

Dédicaces

Je dédie le fruit des efforts investis dans cette thèse, ainsi que ceux de toute mon cursus :

A la mémoire de mon père

« Père, sachez que vous nous manquez et que le vide n'est pas comblé. Chaque jour qui passe, on essaye de faire de notre possible pour que vous soyez fiers de nous »

A la plus chère au monde

« Ma mère qui m'a transmis la vie, pour l'éducation qu'elle m'a prodiguée pour tous les sacrifices qu'elle a consenti, pour le sens du devoir qu'elle m'a enseigné depuis mon enfance. Qu'elle trouve dans ce mémoire toute ma reconnaissance et tout mon amour »

A ma source de tendresse

« Ma sœur pour tous les moments de joie. J'espère atteindre le seuil de tes espérances. Que ce travail soit l'expression de ma profonde affection. Je te remercie pour le soutien moral et l'encouragement que tu m'as apporté. Je te souhaite tout le bonheur et le succès du monde »

A la famille BENTALEB

« Tous les membres de la famille BENTALEB qui m'ont insufflé courage, volonté et motivation. Merci pour votre sympathie et générosité. Sachez que grâce à vous, j'ai passé mes plus belles années d'études »

A mes chers amis

« Avec eux j'ai moins de failles, avec eux je me sens de taille, avec eux on a écrit quelques belles pages de notre histoire, je n'aurais jamais assez de verve pour raconter tous nos souvenirs »

A ceux et celles

« Que j'aime, qui m'aiment, qui m'ont donné des conseils précieux et qui m'ont inspiré »

Mohammed BAKKARI

Remerciements

Au terme de cette recherche, je tiens à exprimer mes sincères, vifs et profonds remerciements et ma gratitude à Monsieur le Directeur de thèse le Professeur Mr **KHATORY Abdellah**, sans qui, cette aventure n'aurait pas été possible. Je le remercie également pour la confiance qu'il m'a accordée et pour la grande liberté d'idées et de travail qu'il m'a donné. Je n'oublierai pas aussi de le remercier pour ses qualités humaines et son soutien permanent, le soutien administratif fait partie aussi, qui m'a permis de mener à bien ma thèse de doctorat. Qu'il trouve ici l'expression de toute ma reconnaissance.

Mes vifs remerciements s'adressent aux membres du jury qui me font l'honneur d'examiner et d'évaluer ce travail :

- Prof, **KARIM Mohammed** président du jury.
- Prof, **HIHI Hicham** rapporteur.
- Prof, **RAHMOUNE Miloud** rapporteur.
- Prof, **BOUTAHARI Said** rapporteur.
- Prof, **EL BEKKALI Chakib** examinateur.
- Prof, **SLAOUI Samira** examinatrice.
- Mr, **CHHIBA Mohamed** invité.

Merci d'avoir accepté de me consacrer de vos temps afin d'évaluer ma thèse, vos remarques et conseils m'a apporté sans doute des réflexions intéressantes pour le suivi de ma recherche.

Je remercie également toutes et tous les responsables des PME marocaines qui ont acceptées de me fournir un moment pour saisir mon questionnaire afin de réaliser cette recherche. Je n'oublie pas à cette occasion ceux et celles qui ont été une liaison utile entre moi et les PME.

Table des matières

Table des matières	IV
Résumé	X
Abstract	XII
ملخص	XIV
Liste des figures et tables	XV
Liste des sigles	XVIII
Introduction générale	1
CHAPITRE 1 : Etat des lieux des PME marocaines et leurs places dans la démarche du développement durable et des technologies de l'information et de la communication.....	6
1. Introduction	7
2. Définition des PME	7
3. PME et le développement durable dans l'ère des TIC	8
3.1. Concept du développement durable	8
3.2. PME et développement durable	10
3.3. TIC dans l'industrie	12
4. Caractéristiques des entreprises étudiées	13
4.1. Secteur d'activité	13
4.2. Nombre de salarié	14
4.3. Genre et grade professionnel dans les PME	15
4.3.1. Genre dans les PME	15
4.3.2. Grade professionnel dans les trois secteurs	17
4.4. Tranche d'âge	17
4.5. Durée de création des PME	18
5. Conclusion	18
CHAPITRE 2 : De l'approche classique des systèmes automatisés industriels à la demande de nouveaux systèmes de production modernes.....	19
1. Introduction	21
2. De la mécanisation à l'automatisation	21
2.1. Historique	21
2.2. Système automatisé de production	22
2.3. Niveau d'automatisation	25
2.4. Types de systèmes automatisés	27

2.4.1. Système en logique câblée	27
2.4.2. Système en logique programmée.....	28
3. Taxonomies de l'automatisation	29
3.1. Automatisation fixe	29
3.2. Automatisation programmable	30
3.3. Automatisation flexible	31
4. Approche du système automatisé.....	33
4.1. Approche globale de l'automatisation	33
4.2. Pyramide de l'automatisation	34
4.2.1. Niveau terrain.....	34
4.2.2. Niveau de contrôle	34
4.2.3. Niveau de supervision.....	35
4.2.4. Niveau supérieur.....	35
4.3. Étapes d'exécution de l'automatisation.....	35
4.3.1. Acquisition des données	35
4.3.2. Analyse des données	35
4.3.3. Contrôle de l'exécution	36
5. Décomposition d'un système automatisé.....	36
5.1. Partie commande.....	36
5.1.1. Automate programmable industriel	36
5.1.2. Structure interne d'un API.....	38
5.1.3. Fonctionnement de l'API	40
5.1.4. Langage de programmation	41
5.1.5. Amélioration des API.....	42
5.2. Partie opérative.....	44
5.2.1. Capteurs	44
5.2.2. Actionneurs	45
5.2.3. Pré-actionneurs.....	45
5.3. Partie supervision	46
5.3.1. Réseaux sans fil dans l'industrie	47
6. Industrie 4.0 : modernisation des systèmes automatisés.....	50
6.1. Système cyber physique : la base de l'industrie 4.0.....	52
7. Perspectives de l'automatisation dans le monde.....	53
7.1. En Europe	54
7.1.1. Le Royaume-Uni.....	54
7.1.2. La France	54

7.1.3. L'Allemagne.....	54
7.2. En Asie.....	55
7.2.1. La Chine.....	55
7.2.2. L'Inde.....	55
7.2.3. Le Japon.....	55
7.2.4. La Russie.....	56
7.3. En Amérique.....	56
7.3.1. Le Brésil.....	56
7.3.2. Le Mexique.....	56
7.3.3. Les États-Unis.....	56
7.4. En Afrique.....	57
7.4.1. L'Afrique du Sud.....	57
7.4.2. Le Maroc.....	57
8. Conclusion.....	58
CHAPITRE 3 : Impact économique, environnemental et social des systèmes automatisés dans les PME marocaines.....	58
1. Introduction.....	60
2. Contexte de l'étude.....	60
3. Le questionnaire.....	60
3.1. Parties du questionnaire.....	61
3.2. Etapes du questionnaire.....	61
3.2.1. Conception du questionnaire.....	62
3.2.2. Collecte des informations.....	62
3.2.3. Traitement des données.....	63
3.3. Pré-test du questionnaire.....	64
4. Choix des entreprises.....	64
4.1. Entreprises selon la ville.....	64
4.1.1. Entreprises de la ville de Fès.....	64
4.1.2. Entreprises de la ville de Casablanca.....	65
4.1.3. Entreprises de la ville de Tanger.....	65
4.2. Le choix d'échantillon.....	65
4.3. Envoi du questionnaire.....	66
5. Résultats de l'étude.....	67
5.1. Grandeur économique des PME.....	67
5.1.1. Nombre d'équipes dans les PME.....	67
5.1.2. Quantité de production.....	68

5.1.3. Temps de production.....	69
5.1.4. Dépendance de la production dans les PME.....	69
5.1.5. Qualité de la production	70
5.1.6. Contrôle qualité de la production	70
5.1.7. Responsable du contrôle qualité.....	71
5.1.8. Prix des produits.....	71
5.1.9. Choix du prix de produits.....	72
5.1.10. Marché ciblé par les PME	72
5.2. Aspect environnemental.....	73
5.2.1. Source énergétique utilisée	73
5.2.2. Consommation d'énergie	73
5.2.3. Dispositifs consommateurs de l'électricité	74
5.2.4. Durée de fonctionnement des systèmes automatisés.....	75
5.2.5. Souhait de réduction de la consommation en électricité.....	75
5.2.6. Arrêt des systèmes automatisés.....	76
5.2.7. Types de déchets industriels	76
5.2.8. Gestion de déchets industriels	77
5.3. Aspect social.....	78
5.3.1. PME et la formation.....	78
5.3.2. Formation des nouveaux recrutés.....	78
5.3.3. Genre et la formation	79
5.3.4. Salariés formés par grade professionnel	79
5.3.5. Thèmes de formation.....	80
5.3.6. Modes de formation.....	80
5.3.7. Impact de la formation continue	82
5.3.8. Degré d'atteinte des objectifs de formation	84
5.4. Niveau d'automatisation dans les PME.....	84
5.4.1. Nombre de systèmes automatisés	84
5.4.2. Installation des systèmes automatisés	85
5.4.3. Utilisation des systèmes automatisés.....	86
5.4.4. Niveau de compétences pour utiliser les systèmes automatisés.....	86
5.4.5. Réseaux locaux industriels dans les PME.....	87
5.4.6. Raisons de ne pas avoir un RLI.....	88
5.4.7. Supervision dans les PME.....	88
5.4.8. Impact des systèmes automatisés sur l'emploi.....	89
6. Interprétation des résultats de l'étude.....	89

6.1. Grandeur économique des PME	89
6.2. Aspect environnemental.....	90
6.3. Aspect social.....	91
6.4. Niveau d'automatisation dans les PME.....	93
7. Conclusion.....	94
CHAPITRE 4 : Contribution à l'amélioration des compétences des agents de SAP industriels via l'e-learning.....	91
1. Introduction	96
2. De l'artisanat à la qualification	96
3. Notion de compétences.....	97
4. Types de compétences	99
4.1. Compétences techniques : Hard Skills	100
4.2. Compétences non techniques : Soft Skills	100
5. Modes d'acquisition de compétences	101
5.1. Enseignement supérieur.....	101
5.2. Formation continue	102
5.3. Coaching.....	103
5.4. Formation dirigée par un instructeur : ILT	104
5.5. E-learning.....	105
5.5.1. E-learning : nouveau concept	105
5.5.2. Système de gestion d'apprentissage (LMS).....	106
6. Choix du mode d'acquisition de compétence.....	110
7. Elaboration de la plateforme e-learning.....	111
7.1. Ingénierie de la formation	111
7.2. Modèle ADDIE	112
7.2.1. Analyse	114
7.2.2. Design	114
7.2.3. Développement.....	114
7.2.4. Implémentation.....	115
7.2.5. Evaluation	115
7.3. Modèle SAM	115
7.3.1. Préparation	117
7.3.2. Conception itérative	117
7.3.3. Développement itératif.....	117
7.4. Choix du modèle	118
8. Conception de la plateforme e-learning	118

8.1. Accès à la plateforme	118
8.2. Choix de types de compétences	119
8.3. Droits de l'administrateur	121
8.4. Droits du formateur	121
9. Modélisation avec UML	122
9.1. Diagramme de classe	122
9.2. Diagramme de cas d'utilisation	124
10. Modèle d'acceptation de la technologie	126
11. Conclusion	127
Conclusion Générale	128
Limites de la recherche	130
Perspectives	130
Annexe A : Architecture du protocole ZigBee	133
Couche physique	133
Couche MAC (Media Access Control)	133
Couche de réseau (Network -NWK)	134
Couche d'application	135
Topologies du ZigBee	136
Etoile	136
Point à Point	137
Annexe B : Questionnaire	138
Annexe C : Travaux scientifiques	145
Annexe D : Diagramme de cas d'utilisation	147
Références	149

Résumé

Les Petites et Moyennes Entreprises PME marocaines sont doublement impactées par la concurrence acharnée quotidienne, à cause de la mondialisation et du développement rapide des nouvelles technologies d'information et de la communication TIC, et la production industrielle de masse qui devient de plus en plus importante pour les PME. Elles doivent produire rapidement en masse des petites et moyennes séries de produits tout en respectant les critères de la qualité élevée et de bas prix afin d'acquérir une part importante du marché et de s'adapter aux clients exigeants. L'un des objectifs des industriels est d'avoir des systèmes flexibles capables de s'adapter à des fabrications variant dans le temps par l'introduction de nouveaux produits.

