

PROVET 4.0 : projet ERASMUS+ pour la création de support de cours sur l'Industrie du futur

Hélène Chanal
SIGMA Clermont
Campus des Cézeaux CS20265
63178 AUBIERE Cedex
helene.chanal@sigma-clermont.fr

Khaled Arrouk
SIGMA Clermont
Campus des Csézeaux CS20265
63178 AUBIERE Cedex
khaled.arrouk@sigma-clermont.fr

José Gutierrez
SIGMA Clermont
Campus des Csézeaux CS20265
63178 AUBIERE Cedex
jose-javier.gutierrez-tapia@sigma-clermont.fr

Séverine Durieux
SIGMA Clermont
Campus des Cézeaux CS20265
63178 AUBIERE Cedex
severine.durieux@sigma-clermont.fr

Emmanuel Duc
SIGMA Clermont
Campus des Cézeaux CS20265
63178 AUBIERE Cedex
emmanuel.duc@sigma-clermont.fr

Résumé— *A l'heure actuelle, les entreprises manufacturières envisagent l'évolution de leurs méthodes de production avec les outils de l'industrie 4.0. Toutefois, cette évolution passe par la formation des acteurs de terrain aux technologies clés de l'industrie du futur. C'est dans ce contexte que nous avons été amenés à collaborer avec des partenaires italiens et espagnols au sein d'un projet ERASMUS+ PROVET 4.0. Le projet est composé de deux étapes principales : l'analyse des attentes en formation sur les technologies clés de l'industrie du futur d'entreprises et la création de support de cours sur ces technologies. Après une présentation des résultats de l'analyse des attentes industrielles, cet article présente un retour d'expérience sur la création de support de cours introductifs à la fabrication additive et à la robotique collaborative.*

Mots-clés— *industrie du futur, formation, fabrication additive, robotique collaborative*

I. INTRODUCTION

L'industrie du futur est le terme qui représente l'évolution des méthodes de production dans l'industrie liée à la numérisation de la société. L'industrie 4.0 repose sur 9 technologies selon The Boston Consulting Group [1] : Big data, la robotisation, la simulation, les systèmes d'information horizontaux et verticaux, l'internet industriel des objets, la cybersécurité, le cloud, la fabrication additive et la réalité augmentée.

La transition vers l'industrie du futur passe par l'accompagnement des personnes sur les nouvelles technologies à mettre en œuvre [2]. Cet accompagnement passe notamment par le développement de formation et de support de formation sur les domaines de l'industrie 4.0.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le projet PROVET 4.0 (PROfessional development of VET learners and industrial workers for the new industrial revolution 4.0) cofinancé par le programme « Lifelong Learning » de l'Union Européenne. Son objectif est de contribuer au développement des compétences des employés sur les technologies clés de l'industrie 4.0. Ce projet s'appuie sur une collaboration entre l'Espagne (FVEM et FFE), l'Italie (SIAV) et la France (SIGMA Clermont). Il a débuté en novembre 2015 et doit se terminer le 31 octobre 2017.

Le projet PROVET 4.0 est composé de deux étapes principales :

- L'identification des technologies clés en fabrication avancée dans les domaines industriels de l'électricité et de la mécanique en Espagne, en Italie et en France.
- Le développement d'un programme de formation commun et de cours gratuits en ligne sur des technologies clés en fabrication avancée.

Dans le cadre de ce projet, une étude exploratrice a été réalisée pour valider les thématiques des cours développés. Cette première étude est basée sur un questionnaire rempli par 32 entreprises espagnoles, italiennes ou françaises.

Un cours composé de 6 modules (big data, cloud computing, fabrication additive, robotique collaborative, systèmes cyber-physique et réalité augmentée) a été développé et est en cours de validation (novembre 2016). Au niveau de SIGMA Clermont, nous avons eu à notre charge le développement des modules sur la fabrication additive et la robotique collaborative.

L'objectif de cet article est de présenter un retour sur l'enquête menée lors de ce projet et sur les deux modules développés par SIGMA Clermont.

