîne d'approvisionnement (SCM), les perspectives sont définies par la convergence. Les objectifs écologiques et numériques sont de plus en plus liés, non seulement en termes de mesures de durabilité, mais aussi de stratégies partagées en matière d'efficacité, de circularité, de transparence et de résilience. Dans les deux domaines, les PME comme les grandes entreprises expérimentent des solutions hybrides : combiner l'expertise locale avec une infrastructure basée sur le cloud, les rôles traditionnels avec des systèmes améliorés par l'IA et des stratégies d'adoption modulaires avec un alignement plus large de la chaîne de valeur.

Les centres d'EFPP sont des catalyseurs clés de cette transition. Les perspectives de l'enseignement professionnel ne se limitent plus à l'enseignement technique ou à la certification sectorielle ; Il s'oriente vers le développement intégré des capacités. Les centres doivent préparer les apprenants à penser au-delà des systèmes, à travailler en collaboration dans tous les domaines et à s'adapter continuellement aux exigences changeantes des industries numériques et axées sur la durabilité. Cela signifie promouvoir des parcours d'apprentissage flexibles, renforcer les partenariats avec l'industrie et veiller à ce que les enseignants aient les compétences - et la liberté institutionnelle - nécessaires pour expérimenter, évoluer et diriger.

Dans le même temps, de nouvelles formes de coopération et d'expérimentation façonneront la prochaine phase de la transformation. Qu'il s'agisse de bancs d'essai, de partenariats public-privé, d'initiatives intercentres ou de modèles de financement expérimentaux, les centres d'EFPP et l'industrie doivent coconcevoir à la fois des expériences d'apprentissage et des feuilles de route technologiques. En travaillant avec plusieurs centres d'EFPP et des dizaines de partenaires industriels, ce groupe de travail a fourni des informations précieuses sur le terrain d'entente entre l'enseignement scolaire, la préparation pratique, la formation professionnelle et la préparation au marché du travail. L'accès direct aux activités et aux aspirations d'apprentissage et d'enseignement, ainsi qu'aux perceptions et aux protocoles des PME et des grandes industries, a permis une analyse minutieuse de deux domaines clés du paysage manufacturier. Ce qui est devenu évident, c'est la valeur établie de la formation dans les centres d'EFPP, l'impératif de collaboration éducative et industrielle, et l'engagement commun que nous avons tous envers la réussite des étudiants dans leur apprentissage et la satisfaction des employés dans leur monde du travail. À travers le prisme de la maintenance prédictive et de la gestion de la chaîne d'approvisionnement, nous avons vu que la transformation numérique et la transformation verte partagent un avenir commun soutenu par un engagement commun.

À cette fin, les perspectives d'intégration collaborative de ces deux résultats - et des deux institutions qui soutiennent ces objectifs - sont à la fois positives et possibles. Nous avons le pouvoir, en tant qu'institutions individuelles et en tant que secteur éducatif collectif, de travailler avec les entreprises manufacturières de toutes tailles à la transformation de l'apprentissage, de l'enseignement, de la formation et de l'emploi. Grâce à des recommandations à la fois pratiques et ambitieuses, centrées sur l'apprenant et expansives de l'industrie, locales, régionales et transnationales, nous avons l'occasion de réinventer l'avenir de la formation professionnelle et éducative dans le secteur de la fabrication avancée 4.0 dans toute l'Union européenne et dans le monde entier.



Ces rapports, et les idées qu'ils contiennent, n'existeraient pas sans l'intelligence collective, l'énergie et le dévouement de tous les partenaires engagés dans ce travail. Au-delà des frontières, des fuseaux horaires et des institutions, chaque contributeur a apporté son expertise et son engagement commun envers l'excellence. Du cœur de l'Union européenne aux régions voisines, cet esprit de coopération reflète le meilleur de la mission Erasmus+ : collaborative, centrée sur l'humain et tournée vers l'avenir. C'est un privilège d'être témoin et de faire partie d'un exemple aussi vibrant de l'esprit européen en action.