Les systèmes automatisés industriels répondent donc aux besoins des PME en termes de production en masse et deviennent omniprésents dans tous les secteurs d'activités. Par contre, l'augmentation du nombre des systèmes d'automatisation dans les industries est considérée comme inquiétante par la société surtout lorsque ces systèmes exigent des agents qualifiés, compétents voire polyvalents puisque l'intervention humaine est réduite au strict minimum. Les agents des systèmes automatisés se sentent précaires dans leurs emplois, après un soulagement vécu au début lors de la délégation des tâches dangereuses et répétitives à l'automatisation, par ce qu'ils craignent le licenciement surtout avec l'avènement de la nouvelle révolution industrielle qui va demander de personnels hautement qualifiés. Les systèmes automatisés sont considérés donc comme une épée à double tranchant, ils sont considérés comme un synonyme de productivité de la part des PME et comme un synonyme de destruction d'emploi chez les salariés.

C'est en partant de cette problématique en essayant d'étudier l'impact des systèmes automatisés industriels (économique, environnemental et social) que nous avons mené notre recherche afin de répondre à ce dilemme, sans équivoque, en se basant sur un questionnaire destiné aux PME du secteur textile, agroalimentaire et automobile. Notre objectif est double, c'est de contribuer à présenter un état des lieux de l'impact des systèmes automatisés industriels dans les PME marocaines et de trouver un compromis entre les PME et les salariés, puisque le potentiel humain est la principale ressource de développement de chaque entreprise et c'est lui le générateur de sa valeur ajoutée.

Notre étude montre que les systèmes automatisés industriels n'ont pas un effet négatif sur l'emploi c'est-à-dire que les emplois ne sont pas affectés par l'existence de l'automatisation

au sein des PME, ainsi que la plupart de ces PME répondantes ne consacrent pas suffisamment de ressources pour former leurs salariés. Ceux et celles qui en bénéficient sont favorisés par leurs grades professionnels et par genre par rapport aux autres, donc la question d'équité à l'accès à la formation est négligeable dans la plupart des PME marocaines.

Pour faire face à cette problématique, nous avons présenté dans ce travail la modélisation d'une plateforme de formation type e-learning en se basant sur le modèle pragmatique SAM puisque l'e-learning demeure un facteur primordial pour acquérir de nouvelles compétences principales que ce soit compétences techniques ou compétences non techniques aux personnels surtout aux agents des systèmes automatisés. Elle permet également aux PME l'adaptation à son environnement et la libération des entraves de démission des compétences puisque la formation sera toujours disponible aux autres salariés d'une part, d'autre part elle aide les salariés d'être autonomes, productifs et de s'ouvrir à de nouvelles perspectives.

Mots clés : systèmes automatisés industriels, automatisation, production, PME, compétences, e-learning, formation.

Abstract

Moroccan Small and Medium-Sized Enterprises are doubly impacted by fierce daily competition, due to globalization and the rapid development of new information technologies and communication ICT, and mass industrial production becoming increasingly important for SMEs. They have to produce mass small and medium-sized batches of products quickly while meeting the criteria of high quality and low prices in order to acquire a significant share of the market and to adapt to demanding customers. One of the objectives of manufacturers is to have flexible systems capable of adapting to time-varying manufacturing through the introduction of new products.

Automated industrial systems, therefore, meet the needs of SMEs in terms of mass production and become ubiquitous in all sectors of activity. On the other hand, the increase of the number of automation systems in the industries is considered as worrying by the society especially when these systems require qualified, competent or even polyvalent agents since the human intervention is reduced to the strict minimum. The agents of the automated systems feel precarious in their jobs after a relief experienced at the beginning during the delegation of the dangerous and repetitive tasks to the automation because they fear the dismissal especially with the advent of the new industrial revolution who will ask for highly qualified staff. Automated systems are therefore seen as a double-edged sword, they are considered as a synonym for productivity on the part of SMEs and as a synonym for job destruction among employees.

Starting from this problematic by trying to study the impact of automated industrial systems (economic, environmental and social) that we conducted our research to answer this dilemma, unequivocally, based on a questionnaire intended SMEs in the textile, agri-food and automotive sector. Our objective is twofold, it is to contribute to present a state of the place of the impact of industrial automation systems in Moroccan SMEs and to find a compromise between the SMEs and the employees since the human potential is the main resource of development of each company and it is him the generator of its added value.

Our study shows that industrial automation systems do not have a negative effect on employment that is to say jobs are not affected by the existence of automation within SMEs,

as most these responding SMEs do not spend enough resources to train their employees. Those who benefit are favored by their professional ranks and by gender compared to others, so the question of equity in access to training is negligible in most Moroccan SMEs.

To deal with this problem, we presented in this work the modeling of a training platform type e-learning, based on the pragmatic model SAM since e-learning remains a key factor to acquire new core competencies. whether hard skills or soft skills to staff especially to agents of automated systems. It also allows SMEs to adapt to their environment and to release barriers to the resignation of skills since training will always be available to other employees on the one hand, and on the other hand, it helps employees to be autonomous, productive and open up to new perspectives.

Keywords: industrial automation systems, automation, production, SMEs, skills, e-learning, training.

ملخص

لقد تأثرت الشركات الصغرى والمتوسطة المغربية بشكل مضاعف بالمنافسة اليومية الشرسة، بسبب العولمة والتطور السريع لتكنولوجيات المعلومات والاتصالات الجديدة، وأصبح الإنتاج الصناعي الضخم ذو أهمية متزايدة للشركات الصغيرة والمتوسطة. لذا يتعين عليهم إنتاج كميات كبيرة من المنتجات الصغيرة والمتوسطة الحجم بسرعة فائقة، مع استيفاء معايير الجودة العالية والأسعار المنخفضة من أجل الحصول على حصة وافرة من السوق الاقتصادي والتكيف مع المتطلبات الشخصية للزبناء. يتمثل أحد أهداف الشركات الصناعية في الحصول على أنظمة مرنة قادرة على التكيف مع التصنيع المتغير مع مرور الوقت من خلال إدخال منتجات جديدة.

تلبى النظم التلقائية الصناعية احتياجات الشركات الصغيرة والمتوسطة من حيث الإنتاج الضخم كما أصبحت في كل شركة وفي كل القطاعات. من ناحية أخرى، تعتبر زيادة عدد أنظمة الأتمتة في الصناعات أمراً مقلماً من قبل المجتمع خاصةً عندما تتطلب هذه الأنظمة كفاءات مؤهلة أو مختصة أو حتى متعددة الوظائف من أجل العمل عليها، ونظراً لأن التدخل البشري يتم تقليله بسببها إلى الحد الأدنى. فإن مستعملي النظم التلقائية يشعرون بعدم الأمان في وظائفهم بعد ما كانوا يشعرون في بداية الأمر بارتياح كبير خاصة وأن الأتمتة تقوم بالمهام الخطيرة والمتكررة، ومع ظهور الثورة الصناعية الجديدة التي تتطلب موظفين مؤهلين تأهيلاً عالياً أصبحوا يخشون طردهم من العمل. وعليه فإن الأنظمة التلقائية تعتبر على أنها سيف ذو حدين، حيث تعتبر مرادفاً للإنتاجية من جانب الشركات الصغيرة والمتوسطة ومرادفاً لتدمير الوظائف بين الموظفين.

انطلاقاً من هذه الإشكالية في محاولة لدراسة تأثير الأنظمة التلقائية الصناعية (الاقتصادي والبيئي والاجتماعي) أجرينا هذا البحث للإجابة على هذه المعضلة، بشكل لا لبس فيه، استناداً على استمارة موجهة الى الشركات الصغيرة والمتوسطة في قطاع النسيج والغذاء والسيارات. هدفنا ذو شقين، أولاً هو المساهمة في تقديم معطيات عن تأثير أنظمة الأتمتة الصناعية في الشركات الصغيرة والمتوسطة في المغرب. ثانياً، إيجاد حل وسط بين الشركات الصغيرة والمتوسطة والموظفين لأن الإمكانيات البشرية هي المورد الرئيسي لتنمية كل شركة وهو أساس القيمة المضافة.

تبين دراستنا أن أنظمة الأتمتة الصناعية ليس لها تأثير سلبي على الوظيفة، أي أن الوظائف لا تتأثر بوجود الأتمتة داخل الشركات الصغيرة والمتوسطة، هذه الشركات الصغيرة والمتوسطة المشاركة في البحث لا تتفق ما يكفي من الموارد لتكوين موظفيها. كما أن أولئك الذين يستفيدون من التكوين يفضلون برتبهم المهنية ونوع جنسهم مقارنة بغيرهم، لذا فإن مسألة المساواة في الوصول إلى التكوين لا تكاد تذكر في معظم الشركات المغربية الصغيرة والمتوسطة.

للتعامل مع هذه المشكلة، قدمنا في هذا العمل نمذجة التكوين عبر منصة التكوين الإلكتروني e-learning، استناداً إلى نموذج العملي SAM حيث أن التعلم الإلكتروني يبقى عاملاً رئيسياً للحصول على كفاءات أساسية جديدة، خاصة لمستعملي النظم التلقائية، কিما كانت هذه المهارات: تقنية أو غير تقنية. كما يسمح للشركات الصغيرة والمتوسطة بالتأقلم مع بيئتها وإزالة حواجز استقالة الكفاءات لأن التكوين سيظل متاحاً للموظفين الآخرين من جهة، ومن ناحية أخرى فإنه يساعد الموظفين على أن يكونوا مستقلين ومنتجين ومنتجين على وجهات نظر جديدة.

الكلمات المفتاحية: أنظمة الأتمتة الصناعية، الأتمتة، الإنتاج، الشركات الصغيرة والمتوسطة، المهارات، التعلم الإلكتروني، التدريب.