Dans un premier temps, nous présentons les partenaires du projet avant d'introduire le retour sur l'enquête réalisée auprès de 32 entreprises. Finalement, nous présentons les supports développés dans les cours de fabrication additive et de robotique collaborative.

II. PRESENTATION DES PARTENAIRES DU PROJET

Le projet PROVET 4.0 s'organise autour de 4 partenaires :

- FVEM (Federación Vizcaína de Empresas del Metal) qui est le porteur du projet.

Cette fédération espagnole regroupe un ensemble d'industriel de Gascogne travaillant sur le métal. FVEM propose ainsi à ces adhérents des modules de formation.

- FFE (Fondo Formación Euskadi)

FFE est un organisme espagnol de formation se situant au pays Basque.

- SIAV (Confindustria Veneto Siav SpA)

SIAV est une entreprise italienne qui offre un accompagnement à la mise en place d'innovations dans l'industrie.

- SIGMA Clermont

SIGMA Clermont est une école d'ingénieur française en mécanique et en chimie.

Les travaux entre cet ensemble de partenaire de l'Europe du sud a permis de travailler sur des problématiques de formation communes sur les technologies de l'industrie du futur.

Pour plus d'informations sur le projet, un site web a été créé : <http://provet40.eu/fr/>.

III. ANALYSE DES ATTENTES DE FORMATION DES ENTREPRISES SUR LES TECHNOLOGIES DE L'INDUSTRIE DU FUTUR

Dans un premier temps, une enquête a été réalisée en mars 2016 pour connaître où en étaient les entreprises, de chaque région partenaire, dans la transition imposée par la révolution 4.0. Cette enquête s'est articulée autour de 6 technologies clés que sont la fabrication additive, la robotique collaborative, les systèmes cyber-physique, la réalité augmentée, le cloud computing et les notions de big data [3].

L'objectif de l'enquête était de valider leur besoin en termes de formation.

Dans un premier temps, nous présentons les typologies d'entreprises interrogées puis nous résumons l'analyse des résultats.

A. Typologie des entreprises interrogées

11 entreprises espagnoles, 10 entreprises italiennes et 11 entreprises françaises ont répondu à l'enquête. Ces chiffres ne

permettent pas d'avoir des résultats statiquement exploitables mais permettent de dégager des besoins locaux.

Les entreprises interrogées travaillent principalement sur des objets métalliques, sont des PME (Petites et Moyennes entreprises) et des sous-traitants (Figure 1).

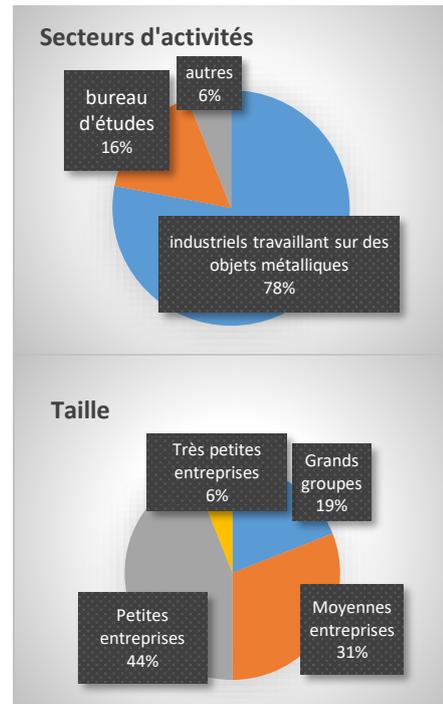


Figure 1. TYPOLOGIE DES ENTREPRISES INTERROGÉES

B. Résumé des résultats de l'étude

Un premier constat a porté sur le fait qu'en fonction des technologies clés considérées leur développement au sein des entreprises est considérablement différent. Ainsi, la plupart des entreprises mettent en application la fabrication additive alors que la réalité augmentée est très peu rependue (Figure 2).