6. INDEX DES TABLES

<i>Table 1. Besoins en compétences (extrait)</i>	<i>31</i>
<i>Table 2. Exemples de projets européens en tendances technologiques et développement des compétences dans la fabrication avancée</i>	<i>40</i>
<i>Table 3. De nouvelles technologies et de nouveaux domaines dans les formations liées à la PdM</i>	<i>41</i>
<i>Table 4. De nouvelles technologies et de nouveaux domaines dans les formations liées à la SCM</i>	<i>42</i>
<i>Table 5. Formations liées à la SCM et ses principales compétences formées</i>	<i>43</i>
<i>Table 6. Programmes de spécialisation au Pays basque</i>	<i>46</i>
<i>Table 7. Besoins en compétences (d'après les rapports PdM, SCM et Pays basque)</i>	<i>59</i>



7. ANNEXE

7.1. ANNEXE 1 - BESOINS EN COMPETENCES

Table 7. Besoins en compétences (d'après les rapports PdM, SCM et Pays basque)

Domaine de compétence LCAMP	Catégorisation	Sous-catégories recommandées dans le cadre LCAMP	Profession/Origine du rapport	Besoins en compétences
Littératie en IA	Compétence	Compétence numérique critique	Maintenance prédictive (PdM)	IA de base ou apprentissage automatique - Connaissance de base des modèles d'IA/ML
	Habilité	Vision par ordinateur	Technicien en contrôle de la qualité (BC)	Vision par ordinateur et CNN pour la détection des défauts - appliquer des réseaux neuronaux pour le contrôle qualité automatisé
		Apprentissage automatique	Technicien en contrôle de la qualité (BC)	Outils d'inspection basés sur l'IA - utilisez l'intelligence artificielle pour la détection des défauts
Numérique	Attitude	Cybersécurité	Maintenance prédictive (PdM)	Sensibilisation à la cybersécurité - Sensibilisation à la sécurité informatique
			Gestion de la chaîne d'approvisionnement (SCM)	Sensibilisation à la cybersécurité - Sensibilisation à la sécurité informatique
		TIC	Opérateur CNC / Technicien contrôle qualité / Technicien en automatisation-robotique (BC)	Cybersécurité dans les environnements OT - comprendre les risques de sécurité dans les systèmes de production
	Compétence	TIC	Gestion de la chaîne d'approvisionnement (SCM)	Plate-forme cloud - capacité à utiliser des outils cloud, compétences en résolution de problèmes - capacité à utiliser des outils cloud



		Résolution de problèmes	Maintenance prédictive (PdM)	Résolution de problèmes (maintenance) - pensée analytique pour une prise de décision basée sur les données
		Conception du système	Maintenance prédictive (PdM)	Gestion prédictive des modèles (analyse des modèles de défaillance, seuils de risque)
			Technicien en automatisation-robotique (BC)	Intégration de la robotique industrielle - connecter les robots aux systèmes de ligne de production
	Habileté	Littératie des données	Maintenance prédictive (PdM)	Interprétation des données des capteurs - capacité à lire et à utiliser les données des capteurs IoT
				Compétences en diagnostic de données (maintenance) - analyse des données pour le diagnostic des défauts
			Gestion de la chaîne d'approvisionnement (SCM)	Data literacy - Littératie générale des données dans la SCM
		TIC	Gestion de la chaîne d'approvisionnement (SCM)	Profils hybrides (chaîne d'approvisionnement + compétences numériques) - par exemple, analystes de la chaîne d'approvisionnement dotés de compétences numériques
				Maîtrise des systèmes ERP et SCM - Utilisation régulière des logiciels ERP/SCM
			Technicien en automatisation-robotique (BC)	Protocoles de communication (OPC-UA, Ethernet) - mettre en œuvre des normes de communication industrielle
			Opérateur CNC (BC)	Interfaces numériques et IHM - actionnez les commandes à écran