Liste des figures et tables

Figures

Figure 1: Les 3 piliers du développement durable	9
Figure 2: Répartition des PME par secteur	14
Figure 3: Taille de l'entreprise.....	14
Figure 4: Répartition des ingénieurs, techniciens et opérateurs par genre dans le secteur textile	15
Figure 5: Répartition des ingénieurs, techniciens et opérateurs par genre dans le secteur agroalimentaire.....	16
Figure 6: Répartition des ingénieurs, techniciens et opérateurs par genre dans le secteur automobile.....	16
Figure 7: Répartition des femmes et des hommes dans les trois secteurs.....	17
Figure 8: Répartition totale des femmes et hommes par grade professionnel	17
Figure 9: Tranche d'âge des ingénieurs, techniciens et opérateurs des trois secteurs	18
Figure 10: Existence des PME	18
Figure 11 : Evolution des méthodes de travail.....	22
Figure 12 : Armoire à relais	28
Figure 13: Armoire à base d'API.....	28
Figure 14: Automatisation fixe selon la variété et la quantité des produits	30
Figure 15: Automatisation programmable selon la variété et la quantité des produits	31
Figure 16: Automatisation programmable selon la variété et la quantité des produits	32
Figure 17: Pyramide de la Computer Integrated Manufacturing CIM.....	33
Figure 18: Temps de réponse CIM.....	34
Figure 19: Etapes d'exécution de l'automatisation	35
Figure 20: Communication entre la PC, la PO et l'IHM	36
Figure 21 : Structure interne d'un API	37
Figure 22: Principe de fonctionnement de l'interface d'Entrée d'un API.....	38
Figure 23: Principe e fonctionnement de l'interface de Sortie d'un API	39
Figure 24: Cycle d'un API.....	40
Figure 25: Structure interne de l'API avec module de la FPGA.....	43
Figure 26: Transformation d'une grandeur physique à un signal exploitable	44
Figure 27: Architecture simplifiée de la supervision	46
Figure 28: Couches du protocole ZigBee.....	49
Figure 29: Les trois niveaux du CPS.....	53
Figure 30: Conception du questionnaire sous le logiciel Sphinx plus ² V5	62
Figure 31: Saisie des données dans le logiciel Sphinx plus ² V5.....	63
Figure 32: Traitement des données par le logiciel Sphinx plus ² V5	63
Figure 33: Qualité de production	70
Figure 34: Type de contrôle qualité	71
Figure 35: Responsable du contrôle qualité	71
Figure 36: Prix des produits	72
Figure 37: Choix du prix	72
Figure 38: Consommation en électricité par secteur	74
Figure 39: Dispositifs consommateurs de l'électricité.....	74

Figure 40: Durée de fonctionnement des systèmes automatisés	75
Figure 41: Souhait de réduction de la consommation en électricité	76
Figure 42: Arrêt des systèmes automatisés	76
Figure 43: Types de déchets industriels	77
Figure 44: Gestion de déchets industriels	77
Figure 45: Répartition des PME formatrices par secteur	78
Figure 46: Formation des nouveaux recrutés	79
Figure 47: Répartition des formés par genre	79
Figure 48: Nombre de formation par grade professionnel	80
Figure 49: Thèmes de formation	81
Figure 50: Modes de formation	81
Figure 51: Impact de la formation sur la personnalité.....	82
Figure 52: Impact de la formation sur l'emploi	83
Figure 53: Impact de la formation sur l'entreprise.....	84
Figure 54: Degré d'atteinte des objectifs de formation.....	84
Figure 55: Taux des systèmes automatisés dans les PME dans les 3 secteurs.....	85
Figure 56: Utilisation des systèmes automatisés.....	86
Figure 57: Niveau de compétences par secteur à utiliser les systèmes automatisés	87
Figure 58: Réseaux locaux industriels dans les PME	87
Figure 59: Raisons de ne pas avoir un RLI	88
Figure 60: Supervision dans les PME	89
Figure 61: Impact des systèmes automatisés sur l'emploi	89
Figure 62: Compétence : intersection entre 4 aspects observables et mesurables	98
Figure 63: Différents mode d'acquisition de compétences en fonction du coût et le temps de la formation	110
Figure 64: Modèle ADDIE en cascade.....	113
Figure 65: Modèle ADDIE en boucle	113
Figure 66: Modèle SAM ₁	116
Figure 67: Modèle SAM ₂	117
Figure 68: Accès à la plateforme.....	119
Figure 69: Choix de compétences dans la plateforme.....	119
Figure 70: Contenus techniques	120
Figure 71: Contenus non techniques	120
Figure 72: Droits de l'administrateur	121
Figure 73: Droits du formateur.....	122
Figure 74 : Diagramme de classe de la plateforme	123
Figure 75: Diagramme de cas d'utilisation.....	125
Figure 76: Extrait du code java de la classe formation	126
Figure 77: Concept du modèle TAM	127
Figure 78: Topologie étoile	136
Figure 79: Topologie point à point.....	137
Figure 80: Cas d'utilisation du formateur	147
Figure 81: Cas d'utilisation de l'apprenant.....	147
Figure 82: Cas d'utilisation pour l'administrateur	148
Figure 83: Cas d'utilisation pour l'administrateur suite.....	148

Tableaux

Tableau 1: Définition des établissements avant la charte des PME 2002	7
Tableau 2: Critères de définition de PME	8
Tableau 3: Différentes définitions du niveau d'automatisation	26
Tableau 4: Symboles usuels en langage LD	42
Tableau 5: Comparaison entre différents protocoles	50
Tableau 6: Nombre des PME choisis dans les 3 secteurs	66
Tableau 7: Avantages et inconvénients du mode auto-administré	67
Tableau 8: Nombre d'équipes dans les PME par secteur	68
Tableau 9: Quantité de biens produits par secteur	68
Tableau 10: Temps de production d'un seul bien par secteur	69
Tableau 11: Dépendance de la production dans les PME	70
Tableau 12: Marché ciblé par les PME par secteur	73
Tableau 13: Débit en fonction de la fréquence et de la modulation de la couche physique ..	133
Tableau 14: Trame de la couche MAC	134

Liste des sigles

ADDIE : <i>Analyse Design Développement Implantation Évaluation</i>	MDI : <i>Mode de Diffusion de l'Information</i>
AFNOR : <i>Association Française de Normalisation</i>	MES : <i>Manufacturing Execution System</i>
API : <i>Automates Programmables Industriels</i>	NWK : <i>Network Layer</i>
APL : <i>Application Layer</i>	ONG : <i>Organisation Non Gouvernementale</i>
CAD / CAM : <i>Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing</i>	OSI <i>Open Systems Interconnection</i>
CE : <i>Commission Européenne</i>	PAN : <i>Personal Area Network</i>
CEDNU : <i>Commission de l'Environnement et du Développement des Nations Unies</i>	PC : <i>Partie Commande</i>
CIM : <i>Computer Integrated Manufacturing</i>	PEoU : <i>Perceived Ease of Use</i>
CNC : <i>Computer Numerical Control</i>	PHY : <i>Physique</i>
COP : <i>Conference of Parties</i>	PIB : <i>Produit Intérieur Brut</i>
CPS : <i>Cyber-Système Physique</i>	PME : <i>Petites et Moyennes Entreprises</i>
E/S : <i>Entrées/Sorties</i>	PMI : <i>Petites et Moyennes Industriels</i>
EEPROM : <i>Electrically EPROM</i>	PNEI : <i>Pacte National pour l'Emergence Industrielle</i>
E-learning : <i>Electronic learning</i>	PO : <i>Partie Opérative</i>
EPROM : <i>Erasable Programmable ROM</i>	PU : <i>Perceived Usefulness</i>
ERP <i>Enterprise Resource Planning</i>	RAM : <i>Random Access Memory</i>
FBD : <i>Functional Block Diagrams</i>	RAS : <i>Robotics and Autonomous Systems</i>
FFD : <i>Full Function Device r</i>	Read Only Memory : <i>Read Only Memory</i>
FHSS : <i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i>	RF : <i>Fréquence Radio</i>
FOGAM : <i>Fonds de Garantie de la Mise à niveau</i>	RFD : <i>Reduce Function Device</i>
FPGA : <i>Field-Programmable Gate Array</i>	RFID : <i>Radio Frequency Identification</i>
GFSK : <i>Gaussian frequency-shift keying</i>	RH : <i>ressources humaines</i>
GNU : <i>Licence Publique Générale</i>	RLC : <i>Reconfigurable Logic Controllers</i>
IEEE : <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>	RSE : <i>Responsabilité Sociales des Entreprises</i>
IHM : <i>Interface Homme Machine</i>	SAM : <i>Successive Approximation Model</i>
IL : <i>Instruction List</i>	SCADA : <i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>
ILT : <i>Instructor-Led Training</i>	SFC : <i>Sequential Function Charts</i>
IoT : <i>internet des objets</i>	ST : <i>Structured Text</i>
ISM : <i>industriel, scientifique, et médical</i>	TAM : <i>Technology Acceptance Model</i>
LD : <i>Ladder Diagrams</i>	TIC : <i>Technologie de l'Information et de la Communication</i>
LMD : <i>Licence, Master et Doctorat</i>	TOR : <i>Tout Ou Rien</i>
LMS : <i>Learning Managment System</i>	UICN : <i>Union Internationale pour la Conservation de la Nature</i>
MAC : <i>Medium Access Control</i>	VLE : <i>Virtual Learning Environment</i>
	Wi-Fi : <i>Wireless Fidelity</i>
	WLAN : <i>Wireless Local Area Network</i>
	ZDO : <i>Zigbee Device Object</i>

Introduction générale

Les Petites et Moyennes Entreprises PME marocaines sont considérées parmi les piliers de l'économie du pays voire la locomotive de son développement. Elles sont présentes dans tous les secteurs d'activité tel que le textile, l'automobile et l'agroalimentaire, elles subissent également, tant en interne qu'en externe, des transformations rapides et de profondes mutations sur le plan économique, environnemental et social. Les PME jouent un rôle très puissant sur tous les plans parce qu'elles représentent plus de 95% des entreprises du tissu économique. Outre que leurs contributions à la réduction du taux du chômage et la création des emplois, elles soutiennent aussi la création de richesse et la répartition des revenus grâce aux immenses opportunités qui se sont créées par leurs ouvertures sur les marchés internationaux.

Cette mondialisation a créé de terribles défis aux PME marocaines puisque ce marché, ainsi que le marché national, se caractérise par une clientèle très exigeante et un changement rapide et court dans la durée de vie des produits. La concurrence acharnée oblige les PME à fabriquer en masse des produits personnalisés, variés et moins chers pour qu'elles puissent garder leurs places parmi les entreprises compétitives sur le marché. Pourtant, le choix du développement par l'industrialisation génère des pressions de compétitivité et affecte l'ensemble de ces PME à cause de l'évolution des conditions de concurrence. Cette compétitivité plus intense pousse les PME à chercher en permanence de nouvelles solutions afin de s'adapter aux exigences du marché, de fidéliser leurs clientèles et de satisfaire les besoins de leurs salariés. Dans ce contexte, l'un des objectifs des industriels est d'acquérir des systèmes flexibles capables de s'adapter à une production variée dans le temps pour fabriquer de nouveaux produits avec une meilleure qualité tout en poursuivant le progrès technologique.