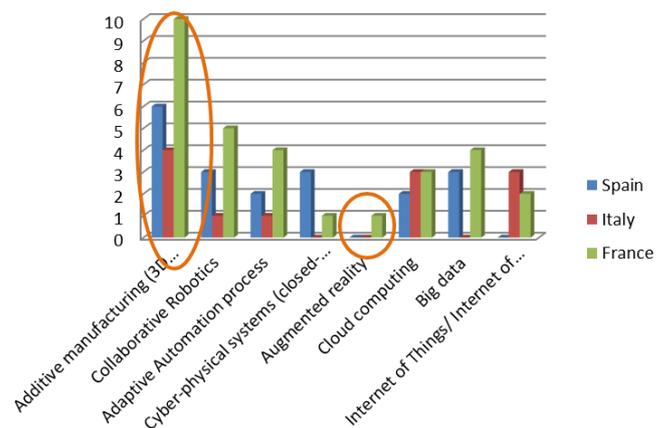


Figure 2. LES TECHNOLOGIES UTILISÉES DANS LES ENTREPRISES INTERROGÉES

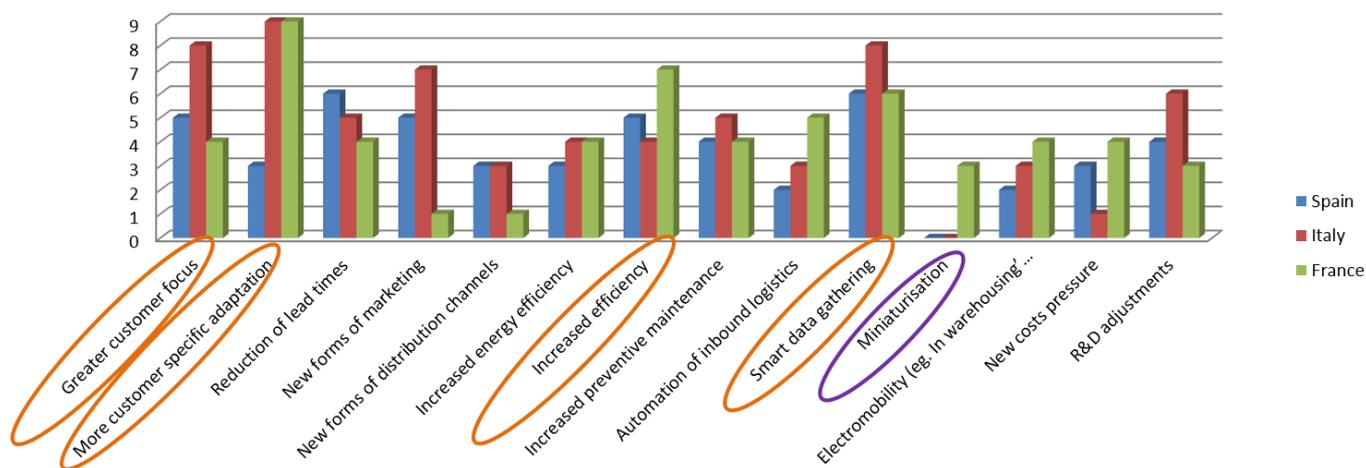


Figure 3. LES TENDANCES LIEES A L'INDUSTRIE 4.0

De plus, les attentes des entreprises interrogées sur les outils de l'industrie 4.0 portent principalement sur une meilleure intégration des besoins du client, une adaptation plus grande au besoin du client, une augmentation de l'efficacité et une collecte de données intelligente (Figure 3).