				tactile sur les machines CNC.
			Technicien en automatisation-robotique/Technicien de maintenance (BC)	Appliquer des protocoles de cybersécurité de base dans les environnements OT - Mettre en œuvre des procédures de sécurité et des contrôles d'accès dans les systèmes de production
			Technicien d'entretien (BC)	Installer et configurer des capteurs IoT industriels - mettre en place des capteurs connectés pour la collecte de données Utiliser des systèmes de gestion de la maintenance assistée par ordinateur (GMAO) - gérer les flux de maintenance de manière numérique
		TIC	Maintenance prédictive (PdM)	Utilisation des plateformes PdM - utilisation des tableaux de bord PdM, des outils de GMAO, etc.
		Résolution de problème	Maintenance prédictive (PdM)	Interprétation des données (maintenance) - analyse des données pour le diagnostic des défauts
			Technicien d'entretien (BC)	Résoudre les problèmes de connectivité des données dans les réseaux IoT - résoudre les problèmes de communication dans les systèmes connectés
		Littératie des données	Technicien en contrôle de la qualité (BC)	Fonctionnement des systèmes d'inspection numériques - utilisation d'équipements de mesure et d'essai automatisés
				Documentation numérique et traçabilité - tenir des registres électroniques des données de qualité



				Configuration des systèmes de vision - mise en place des caméras et du traitement d'image pour le contrôle qualité
			Opérateur CNC (BC)	Intégration du système MES/ERP - connectez les opérations d'usinage aux systèmes d'entreprise
				Acquisition et interprétation des données - collecter et analyser les données de production pour l'optimisation
			Technicien d'entretien (BC)	Surveillez les données des capteurs (IoT) - analysez les données en temps réel des capteurs industriels connectés
				Utilisez des plates-formes basées sur le cloud pour surveiller les performances des machines - accédez aux systèmes de surveillance à distance
		Vision par ordinateur	Technicien en contrôle de la qualité (BC)	Systèmes de vision industrielle - faire fonctionner des systèmes d'inspection de la qualité basés sur des caméras
Transversal	Attitude	Fabrication numérique	Opérateur CNC (BC)	Fonctionnement d'un logiciel de CAO/FAO - utilisez des programmes de conception et de fabrication assistés par ordinateur
		Communication	Gestion de la chaîne d'approvisionnement (SCM)	Communication et coordination - ouverture et volonté d'adopter la transformation numérique
	Compétence	Flexibilité/Agilité	Maintenance prédictive (PdM)	Adaptabilité - volonté de s'adapter à l'évolution des rôles et des technologies
		Collaboration/Travail d'équipe	Maintenance prédictive (PdM)	Collaboration - collaboration interdépartementale



				(maintenance, opérations informatiques)	
		Pensée critique	Gestion de la chaîne d'approvisionnement (SCM)	Réflexion stratégique - compréhension holistique des chaînes d'approvisionnement complexes	
	Habileté	Collaboration/Travail d'équipe	Compétences transversales (BC)	Travailler efficacement en équipe - collaborer avec succès dans des groupes de travail multidisciplinaires	
				Collaboration interfonctionnelle - travailler efficacement avec des équipes multidisciplinaires dans des environnements numériques	
		Communication	Compétences transversales (BC)	Communication et coordination - partagez clairement l'information entre les services et les quarts de travail	
			Flexibilité/Agilité	Compétences transversales (BC)	S'adapter aux technologies émergentes - volonté d'apprendre et d'utiliser de nouveaux outils technologiques
	Résolution de problème		Compétences transversales (BC)	Résolution de problèmes et prise de décision - analyser des situations et prendre des décisions techniques efficaces	
	Amélioration continue		Compétences transversales (BC)	Mentalité d'amélioration continue - identifier les opportunités d'optimisation dans les processus de fabrication numérique	
	Professionnel	Compétence	Conception du système	Technicien en automatisation-robotique (BC)	Intégration de la robotique industrielle - connecter les robots aux systèmes de ligne de production
		Habileté	Conception du système	Technicien en automatisation-robotique (BC)	Configuration des systèmes de vision - configuration des caméras et du traitement





				d'images pour le guidage et l'automatisation des robots
--	--	--	--	---





Learner Centric Advanced Manufacturing Platform



**Co-funded by
the European Union**

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.