Les besoins des entreprises accroissent de plus en plus en termes de précision, de contrôle et de technicité, ce qui les conduit à intégrer une très forte automatisation dans tout le processus industriel. Les systèmes automatisés de production deviennent donc omniprésents et éléments essentiels dans toutes les PME. L'être humain trouve son soulagement au travail dès l'installation de ces systèmes parce que les tâches dangereuses, répétitives et précises ont été confiés à l'automatisation. Malgré ce soulagement, l'augmentation de ces systèmes automatisés de production dans toutes les industries devient donc très inquiétante pour la société parce que chaque machine substitue plusieurs salariés et ces derniers ne se sentent pas

stables dans leurs emplois surtout quand ils voient leurs collègues dans un état de licenciement abusif. En dépit de ça, les entreprises continuent à investir dans les systèmes de production, même si leurs coûts restent très élevés et leurs développements est en évolution permanente et en adéquation avec le concept du développement durable, étant donné que des accords, tel que COP21 et COP22 à Paris et Marrakech respectivement, ont été signés pour préserver l'environnement en réduisant la consommation électrique et en diminuant la pollution atmosphérique.

Si jusque-là les systèmes automatisés étaient considérés comme un moyen de diminution de la charge du travail et de la réduction du prix des produits. Actuellement une vision particulière se focalise essentiellement sur les possibles impacts négatifs générés par l'automatisation sur la stabilité des emplois dans les PME. La suppression de l'intervention humaine au strict minimum qui est la finalité principale de l'automatisation et le développement technologie rapide des systèmes automatisés, notamment avec l'avènement de la nouvelle révolution industrielle dite industrie 4.0, présentent, peut-être et pas forcément, les éléments cruciaux générant une telle crainte dans la société et en particulier chez les utilisateurs de ces systèmes sur les trois volets : économique, environnemental et social.

En effet, les systèmes automatisés de production deviennent, grâce à cette tendance, plus sophistiqués, rapides et multitâches, leurs demandes ne cessent de s'agrandir et la nouvelle révolution industrielle, qui se mature devant nos yeux, ce sont des paramètres qui vont stimuler les PME pour ne pas chercher les faibles qualifications. Cependant, elles vont exiger de personnels hautement qualifiés voire polyvalents qui ont des compétences et aptitudes nécessaires pour occuper un poste déterminant, se caractérisant par un niveau élevé de l'enseignement supérieur et/ou de la formation (e-learning ou continue), qui seront également capables de s'adapter aux nouvelles technologies de l'information et de la communication TIC et aux nouvelles méthodes de travail, en vue de maintenir un développement durable à l'échelle nationale et internationale.

Cette nécessité d'avoir de personnels hautement qualifiés impose aux PME de former leurs salariés, et leurs futurs salariés, sur leurs propres besoins. Auparavant, les PME ne se focalisaient que sur les équipements et les nouvelles technologies en négligeant totalement l'être humain et toute contribution au développement de ses compétences. Actuellement, les PME tiennent en compte les recommandations des recherches et des études réalisées dans le domaine de la gestion du capital humain. Elles mettent une importance particulière au facteur

humain et cherchent la satisfaction de leurs salariés et le développement de leurs compétences avec tous les outils disponibles.

En outre, émanant d'une formation Master spécialisé intitulé « ingénierie des systèmes automatisés industriels » durant laquelle nous avons pu acquérir les fondements des systèmes automatisés industriels, notre intérêt lié à ces systèmes s'agrandit d'un jour à l'autre et surtout quand nous avons effectué des stages en la matière dans les PME. Cet intérêt particulier, que nous avons toujours eu pour l'automatisation a été mélangé par un seul souci, en relation avec l'impact de l'automatisation sur la société, c'est celui que les systèmes automatisés industriels suppriment l'emploi au lieu d'en créer puisque l'intervention humaine est au strict minimum. En plus, la crise mondiale en 2008 a causé de graves conséquences sur l'emploi, c'est vrai que le système financier marocain n'est pas pâti d'elle mais ces partenaires européens fidèles en ont souffert et par conséquent l'économie marocaine a également souffert ce qui provoque une diminution massive dans les emplois et le licenciement a touché la plupart des intervenants dans le domaine industriel. L'automatisation a été considérée donc comme la cause principale, chez la plupart des personnes, de la diminution des emplois parce que les PME ont gardé que quelques salariés.

En fait, le survol de la littérature de recherche sur l'impact des systèmes automatisés industriels de production démontre que de rares auteurs internationaux qui ont traité cette problématique, par contre plusieurs ont contribué au développement de chaque partie de l'automatisation, et par conséquent une rareté voire aucune étude n'a traité le sujet dans le contexte marocain, d'où une autre motivation de plus pour le sujet de cette recherche. L'installation des systèmes automatisés a été faite au Maroc depuis plus d'une dizaine d'années, mais la recherche sur leurs impacts nous semble être encore un champ de recherche naissant.

En outre de nos propres motivations, franchement nous devons avouer que le sujet de notre thèse nous a été présenté sur « un plateau d'argent » parce qu'il rime avec nos motivations et notre formation de base. Il nous permettra de répondre dans un premier lieu d'une manière scientifique, sous plusieurs angles différents, à ces questions et hypothèses gravées à note esprit et celui des autres intéressés, et d'enlever cette ambiguïté concernant l'impact des systèmes automatisés de production lié avec le développement durable et plus particulièrement sur l'emploi. Comme il peut présenter une étude statistique, en relation avec le développement durable, à ceux et celles qui sont concernés par ce domaine.

Pour appréhender les liens entre les systèmes automatisés industriels et leurs impacts économiques, environnementaux et sociaux, ainsi que le mode d'acquisition des compétences nécessaires pour les utilisateurs des systèmes automatisés, nous avons scindé ce travail en quatre chapitres afin de traiter la problématique de cette thèse.

Le premier chapitre a pour objectif de synthétiser l'ensemble des définitions des PME afin de se mettre d'accord sur une définition qui va les caractériser tout au long de cette thèse. Nous allons également mettre le point sur l'utilisation des technologies d'informations et de communication dans les PME et aussi nous allons montrer la relation qui existe entre le concept du développement durable et les PME.

Les données collectées de l'étude concernant le secteur d'activité, la taille et l'existence des PME, ainsi que le genre et le grade professionnel de leurs salariés nous les avons présentées en amont afin de mieux appréhender les caractéristiques des PME participantes dans notre étude.

Dans le deuxième chapitre, nous allons détailler les systèmes automatisés industriels de production. Nous allons commencer dans un premier lieu à décrire l'histoire de l'apparition de l'automatisation en passant par la description de leurs différentes taxonomies et approches. Puis, nous allons mettre la lumière sur la partie commande, la partie opérative et la supervision de l'automatisation dont elles représentent le cœur de l'architecture d'un système automatisé. Ensuite, nous allons présenter la nouvelle version technologique des systèmes automatisés c'est-à-dire leurs modernisations grâce à la nouvelle révolution industrielle. Enfin, nous allons mentionner l'importance donnée à l'automatisation par les grands pays industriels du monde, nous allons présenter également la stratégie d'investissement dans les systèmes automatisés industriels de chaque pays.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude d'impact des systèmes automatisés industriels sur le plan économique, environnemental et social. Premièrement, nous allons expliquer pourquoi nous avons choisi dans notre étude le secteur textile, automobile et agroalimentaire et les trois villes (Fès, Tanger et Casablanca). Deuxièmement, nous allons analyser les résultats de l'étude dans les trois volets : économique, environnemental et social. En outre, nous allons discuter les résultats obtenus des trois volets en se basant sur la littérature scientifique afin de clarifier l'impact effectif des systèmes automatisés industriels sur ces volets. Cette discussion va nous permettre de choisir le type de contribution afin de minimiser les conséquences potentielles de l'automatisation.

Le quatrième chapitre sera décomposé sur deux parties, la première partie va traiter l'importance de l'acquisition de compétences chez les salariés et plus particulièrement chez les utilisateurs des systèmes automatisés qui seront demandés à compléter leurs compétences techniques par d'autres compétences non techniques. En outre, nous allons dévoiler les méthodes et les modes, classiques et modernes, d'acquisition de compétences afin de nous aider à choisir la meilleure technique pour se former et acquérir de nouvelles compétences en adéquation avec les besoins de personnels et leurs propres rythmes.

Dans la deuxième partie, nous allons proposer la conception d'une plateforme de formation type e-learning en montrant les droits de chaque utilisateur de la plateforme en tenant compte du modèle de l'ingénierie de formation le plus convenable à notre étude. Nous allons également modéliser la plateforme à l'aide du logiciel de modélisation UML, sa modélisation comporte que les deux diagrammes les plus importants dans l'UML qui sont le diagramme de classe et le diagramme de cas d'utilisation. A la fin de cette partie, nous allons mentionner le modèle d'acceptance de la technologie qui va expliquer l'acceptance ou le refus de chaque nouvelle technologie par les utilisateurs.

La conclusion de cette thèse abordera la contribution de la présente recherche et les grandes lignes traitées. Elle présentera également les différents prolongements souhaitables de ce travail.

CHAPITRE 1

Etat des lieux des PME marocaines et
leurs places dans la démarche du
développement durable et des
technologies de l'information et de la
communication

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter d'abord les différentes définitions proposées par les établissements qui ont essayé de définir les petites et moyennes entreprises dans le contexte marocain. Puis, nous dériverons le concept du développement durable (l'aspect économique, environnemental et social) et sa démarche (consultation des parties prenantes, vision, diagnostic, objectifs, plan d'action et rédaction du rapport). Ensuite, nous allons montrer le rôle des technologies de l'information et de la communication dans l'adoption de l'automatisation. Enfin, nous présenterons les caractéristiques des PME étudiées dans notre étude.

2. Définition des PME

Le rôle dynamique joué par les petites et moyennes entreprises PME dans les pays en développement, en tant qu'éléments moteurs nécessaires pour atteindre les objectifs de développement nationaux, tels que la croissance économique, la réduction de la pauvreté, l'emploi et la création de richesse permettant une répartition plus équitable des revenus et un accroissement de la productivité [1] est largement reconnu.

Les PME marocaines sont présentées dans tous les secteurs d'activités, 95% des PME du tissu économique embauchent la moitié des salariés avec 50% de la production et réalisent 31% des exportations [2].

Malgré cette énorme contribution dans l'économie nationale, la définition des PME était et reste variable et dépend de plusieurs critères tel que l'effectif, le chiffre d'affaire, le total du bilan et le programme d'investissement, cela varie selon le secteur d'activité et selon chaque pays.

Avant l'apparition de la charte nationale des PME en 2002, il n'existait pas de définition officielle de la PME. Pourtant, chaque établissement (Bank Al Maghrib, fonds de garantie de la mise à niveau FOGAM, Sous-commission PME/PMI et les banques) a proposé sa propre définition depuis 1987 (tableau 1).