Les conclusions générales de cette étude exploratoire réalisée sur 32 entreprises en mars 2016 sont [3] :

- Plus de la moitié des entreprises ne mettent pas en application des outils de l'industrie 4.0 ou uniquement de façon partielle.
- Les entreprises de sous-traitances sont plus actives dans l'intégration des technologies clés de l'industrie 4.0 que les entreprises mettant sur le marché les systèmes finaux. En effet, la concurrence étant principalement basée sur le coût, l'intégration de nouvelles technologies permet, ainsi aux entreprises sous-traitantes, soit d'augmenter leur volume de production, soit de diminuer les coûts de production.
- L'impact et la mise en œuvre des outils de l'industrie 4.0 sont dépendants de la taille de l'entreprise. Plus l'entreprise est grande plus l'effort d'automatisation est important.
- Les concepts et vocabulaires de l'industrie 4.0 ne sont pas bien formalisés. Dans certains cas, certains perçoivent des notions de numérisation alors que d'autres des notions d'automatisation.
- Le « buzz » autour de l'industrie 4.0 ralentit après les effets d'annonce.

C. Conclusion

Cette enquête nous a permis de constater qu'au sein des entreprises les personnes avaient connaissance du terme industrie 4.0. Toutefois, les technologies associées ne sont pas forcément connues, formalisées ou maîtrisées.

Dans ce contexte, l'objectif du projet PROVET 4.0 sur la création de support de cours gratuit d'introduction sur des technologies clés de l'industrie 4.0 trouve toute sa pertinence.

IV. PRINCIPE DE DEFINITION DU CONTENU DES SUPPORTS DE COURS

Afin de simplifier l'accès aux supports de cours, nous avons choisi de les héberger sur une plateforme Moodle gérée par FVEM. Les supports de cours proposés doivent être composés de diaporama et de vidéo. Ils doivent conduire à une activité d'apprentissage à distance de 8h environ complétée par un cours en présentiel de 4h.

L'objectif des cours proposés est de sensibiliser les apprenants aux terminologies et concepts des technologies clés de l'industrie 4.0 afin qu'il puisse identifier les principaux avantages et problématiques de mise en œuvre de ces technologies. Les supports de cours développés pour l'apprentissage à distance sont génériques quel que soit le profil des apprenants ; la partie en présentiel est là pour adapter la formation aux attentes du public visé. Cette partie en présentiel est développer ou proposer au choix du formateur.

Les principales problématiques abordées dans les cours reposent sur l'identification des grands principes de la technologie étudiée, et les limites et bénéfices illustrés sur des cas d'étude. Ainsi, la construction des différents cours à principalement consisté au filtrage et à la synthèse de l'ensemble des informations présentés sur internet et dans la littérature afin de donner à l'apprenant une vision cohérente avec les normes et usage en vigueur de la technologie étudiée.

Les supports de cours sont scindés en 4 unités :

- L'unité 1 est la partie qui introduit la technologie décrite dans le cours. Les grands principes de la technologie étudiée sont présentés et illustrés par des résultats d'étude sur l'évolution future de la technologie étudiée dans le monde industriel.
- L'unité 2 permet de présenter les définitions et notions clés permettant d'appréhender les principes de la technologie étudiée.
- L'unité 3 illustre un élément clé particulier de la technologie étudiée.

- L'unité 4 donne des limites et bénéfices de la technologie étudiée à travers des études de cas.

Ces grands principes de définition ont été appliqués pour le développement d'un cours sur la fabrication additive et la robotique collaborative.

V. DEFINITION D'UN COURS INTRODUCTIF A LA FABRICATION ADDITIVE

Un nombre important de ressources sont disponibles sur internet. En effet, de nombreuses notions doivent être maîtrisées pour pouvoir mettre en œuvre dans de bonne condition les procédés de fabrication additive comme le montre le programme d'un cours de 14 semaines développés au MIT [4] ou des ouvrages dédiés à la fabrication additive [5].

La difficulté a été d'identifier un contenu nécessaire à la mise en place de 8h d'introduction aux notions de la fabrication additive en e-learning pour des industriels. Nous avons ainsi dû cibler le contenu sur les savoirs nécessaires pour comprendre ce qu'est la fabrication additive et comment elle se met en œuvre. L'objectif du cours est donc d'introduire les différents procédés de fabrication additive avec leurs applications et la chaîne numérique de la CAO à la pièce imprimée. Les objectifs spécifiques associés sont ainsi :

- Décrire les différents procédés classiques de la fabrication additive
- Décrire les différentes applications avec les aspects de sécurité associés
- Expliquer la chaîne numérique de la CAO à la pièce imprimée
- Expliquer l'impact de la fabrication additive sur la conception de la pièce

Le cours est ainsi articulé autour du schéma de la Figure 4.