Tableau 1: Définition des établissements avant la charte des PME 2002 [3]

Etablissement	Critères retenus
Bank Al Maghrib	Total du bilan :15millions Dh

	Programme d'investissement : 7 millions Dh
Programme de mise à niveau FOGAM	Total du bilan avant investissement : inférieur à 20 millions Dh Programme de mise à niveau dont le coût n'excède pas 10 millions Dh
Sous-commission PME/PMI	Nombre d'emplois : 200 personnes Chiffre d'affaire selon les phases de développement de l'entreprise : Création inférieure à 5 millions Dh Croissance : entre 5 et 20 millions Développement : entre 20 et 50 millions Dh Total bilan : 30 millions Dh Coût d'investissement/emploi : de 75 000 et 80 000 Dh
Banques	Chiffre d'affaire : 200 millions Dh

La définition adoptée dans la charte des PME s'applique à toutes les entreprises qui répondent à deux critères seulement (effectif et chiffre d'affaire ou total bilan) quel que soit son activité [4] (tableau 2). Les petites et moyennes industries PMI, dont elles ont été définies dans le programme d'investissement de 1983, sont incluses dans la charte élaborée en 2002 avec les PME.

Tableau 2: Critères de définition de PME

	Effectif permanent	Chiffres d'affaires ou total du bilan	
Petite et moyenne entreprise	200 personnes	75 millions DH	50 millions DH

3. PME et le développement durable dans l'ère des TIC

3.1. Concept du développement durable

Le concept du développement est toujours en évolution, plusieurs définitions et approches ont été adoptées sur cette notion qui est considérée dans le monde entier par la prise en compte des aspects économiques, environnementaux et sociaux d'une planète globalisée. La définition la plus proche, selon l'office québécois [5], signifie : *la transformation qualitative*

d'une unité économique accompagnant généralement la croissance et entraînant la possibilité pour une population de satisfaire ses besoins.

La notion du développement durable a été lancée pour la première fois par l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN). Puis, elle a été reformulée dans le rapport « *notre avenir à tous* » de Brundtland par la Commission de l'Environnement et du Développement des Nations Unies (CEDNU) : *le développement durable est un développement économique qui permet de satisfaire les besoins de la présente génération sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire les leurs* [6]. Cette dernière définition a mis en exergue deux points très importants :

- La priorité doit être donnée essentiellement aux plus démunis, et cela par la satisfaction de leurs besoins.
- La pénurie des ressources environnementales ne répond pas aux besoins des générations présentes voire futures.

La finalité du développement durable est d'assurer la pérennité du bénéfice pour les générations futures, tout en gardant de l'efficacité économique, de l'équité sociale et de la responsabilité environnementale (Figure 1). Ces trois piliers sont la base du développement durable, leurs interconnexions créent la durabilité tout en reposant sur l'équitable, le viable et le vivable.

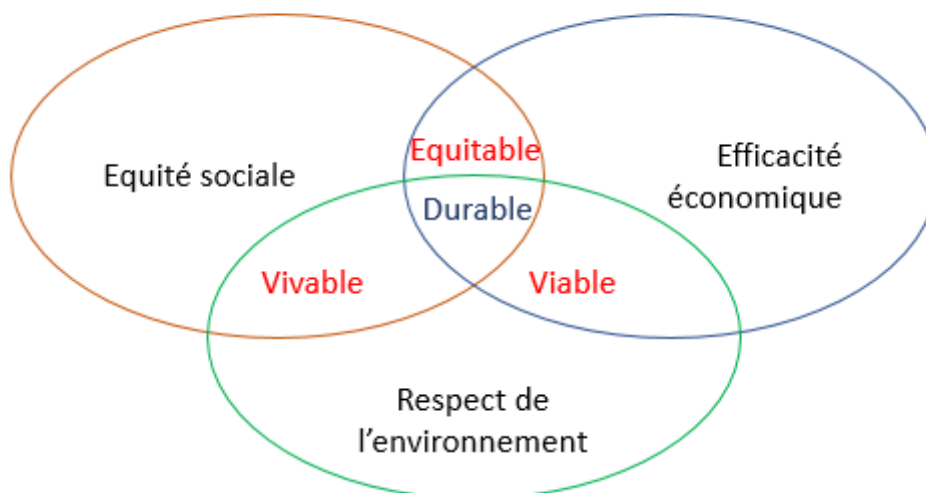


Figure 1: Les 3 piliers du développement durable

Les trois aspects du développement durable sont définis comme suit :

- Aspect environnemental : c'est de réduire le maximum possible les émissions de gaz et de toute autre substance à effet de serre qui affecte la couche d'ozone, de permettre une utilisation et une gestion modérée de l'énergie et de protéger la biodiversité etc.
- Aspect économique : ça reflète de l'efficacité des entreprises, l'adoption des bonnes pratiques, l'encouragement des relations commerciales, l'augmentation de l'esprit innovant dans les entreprises et le support de l'approvisionnement responsable etc.
- Aspect social : il commence par le maintien et l'amélioration des conditions de travail, puis par le transfert des connaissances et des compétences à l'ensemble des parties prenantes et enfin par une répartition adéquate des richesses.

3.2. PME et développement durable

Le rôle dynamique joué par les petites et moyennes entreprises dans les pays en développement est largement reconnu en tant qu'éléments moteurs nécessaires pour atteindre les objectifs nationaux de développement tels que la croissance économique, la réduction de la pauvreté, l'emploi et la création de richesse qui permettent une répartition plus équitable des revenus et un accroissement de la productivité [1]. De nombreux partenaires de développement cherchent à accélérer le rythme de la croissance dans le pays en engageant les entreprises, notamment les petites et moyennes entreprises PME marocaines, dans la démarche du développement durable. Cette démarche a pour objectif de :

- Se donner les moyens d'accroître sa performance globale : environnementale, sociale et économique.
- Limiter les risques.
- Répondre au mieux aux exigences de ses clients et donneurs d'ordre.
- Prendre en compte l'avis de l'ensemble des parties prenantes, à savoir les individus ou groupes qui ont des conséquences sur l'entreprise : clients, fournisseurs, salariés, actionnaires, collectivités locales, société civile, ONG, associations.

La mise en œuvre d'une démarche de développement durable dans les petites et moyennes entreprises est un processus complexe qui engage toutes les fonctions de l'entreprise. Une telle démarche s'effectue en plusieurs étapes, malgré que ces étapes interfèrent parfois,

chaque étape nécessite l'engagement réel des PME qui leur permettant de devenir plus durable.

La démarche développement durable repose sur six étapes essentielles [7] qui sont :

- Consultation des parties prenantes : un dialogue ouvert avec toutes les parties prenantes est considéré comme un pas crucial pour cette démarche. Dans le cas des PME, il s'agit d'un dialogue itératif entre les employés, les fournisseurs, les consommateurs afin de l'ancrer dans le processus. A chaque étape de cette démarche, les parties prenantes devraient être consultées.
- Vision : avant d'adopter une démarche de développement durable, les PME doivent concevoir une vision claire, basée sur des valeurs, leurs permettant de décrire précisément où elles vont se placer à long terme.
- Diagnostic : La réalisation d'un diagnostic dans les PME passe par l'évaluation de la situation actuelle de ces PME. En fonction de cette évaluation, les PME peuvent définir leurs priorités d'action et améliorer les actions déjà en place.
- Objectifs : il est possible de fixer des objectifs réalisables, quantifiables à partir des deux étapes précédentes et qui correspondent à la vision et aux valeurs de l'entreprise.
- Plan d'action : C'est à cette étape que les PME planifient les actions qu'elles commencent à exécuter dans leurs démarches. Les actions choisies doivent être en harmonie avec les objectifs précédemment déterminés. Pour chaque action, des indicateurs permettent de déterminer le degré d'avancement de celle-ci. Le plan d'action, qui doit également être prévu pour une période de temps précise, sert à établir des priorités et à organiser la vision du développement de l'entreprise.
- Rapport de développement durable : la rédaction d'un rapport de développement durable permet de se situer dans la progression de la démarche et d'évaluer le degré d'atteinte des objectifs en se basant sur les indicateurs de performance. Le rapport reste également un bon moyen pour les PME afin de communiquer la situation de leurs engagements au développement durable.

3.3. TIC dans l'industrie

Les Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) sont en plein progrès, leurs applications ont envahi notre vie quotidienne et l'environnement industriel, les TIC sont connues comme *l'ensemble des technologies issues de la convergence de l'informatique et des techniques évoluées du multimédia et des télécommunications, qui ont permis l'émergence de moyens de communication plus efficaces, en améliorant le traitement, la mise en mémoire, la diffusion et l'échange de l'information* [5]. Ces technologies ont été rapidement adoptées par les entreprises suite à la réponse de leurs besoins qui accroissent de plus en plus en termes de précision, de contrôle, de communication et de technicité.

Le secteur des TIC a connu dans cette dernière décennie une phase de croissance exceptionnelle qui l'a placé au centre de toutes les attentes en termes de productivité ou de création d'emplois. L'apport des TIC peut être résumé en quatre points essentiels :

- Compression de temps.
- Compression de l'espace.
- Compression de l'information stockée.
- Flexibilité d'usage.

Les TIC sont un moyen incontournable dans la diffusion simultanée de l'information, l'élaboration collective de plans d'action, la coordination de l'action, la mémorisation, la capitalisation des expériences, l'accès rapide et l'ouverture de nouveaux services à la clientèle.

Longtemps dominé par les industries artisanales ou manuelles et mécanisées, le secteur industriel, représente près de 28 % du PIB, s'est développé rapidement grâce aux TIC. Le Maroc s'est lancé depuis plusieurs années dans d'importants investissements pour développer et doter le pays d'infrastructures industrielles de bases, notamment par le lancement du Pacte National pour l'Emergence Industrielle (PNEI) qui visent les PME pour se focaliser sur l'amélioration de leurs productivités et leurs compétitivités.

Grâce à cette émergence industrielle, une tendance numérique est établie dont elle est caractérisée par une utilisation assez importante des TIC dans tous les secteurs d'activités et plus précisément dans la production. Les salariés utilisent abondamment les outils de gestion de l'information et les outils de communication, ces TIC sont davantage présentes dans les PME pour faciliter les activités des employés.

Les entreprises industrielles marocaines sont convaincues qu'elles n'ont pas de degré de liberté en matière de technologies, l'investissement dans les TIC est surtout une nécessité pour se soumettre aux exigences des clients et survivre face à la concurrence acharnée à moyen terme voire long terme, c'est pour cela que les PME font donc un recours vers les systèmes numérique d'automatisation pour bien surveiller l'enchaînement de la production et de garantir le bon fonctionnement sans défaillance.

La mise en place des TIC au sein d'une entreprise favorise l'automatisation du travail qui est une technique assurant le fonctionnement d'une machine ou d'un groupe de machines avec l'intervention humaine au strict minimum. En d'autres termes, l'automatisation vise à compléter l'être humain [8] en effectuant les tâches industrielles répétitives, dangereuse et qui nécessitent une précision dans le processus d'automatisation.

L'automatisation industrielle fait appel à des systèmes électroniques qui englobent toute la hiérarchie de contrôle-commande et les outils TIC depuis les capteurs de mesure, en passant par les automates, les bus de communication, la supervision, l'archivage jusqu'à la gestion de production et des ressources de l'entreprise. Elle réduit la charge de travail de l'employé tout en gardant une meilleure productivité et une excellente qualité. La modernisation des entreprises marocaines a pris le chemin depuis une dizaine d'années via l'introduction de nouveaux types de machines automatisées et d'outils informatiques et le mouvement va en s'accroissant.

4. Caractéristiques des entreprises étudiées

Nous allons présenter les caractéristiques des entreprises étudiées, dans notre étude, des trois secteurs industriels textile à Fès, l'agroalimentaire à Casablanca et l'automobile à Tanger (plus précisément dans la zone franche de Tanger). Le détail des résultats de notre étude sera présenté dans le chapitre 3.

4.1. Secteur d'activité

Sur un total de 450 des petites et moyennes entreprises, notre questionnaire a été rempli dans sa totalité par 54 entreprises soit 12% des entreprises ciblées. Sur ce point, nos réponses peuvent donc être jugées représentatives de la population étudiée. La répartition des entreprises répondantes par secteur est dans la figure 2.

La majorité des PME répondante à notre questionnaire est issue du secteur textile par un taux de 48% (soit 26 PME) ce qui présente à peu près la moitié des réponses. L'autre moitié

est divisée entre le secteur agroalimentaire, le pourcentage des PME qui ont voulu donner attention à cette étude dans ce secteur est 22% (soit 12 PME), et celui de l'automobile représente 30% de PME ce qui signifie que 16 entreprises ont répondu à cette étude.

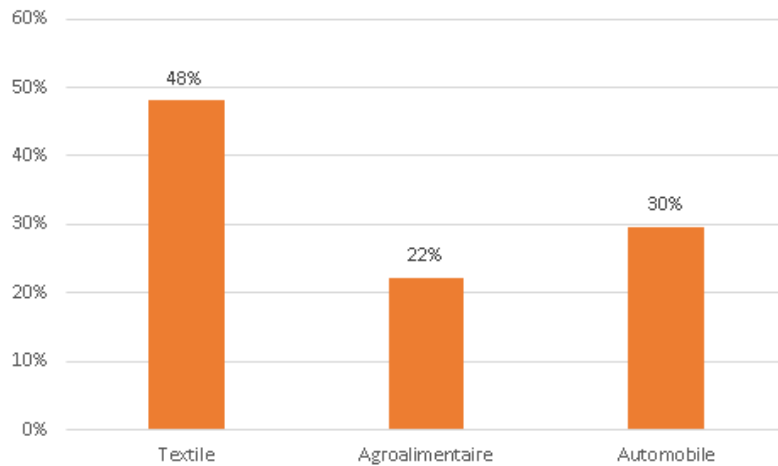


Figure 2: Répartition des PME par secteur

4.2. Nombre de salarié

Les entreprises qui ont participées à cette étude sont des PME puisque l'effectif de leurs personnels est moins de 200 salariés selon la définition marocaine. Celles qui ont plus de 100 et moins de 200 salariés représente 41% (soit 22 PME) des entreprises enquêtées. Les entreprises qui ont plus de 50 et moins de 100 personnes sont 25 PME ce qui représente 46% des entreprises (figure 3). Par contre les entreprises dont leurs effectifs est moins de 50 sont que 7 PME avec un pourcentage de 13%.

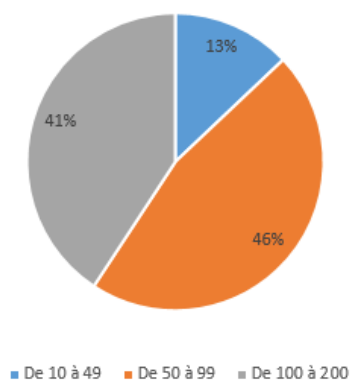


Figure 3: Taille de l'entreprise

4.3. Genre et grade professionnel dans les PME

4.3.1. Genre dans les PME

4.3.1.1. Genre dans le secteur textile

L'approche genre est présente essentiellement dans la sociologie, mais nous empruntons ce concept pour décrire la différence en effectif dans les PME entre femmes, hommes et dans les trois grades professionnels : ingénieurs, techniciens et opérateurs.

Le taux de présence des ingénieurs femmes dans le secteur textile est 27% par rapport aux hommes qui représente 73% ingénieurs (figure 4). Les techniciennes du même secteur sont 32% femmes en comparaison par leurs collègues hommes qui sont 68%. En ce qui concerne les opératrices du textile, elles sont 65% salariées par contre le pourcentage des opérateurs est 35% des hommes.

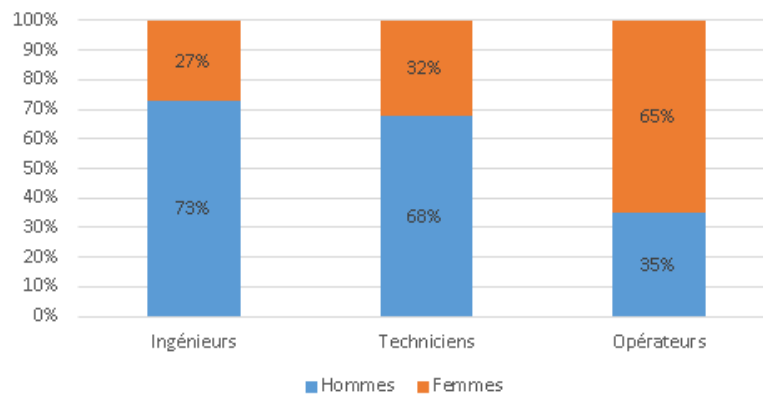


Figure 4: Répartition des ingénieurs, techniciens et opérateurs par genre dans le secteur textile

4.3.1.2. Genre dans le secteur agroalimentaire

A propos du secteur agroalimentaire, l'existence des opératrices est à peu près dominante par un pourcentage de 53% par rapport aux hommes avec un taux de 47% d'opérateurs (figure 5). Les techniciennes de ce secteur sont un peu minoritaires avec 39% en leurs comparant à leurs collègues techniciens avec 61%. Pour ce qui concerne les ingénieurs de l'agroalimentaire, le pourcentage des hommes est 58% ingénieurs à l'égard de 42% femmes du même grade professionnel.

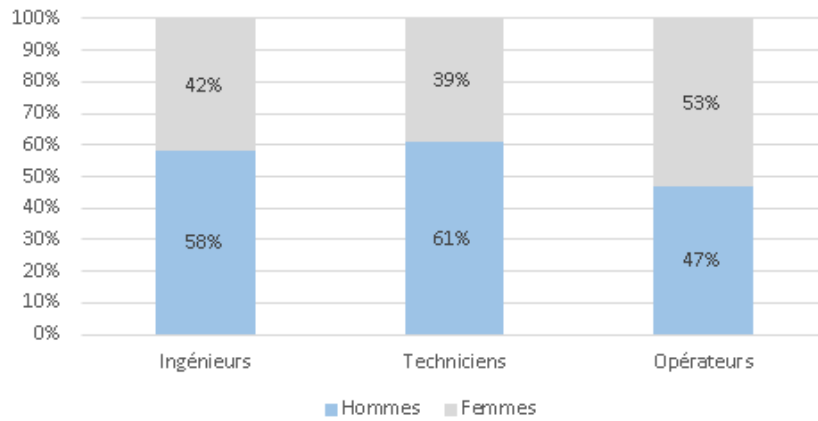


Figure 5: Répartition des ingénieurs, techniciens et opérateurs par genre dans le secteur agroalimentaire

4.3.1.3. Genre dans le secteur automobile

L'analyse statistique a montré que le secteur automobile est presque dominé par les hommes dans les trois grades avec une proportion grosso modo semblable, par ce que le pourcentage des ingénieurs, techniciens et opérateurs est 61%, 63% et 62% respectivement (figure 6). Par contre l'existence féminine dans l'automobile est assez modeste par rapport aux hommes avec un pourcentage des ingénieures, techniciennes et opératrices est de 39%, 37% et 38% respectivement.

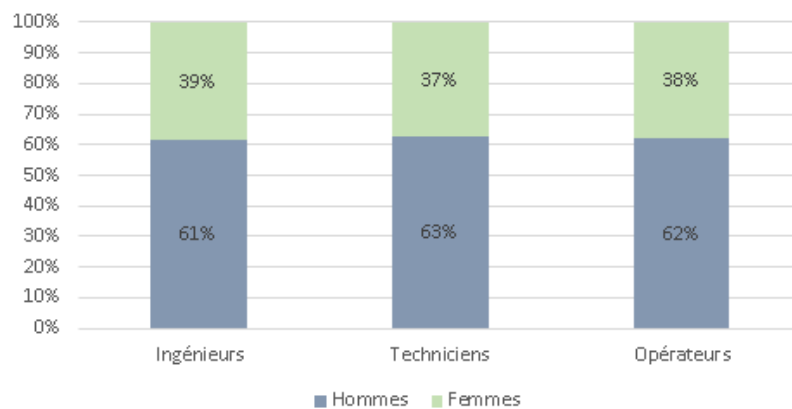


Figure 6: Répartition des ingénieurs, techniciens et opérateurs par genre dans le secteur automobile

4.3.1.4. Genre dans les trois secteurs

Globalement, la répartition totale entre les hommes et les femmes (figure 7) dans les trois secteurs industriels n'est pas égale c'est-à-dire que la présence des hommes (55%) dans le milieu industriel est assez remarquable, par contre la présence des femmes est modeste (45%). Mais de toute façon, on peut dire que l'équité est présente dans les trois secteurs en termes de genre.

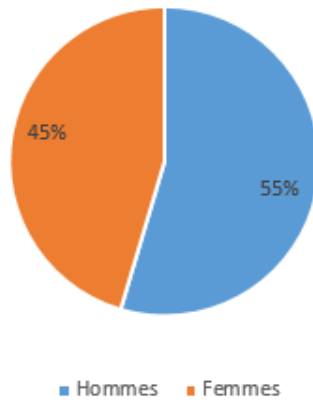


Figure 7: Répartition des femmes et des hommes dans les trois secteurs

4.3.2. Grade professionnel dans les trois secteurs

Les chiffres de notre étude montrent également que l'égalité entre les femmes et les hommes est plus claire selon le grade professionnel notamment pour les opérateurs et opératrices qui représente 50% chacun (figure 8). Pourtant, la dominance dans les autres grades est en faveur des hommes par 64% ingénieurs et techniciens, contre 36% femmes ingénieurs et techniciennes.

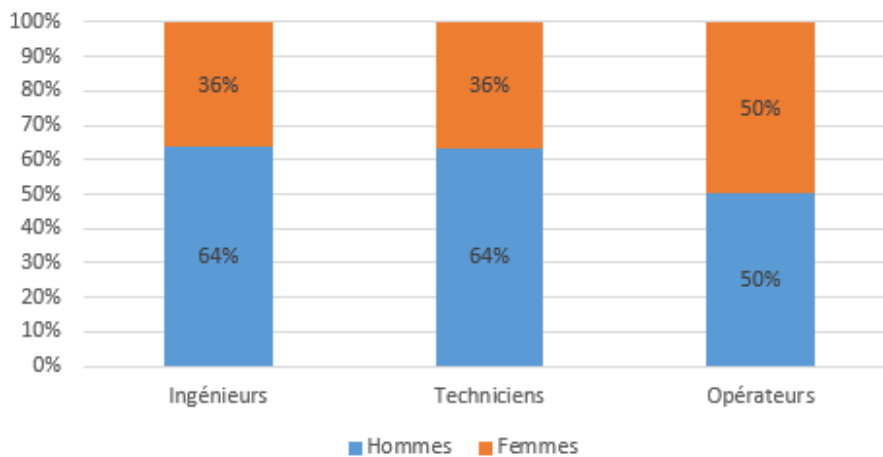


Figure 8: Répartition totale des femmes et hommes par grade professionnel

4.4. Tranche d'âge

L'analyse des données a montré que la tranche d'âge la plus élevée des ingénieurs et des opérateurs de notre échantillon est de 45 à 54 ans (avec 26 réponses des PME), par contre les techniciens de la tranche d'âge comprise entre 25 à 44 ans sont les plus élevés (figure 9).