Afin de proposer un discours reconnu par la communauté et universel, nous avons basé la description et la terminologie des différents procédés sur les terminologies de la norme ISO 17296-2 [6].

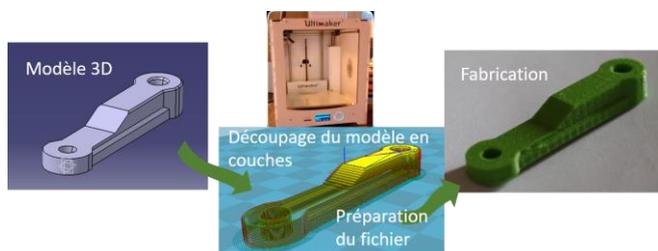


Figure 4. LES GRANDES ETAPES DU PROCEDE DE FABRICATION ADDITIVE

La description de la chaîne numérique est basée sur la mise en place d'une impression de pièce en ABS à partir de sa description CAO sur une imprimante de dépose de fil. Nous avons choisi ce procédé car il se démocratise et de nombreux logiciels gratuits sont disponibles. Pour conserver un discours généralisable, nous avons concentré le discours sur l'évolution géométrique de la pièce au cours du processus (format de fichier

.STL, découpage du modèle en couche, choix du type de support et taux de remplissage) plus que sur les problématiques de réglage du procédé de dépose de matière (Figure 5).

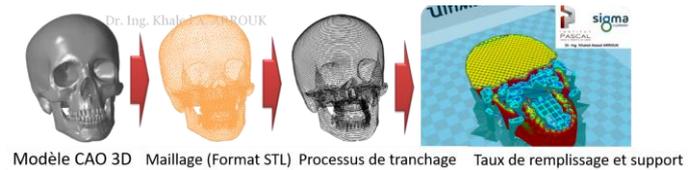


Figure 5. EVOLUTION GEOMETRIQUE DE LA PIECE AU COURS DU PROCESSUS DE PREPARATION DE L'IMPRESSON 3D

L'impact de la fabrication additive sur la conception des pièces est abordé par des études de cas. Nous nous sommes focalisés sur les problématiques suivantes :

- Orientation de la pièce par rapport à la direction des couches. L'analyse porte sur le comportement mécanique résultant, le type de supports nécessaire pour l'impression de la pièce, la sensibilité à la déformation de la pièce en cours de fabrication et à l'état de surface obtenue.
- Impact thermique des procédés de fabrication additive. L'objectif est de montrer, aux apprenants, les défauts pouvant apparaître pendant la fabrication du fait des gradients thermiques générés par le procédé de fabrication additive (Figure 6). Cette illustration permet ainsi de montrer l'intérêt de la mise en place d'une stratégie de remplissage pour remplir les pièces massives.

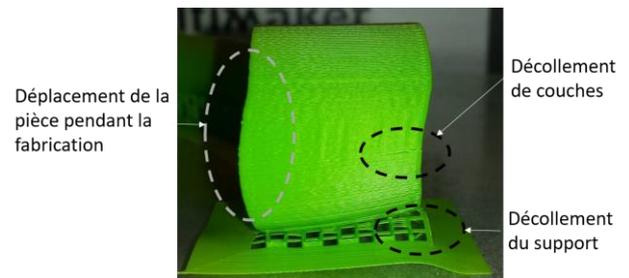


Figure 6. DEFORMATION D'UNE PIECE LORS D'UNE IMPRESSON 3D

- Le bénéfice de la fabrication additive pour la fabrication de géométries internes complexes. Cette partie montre la pertinence du développement d'un processus autour de la fabrication additive pour ce type de pièce.

Afin de faciliter la compréhension de l'apprenant, toutes les notions du cours sont illustrées par des vidéos d'exemples de mise en œuvre présentes sur internet et libres de droit d'utilisation. Le choix de la vidéo est fait de manière à illustrer de façon directe la notion abordée.

VI. DEFINITION D'UN COURS INTRODUCTIF A LA ROBOTIQUE COLLABORATIVE

La robotique collaborative est une technologie qui est issue de la robotique industrielle. La robotique collaborative est en train de débiter son expansion (Figure 7). Ainsi, très peu de formations sont proposées sur cette thématique. Toutefois, un master spécialisé en robotique collaborative est proposé par les

Arts et Métiers au centre de Lille [8]. D'après le programme de formation proposé, les notions nécessaires au développement d'une cellule robotisée sont vastes et vont de la commande des robots, aux méthodes de conception jusqu'à l'intégration des systèmes en plus de la compréhension des spécificités de la robotique collaborative.

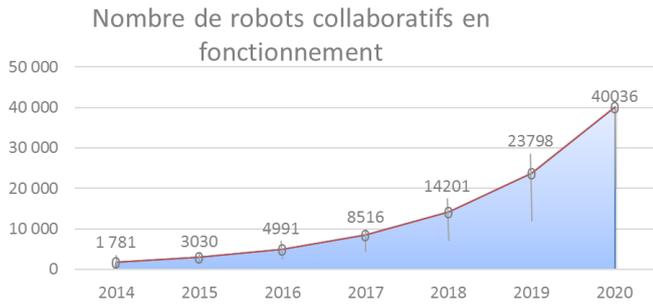


Figure 7. PERSPECTIVE D'ÉVOLUTION DU NOMBRE DE ROBOTS COLLABORATIFS EN FONCTIONNEMENT [7]

Notre cours d'introduction ne faisant que 8h, nous avons choisi de nous focaliser sur, la compréhension des principes de fonctionnement d'un robot collaboratif et l'identification des applications où un robot collaboratif peut amener un bénéfice. Les objectifs spécifiques associés à ce cours sont :

- Expliquer le concept de robot collaboratif
- Expliquer les normes de sécurité associées
- Décrire les principaux capteurs utilisés en robotique collaborative

Le cours est ainsi construit autour d'étude de cas et d'analyse des normes de sécurité propre aux robots collaboratifs.

Après l'introduction, une première étape du cours consiste à positionner les robots collaboratifs par rapport aux robots industriels. Nous nous sommes donc basés sur les normes ISO 10218-1, ISO 10218-2 et ISO/TS 15066 pour illustrer les principes de fonctionnement propre aux robots collaboratifs [9][10][11].

Ainsi, nous introduisons les notions fortes de la robotique collaborative que sont :

- Les différents espaces de travail d'un robot collaboratif avec les modes de fonctionnement associés (Figure 8).

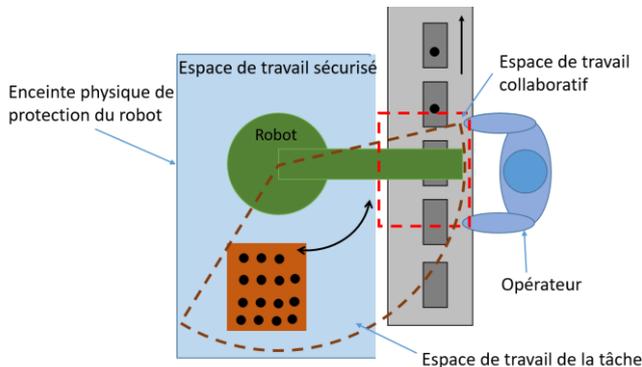


Figure 8. LES DIFFÉRENTS ESPACES DE TRAVAIL D'UN ROBOT COLLABORATIF

- Le lien entre la vitesse de fonctionnement et la position de l'opérateur (Figure 9).