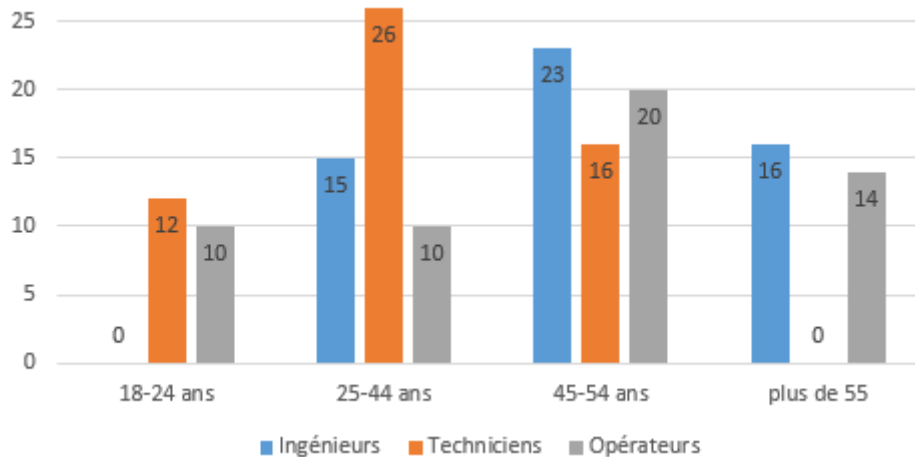


Figure 9: Tranche d'âge des ingénieurs, techniciens et opérateurs des trois secteurs

4.5. Durée de création des PME

Quant à la durée de création des PME (figure 10), à peu près de la moitié des PME répondantes ont été créées plus de 10 ans ce qui représente 26 PME soit 48%. Une petite proportion 13% des PME qui ont déclaré leurs existences entre 4 et 6 ans soit 7 PME. Les 21 PME restantes ont été démarrées leurs activités entre 7 et 10 ans soit 39% des PME enquêtées.

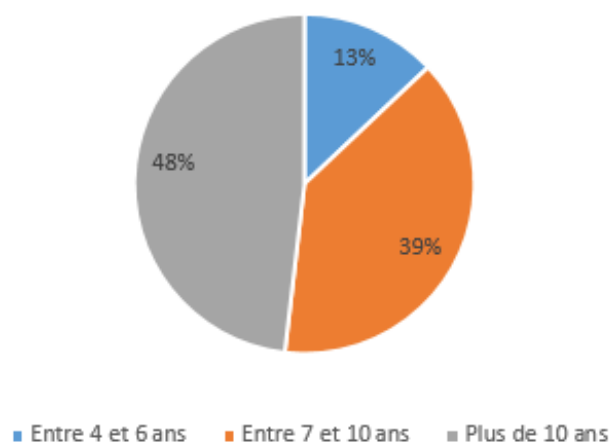


Figure 10: Existence des PME

5. Conclusion

Après avoir présenté les définitions de chaque établissement marocain et ses critères, nous avons adopté la définition de la charte des PME qui se repose sur deux critères seulement (l'effectif permanent et le chiffre d'affaire ou le total bilan) pour choisir les PME à questionner. Nous avons mis en exergue l'intérêt du développement durable et sa démarche pour les entreprises qui leur permettent de reposer sur l'équitable, le vivable et le viable pour créer la durabilité. Avant de présenter les caractéristiques (genre, grade professionnel, l'âge

des salariés et la durée de création des PME) et les secteurs d'activité (textile, agroalimentaire et automobile) des PME étudiées, nous avons présenté la contribution des technologies de l'information et de la communication dans l'adoption des machines sophistiquées issues de ces technologies permettant la production en masse des produits personnalisés, variables et moins cher avec une meilleure qualité.

Chapitre 2

De l'approche classique des systèmes automatisés industriels à la demande de nouveaux systèmes de production modernes

1. Introduction

La production industrielle de masse est de plus en plus importante, il est nécessaire de produire rapidement des petites et moyennes séries de produits avec une meilleure qualité afin de s'adapter aux exigences du marché. Dans ce contexte, l'un des objectifs des industriels est d'avoir des systèmes capables de s'adapter à des fabrications variant dans le temps, par l'introduction de nouveaux produits, en répondant à leurs besoins en termes de précision, de contrôle, de qualité et peu cher.

Dans un monde caractérisé par une concurrence industrielle acharnée, la satisfaction des clients est très difficile parce qu'ils veulent des produits personnalisables avec de très bonne qualité et moins chers, les entreprises investissent massivement dans l'automatisation des chaînes de production industrielle. Les systèmes automatisés de production deviennent omniprésents et éléments essentiels dans toutes entreprises, l'être humain trouve son soulagement au travail parce que ces systèmes automatisés exécutent des tâches dangereuses, répétitives et précises.

Dans ce chapitre, nous allons mettre l'accent sur le développement des méthodes de travail à partir de la première révolution industrielle qui est la mécanisation jusqu'à l'automatisation, en définissant les systèmes de production automatisés industriels et leurs niveaux. D'une part, nous allons présenter les différentes taxonomies de l'automatisation (fixe, programmable et flexible), d'autre part nous exposerons l'approche du système automatisé en passant par la pyramide de l'automatisation et les étapes de l'exécution d'automatisation (acquisition des données, analyse des données et le contrôle de l'exécution). En outre, nous allons décrire les parties (commande, opérative et supervision) du système automatisé qui lui est composé. Nous verrons également l'évolution de la révolution industrielle « l'industrie 4.0 », ce que signifie la numérisation totale de la production industrielle. Dans la dernière section, nous allons présenter les différents pays du monde entier qui ont des intentions à se doter de cette nouvelle révolution industrielle.

2. De la mécanisation à l'automatisation

2.1. Historique

La première révolution industrielle repose sur le charbon, la métallurgie et le textile, donc la production mécanique avec les machines à vapeur avec James Watt. Elle démarrait en Grande-Bretagne à la fin du 18^{ème} siècle, puis elle se propageait en France au début du 19^{ème}

siècle avant d'occuper une place importante en Allemagne, aux États-Unis, au Japon et à la Russie. Elle se caractérisait par le développement considérable dans les techniques et les méthodes de production des biens matériels.

La deuxième révolution a été démarrée à la fin du 19^{ème} siècle et trouve ses fondements dans l'électricité, la mécanique, le pétrole et la chimie. C'est la production de masse avec l'arrivée de l'électricité, cette révolution permettait la production à grande échelle des séries de produits. La demande du marché en biens manufacturés était très élevée parce que tout ce qui était produit ne suffisait pas les consommateurs.

Au fur et à mesure de l'apparition de l'électronique, durant la première moitié du 20^{ème} siècle [9], l'évolution des systèmes de production a connu une grande ampleur au cours du dernier siècle, c'est la production automatisée avec les Automates Programmables Industriels API. La production manufacturière avait augmenté sa capacité grâce à la production de matériels miniaturisés à l'aide de robots et d'automatisation. La production devient de plus en plus meilleure et le développement des technologies est sans cesse.

Elle partait des États-Unis, puis du Japon et de l'Union Européenne, la troisième révolution industrielle a vu naître également internet, au crépuscule du 20^{ème} siècle. Le processus de production nécessite un enchaînement d'opérations précises et répétitives, donc c'est le rôle principal de l'automatisation qui devient plus tard un vaste domaine de recherche [10] comportant différents champs d'application.

Le terme automatisation fait allusion au chômage technique pour les salariés [11] (figure 11), par contre les chefs d'entreprises pensent à une productivité de masse et un abaissement des prix.

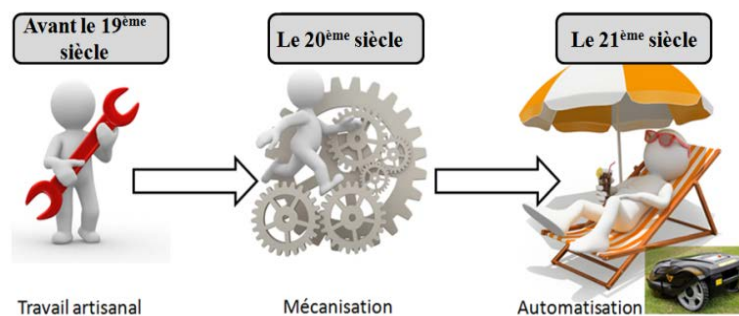


Figure 11 : Evolution des méthodes de travail

2.2. Système automatisé de production

Un système est un ensemble d'éléments en interaction [12] organisé dans un environnement avec lequel il interagit pour réaliser une fonction qui lui est attribuée. Un

système de production est un ensemble de moyens humains et matériels qui interagissent sur des produits manufacturés ou non, dans le but de leur apporter et augmenter une valeur ajoutée c'est-à-dire de passer d'un état initial à un état final en lui transformant selon certaines critères [13]. En réduisant l'intervention humaine, c'est-à-dire très autonome, le système de production devient un système automatisé de production [14] qui permet de remplir, de manière automatique, des fonctions répondant à certains besoins spécifiques précédemment assurées par l'homme.

Pour notre part, nous n'allons pas distinguer entre les deux termes suivants : système de production et système automatisé industriel. La définition des systèmes automatisés de production est presque semblable à la définition des systèmes de production dans la norme NFXS0-400 [13]. Il est connu comme un ensemble d'éléments matériels et/ou logiciels en interaction dynamique, organisé en fonction d'une finalité : conférer une valeur ajoutée à des flux de produits, conformément à des objectifs de production, d'exploitation et de sécurité.

L'automatisation est une notion polysémique qui a donné lieu à une diversité de définitions et de connotation, la littérature scientifique abonde de définitions relatives au mot automatisation et ses dérivés.

La première définition de l'automatisation, après la première utilisation du mot dans l'entreprise Ford Motor Company, a été donnée par John Diebold « *C'est l'art d'employer des dispositifs mécaniques pour manipuler les pièces en travail, les placer dans les machines, les en retirer, leur imprimer, après une opération, un mouvement de rotation, et les mettre en position pour l'opération suivante, enlever les déchets, exécuter toutes les opérations à une cadence correspondant à celle du fonctionnement des installations, de façon que l'on puisse commander la chaîne dans sa totalité ou en partie au moyen de boutons placés en des points appropriés.* »[11].

L'automatisation a été lié avec le concept de feedback dans l'art de la commande automatique par Gordon Brown du Massachusetts Institute of Technology [15]. Il voit que l'automatisation est l'utilisation de cet art pour augmenter la production, améliorer la qualité et réduire la quantité de muscle humain nécessaire dans la fabrication.