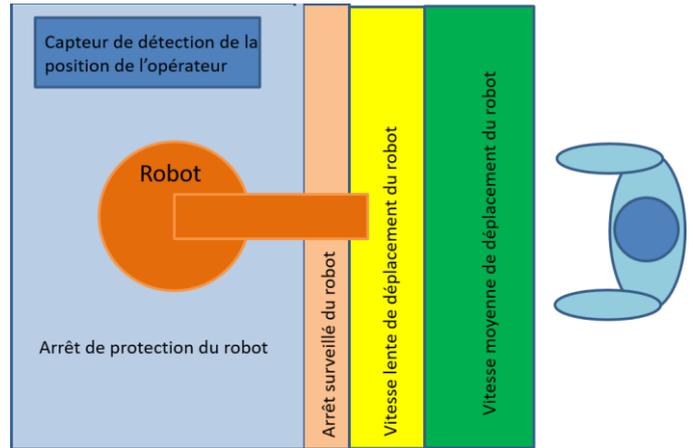


Figure 9. LIEN ENTRE LA VITESSE DE FONCTIONNEMENT ET LA DISTANCE ENTRE L'OPÉRATEUR ET LE ROBOT

- La réduction des risques de contact potentiel avec l'opérateur et de son intégrité physique (Figure 10).

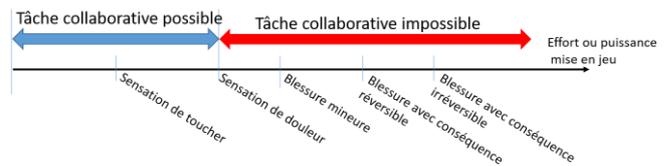


Figure 10. RÉDUCTION DES RISQUES DE CONTACT POTENTIEL AVEC L'OPÉRATEUR ET DE SON INTÉGRITÉ PHYSIQUE

Les capteurs permettant de mettre en place une tâche collaborative sont introduits. Nous nous sommes concentrés sur les capteurs d'effort, de proximité et de vision.

Une analyse des robots collaboratifs existants sur le marché permet d'illustrer le type de robots existants, leurs modes de fonctionnement et leurs systèmes de détection.

Finalement, des analyses de cas d'étude sont proposés afin d'identifier les bénéfices et limites des robots collaboratifs (Tableau 1).

Tout comme le cours de fabrication additive, de nombreuses vidéos d'exemples de mise en œuvre issues d'internet sont utilisées pour illustrer le cours et appréhender le comportement particulier des robots collaboratifs.

Facile à automatiser	Difficile à automatiser sans étude
<p>Les tâches répétitives ne nécessitant pas d'application d'effort de la part du robot :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pick and place • Dépose de produit sur une surface 	<p>Les tâches avec des logiques complexes et nécessitant une prise de décision.</p> <p>Les tâches nécessitant l'utilisation de capteurs de vision et/ou d'efforts.</p>
<p>Les processus réalisés sur des pièces similaires en terme de taille et de forme où la présentation de la pièce est ordonnée et structurée sur une table, une matrice ou une plateau</p>	<p>Les processus réalisés sur des pièces de formes et de tailles différentes ou des pièces déformables où la présentation des pièces est réalisées aléatoirement ou sur un convoyeur mobile.</p>
<p>Les tâche nécessitant une interaction avec des objets fixes comme des boîtes de chargement.</p> <p>Les processus basés sur la prise et la dépose d'une pièce toujours à la même place.</p>	<p>Les tâches nécessitant une communication avec d'autres machines ou moyens.</p> <p>Les processus nécessitant de contrôler l'effort appliqué (polissage, ponçage, perçage, l'assemblage de précision...).</p> <p>Les processus basés sur le savoir-faire de l'opérateur (soudage, peinture,...)</p>

Tableau 1. QUAND L'INTEGRATION D'UN ROBOT COLLABORATIF EST SIMPLIFIEE [12]

VII. PROCHAINES ETAPES DU PROJET

A l'heure actuelle chaque partenaire a développé les supports de cours pour 2 technologies dans sa langue maternelle. Nous devons maintenant les traduire et faire valider les supports de chacun par des experts. Les supports de cours seront disponibles sur une plateforme Moodle géré par la FVEM.

L'objectifs est ensuite de les tester au premier semestre 2017 sur 30 apprenants dans chaque pays.

VIII. CONCLUSION

Ce projet financé par le programme Erasmus+, nous a donné l'opportunité de travailler sur la création de support de cours sur les technologies clés de l'usine du futur, en nous basant sur les informations présentes sur internet. Un travail important d'appropriation de ces thématiques a été nécessaire afin de filtrer les notions devant être intégrées dans un cours introductif. Cette appropriation s'est faite grâce à des visites d'entreprises exploitant ou développant déjà les technologies clés ou ayant mené des réflexions pour les intégrer.

Le choix des illustrations est aussi une problématique car en plus des contraintes pédagogiques, des contraintes de droit d'auteurs et de traduction sont aussi à prendre en compte.

Finalement, nous avons pu proposer deux supports de cours d'environ 50 diapositives illustrées par des vidéos principalement issu de Youtube.

IX. REMERCIEMENTS

2015-1-ES01-KA202-015616 « Ce projet a été financé par le programme Erasmus+ de l'Union Européenne. Cette publication et tout son contenu reflète uniquement la vision de l'auteur, et la Commission ne peut être tenue responsable des usages de l'information contenu ici. ».

Ces travaux ont été effectués dans le groupe de travail Manufacturing 21, qui regroupe 18 laboratoires de recherche français. Les sujets abordés sont : modélisation du processus de fabrication, fabrication virtuelle et développement de nouvelles méthodes de fabrication.

Les auteurs souhaitent remercier l'entreprise 3D Systems de Riom (63) pour l'aide et la contribution apportées lors de la création des supports de cours sur la fabrication additive.

X. REFERENCES

- [1] M. RUSSMANN, M. LORENZ, P. GERBERT, M. WALDNER, J. JUSTUS, P. ENGEL, M. HARNISCH. "Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries", The Boston Consulting Group, avril 2015.
- [2] T. BIDET-MAYER. "L'industrie du futur : une compétition mondiale", Paris, Presse des Mines, 2016.
- [3] C. SALATIN, C. SOLOMON, J. SAINZ DE BARANDA, H. CHANAL, "Report - Analysis on current and future capabilities requirements of Key Enabling Technologies (KETs) in Advanced manufacturing", http://provet40.eu/media/uploads/2016/06/O1_Analysis-KETs_DEF.pdf (accès le 15/11/2016).
- [4] J. GO, A.J. HART, "A framework for teaching the fundamentals of additive manufacturing and enabling rapid innovation", Additive Manufacturing, vol. N°10, 2016, pp 76-87.
- [5] C. BARLIER, A. BERNARD, "Fabrication additive – du prototypage rapide à l'impression 3D", Dunod, ISBN : 978-2100711390, aout 2015.
- [6] NF ISO 17296-2 Juin 2015, "Fabrication additive - Principes généraux - Partie 2 : vue d'ensemble des catégories de procédés et des matières de base".
- [7] D. KARA, "Collaborative Robotics: Market Opportunities", ABI Research, June 2015 - <https://www.abiresearch.com/webinars/collaborative-robotics-market-opportunities/> (accès le 15/11/2016).
- [8] <http://www.ensam.eu/Formation-Initiale/Masteres-Specialises-R/Colrobot-Expert-en-robotique-collaborative-pour-l-industrie-du-futur> (accès le 15/11/2016).
- [9] NF EN ISO 10218-1 Août 2011, "Robots et dispositifs robotiques - Exigences de sécurité pour les robots industriels - Partie 1 : robots"
- [10] NF EN ISO 10218-2 Août 2011, "Robots et dispositifs robotiques - Exigences de sécurité pour les robots industriels - Partie 2 : système robots et intégration"
- [11] ISO/TS 15066 2016, "Robots et dispositifs robotiques -- Robots coopératifs"
- [12] "5 steps for getting started with collaborative robots", www.robotiq.com