Le degré d'automatisation traduit la capacité du système à gérer seul le plus grand nombre de situations et/ou à décider de façon optimale du comportement à adopter dans ces situations. Il peut y avoir plusieurs degrés d'automatisation [16] suivant l'application envisagée : par exemple, un système peut être complètement automatique, semi-automatique (certains modes

de fonctionnement sont automatisés), supervision (intervention de l'homme à distance) ou manuel avec intervention directe de l'homme. La pertinence du degré d'automatisation dépend du cahier des charges de l'application.

Un système d'automatisation est composé d'un ensemble d'équipements [17] qui sont organisés dans l'objectif d'accomplir un ensemble de missions au sein d'un processus industriel conformément à des objectifs économiques et techniques afin d'accroître l'efficacité et à réduire la variabilité [18]. Ces équipements sont de différents types, ils peuvent être :

- Des capteurs (inductifs, capacitifs, de proximité, etc...) traduisant l'état du processus industriel et des équipements
- Des actionneurs (moteur asynchrone, vérin, etc...) agissant sur le processus industriel
- Des unités de traitement (des régulateurs, des automates, des calculateurs, etc...) élaborant les commandes à destination des actionneurs, à partir des informations générées par les capteurs
- Des moyens de communication (interface homme-machine) reliant les différents composant du système d'automatisation.

Avec l'évolution des technologies, le système automatisé n'a pas pu avoir une seule définition [19]. Il y avait plusieurs recherches dans ce domaine pour le définir et le caractériser. D'après Staroswiecki [20] le système d'automatisation a pour but de contrôler les transformations réalisées par le processus physique. Le contrôle est effectué à l'aide des capteurs et actionneurs au niveau de terrain.

Le concept adopté par Verlinde [21] pour les systèmes automatisés est fondé sur les fonctions du système qui sont : conduire, maintenir, suivre, sécuriser. Cependant, Bayart [22] ne tient pas en compte les opérateurs dans son modèle, le système d'automatisation, dans cette approche, a été considéré comme une interface entre le processus physique et les opérateurs. Pour Cauffriez [23], le système automatisé prend les principes d'un système physique que ce soit interne ou externe. En outre, le dictionnaire en ligne Larousse définit l'automatisation comme : « *Suppression totale ou partielle de l'intervention humaine dans l'exécution de tâches diverses, industrielles, agricoles, domestiques, administratives ou scientifiques* ».

Malgré ces définitions qui caractérisent les systèmes automatisés, une autre définition plus adaptée au contexte industriel est celle de Chiron [9] qui le définit comme suit : *un système automatisé de production est constitué d'une Partie Commande et d'une Partie Opérative. La partie commande contient la logique de fonctionnement du processus que l'on veut automatiser, elle envoie des ordres à la partie opérative qui les exécute à l'aide d'actionneurs*

et qui lui renvoie des informations à partir de capteurs. La partie commande gère également le dialogue avec l'opérateur par l'intermédiaire le plus souvent d'une Supervision.

D'après ces différentes définitions, le système automatisé recouvre les trois grands secteurs suivants [24]:

- L'intégration dans une chaîne de production continue, c'est-à-dire que le produit parcourt la chaîne de production sans être touché par l'être humain depuis le début du processus jusqu'à la fabrication.
- Les dispositifs de rétroaction ou de régulation automatique (feedbacks ou closed loops), permettant l'ajustement, sans l'intervention de l'être humain, d'une grandeur physique à un résultat donné appelé consigne.
- Les calculateurs numériques qui sont capables de collecter un très grand nombre d'informations, puis, sur la base de celles-ci, de faire des opérations variées du plus simple jusqu'aux plus complexes

L'objectif principal derrière l'introduction de l'automatisation dans l'industrie a été l'amélioration des performances du système, la résilience du système, l'optimisation de l'utilisation de l'énergie, l'amélioration des rendements et la sélectivité, et en plus la facilité des tâches de l'opérateur [25]. L'automatisation présente les principaux avantages suivants :

- Elle permet de gérer de manière efficace la production,
- Elle permet la création d'un suivi performant,
- Elle induit potentiellement une meilleure productivité et une meilleure flexibilité.

2.3. Niveau d'automatisation

Le fait de passer du travail manuel à l'utilisation des outils a été considéré comme une sorte d'automatisation [26]. Les systèmes d'automatisation ont été développés au fur et à mesure de l'apparition de l'électronique et l'utilisation d'ordinateurs dans les entreprises manufacturières.

Les niveaux d'automatisation ont été présentés par plusieurs travaux, chaque travail définit un nombre de niveaux pour l'automatisation ([27], [26], [28], [29], [30] et [31]). Ils sont classés entre trois et douze niveaux d'automatisation en commençant par le travail manuel jusqu'à l'automatisation complète ou bien l'autonomie du système. Pourtant les niveaux de la décision d'automatisation [32] sont classés sur une échelle de 10, c'est-à-dire que dans le niveau le plus bas les machines présentent les données nécessaires aux opérateurs et ne

prennent aucune décision, par contre dans le niveau le plus haut les machines ignorent l'être humain. Elles décident et agissent toutes seules sans l'intervention de l'homme.

Dans le travail de [26], le niveau d'automatisation est subdivisé selon les tâches effectuées en deux parties : la mécanisation et l'informatisation. Toutes tâches effectuées cognitivement et celles faites avec une force a été considéré respectivement comme informatisation et mécanisation.

Malgré cette recherche abondante et taxonomie des niveaux d'automatisation, la définition exacte de ce concept reste encore variable. Les recherches précédentes ont essayé la proposition de différentes définitions, mais la définition adaptée et cohérente des niveaux d'automatisation n'est pas encore fixée. Dans le tableau 3 en dessous, nous avons regroupé l'ensemble de définitions trouvées dans la littérature.

Tableau 3: Différentes définitions du niveau d'automatisation

- *La mesure dans laquelle l'énergie humaine et le contrôle du processus de production sont remplacés par des machines.*
- *Le niveau d'automatisation intègre la question de la rétroaction, ainsi que des fonctions de partage relatif en dix étapes.*
- *Degré de mécanisation est défini comme le niveau technique dans cinq différentes dimensions ou fonctions de travail.*
- *Le niveau d'automatisation est le contrôle manuel direct autonome où le rôle humain est minime.*
- *Le niveau d'automatisation dans le cadre de systèmes experts est la plus appropriée pour les tâches cognitives, telles que la capacité d'intervenir et de prendre des décisions basées sur les informations du système*
- *Le niveau d'automatisation est défini comme le partage entre l'humain et les machines avec différents degrés d'intervention humaine.*
- *Niveau d'automatisation est un continuum de manuel à des opérations entièrement automatiques.*
- *Le niveau d'automatisation peut être défini comme un montant de la dotation axée autour des machines, qui peut être manuelle, semi-automatique, ou complètement automatisée. [26]*

La relation entre l'humain et la technologie, en termes de répartition des tâches et des

fonctions, ce qui peut être exprimé comme un indice entre 1 (total de travail manuel) et 9 (total) d'automatisation de tâches cognitives, physiques. [33]
Le niveau d'automatisation peut être défini comme la mesure dans laquelle l'automatisation peut être utilisée dans un processus de production pour remplacer le travail humain par des machines. [28]
Niveau d'automatisation fait référence au niveau de la planification opérationnelle et le rendement de l'interaction entre un opérateur humain et l'ordinateur à contrôler un système complexe. [34]
Les niveaux d'automatisation indiquent le degré auquel l'opérateur humain ou l'automatisation a le contrôle ou d'autorisation sur des tâches spécifiques. [35]
Les niveaux d'automatisation peuvent augmenter ou réduire la conscience de la situation selon l'implication des opérateurs. [36]

Après toutes ces années de définitions à base de recherche consolide une définition exhaustive concernant le niveau d'automatisation n'est pas encore établie. Toutes ces définitions sont vraies bien sûr mais la liste pourrait s'allonger encore et encore, notamment si nous voulons définir le niveau d'automatisation dans l'entreprise parce que toutes ces définitions traitent que le niveau système.

2.4. Types de systèmes automatisés

Les premiers systèmes automatisés qui ont été installés dans les entreprises étaient les machines en logique câblée, et avec le progrès technologique les entreprises se dotaient de nouvelles machines basées sur la logique programmée [16].

2.4.1. Système en logique câblée

La logique câblée est basée essentiellement sur les relais (figure 12) et les portes logiques interconnectées judicieusement. Les petites et moyennes entreprises recouraient à cette solution pour effectuer des interventions lorsque le système d'automatisation est peu complexe au niveau de son contrôle commande et ne nécessitait pas de modifications régulières. La logique câblée est moins coûteuse et présente un avantage en termes de rapidité, mais elle demande plus d'entretien.

La complexité des machines en logique câblée s'évolue au fur et à mesure du besoin quotidien des entreprises, et à chaque modification il faut recâbler tous sans faute [37]. Cela implique la perte dans la productivité et augmente le temps de la maintenance en cas de panne, donc cette solution n'était plus fiable pour les entreprises qui produisent de grandes séries de produits.



Figure 12 : Armoire à relais

2.4.2. Système en logique programmée

Le cœur de la logique programmée est les Automates Programmables Industriels API (figure 13), ils permettaient de se débarrasser du câblage trop complexe et par conséquent d'importance économie de coût d'installation [38].



Figure 13: Armoire à base d'API

Dans la logique programmée, un programme spécifique implémenté dans l'automate exécute un cycle de fonctionnement attendu à l'aide de plusieurs modules d'entrées et de sorties compactées dans l'automate ou bien placées sur le rack de l'automate. Les API sont

basés sur la logique numérique comparés au relais, donc lors des modifications ou changement du produit, des petites lignes de code suffisent pour les effectuer.

3. Taxonomies de l'automatisation

Les systèmes automatisés sont présents dans les entreprises en plusieurs types, ils sont classés selon la cadence et la variété de production en trois grandes parties automatisation fixe, programmable et flexible [39].

3.1. Automatisation fixe

L'automatisation fixe est construite avec un but spécifique de production, elle est dédiée aux besoins d'un produit planifié [40]. Elle fait référence à un système qui exécute une tâche fixe de nature répétitive [41] dans un processus de production ou d'assemblage, dont elle est définie à l'avance par la configuration fixe de l'équipement (les machines CNC classiques sont des exemples de l'automatisation fixe). D'une façon générale, chaque tâche est simple, elle peut être un mouvement linéaire ou de rotation simple et parfois une combinaison des opérations simple. Elle fabrique le même produit avec peu de modifications ou changement, donc elle est difficile de s'adapter aux changements liés aux produits.

L'automatisation fixe présente les avantages suivants :

- Elle représente généralement l'option la moins chère.
- Elle a été conçue et personnalisée pour une tâche spécifique à accomplir.
- Elle fonctionne généralement à des vitesses très élevées.
- Elle peut surpasser la production humaine.

Pourtant, elle a aussi des inconvénients qu'il faut tenir compte tel que :

- Investissement initial élevé d'équipements puisque conçus sur mesure.
- Assez rigide pour tenir compte des changements de produits.
- Elle n'est pas conçue pour répondre à une variété de tâches ou de configurations.
- La modification de l'automatisation peut coûter cher et prendre du temps.

L'investissement massive dans l'automatisation fixe a été justifié par les entreprises par la très forte demande des produits avec un bas prix. Le coût initial élevé de l'automatisation peut être répartie sur un très grand nombre d'unités (figure 14), ce qui rend le coût unitaire attrayant par rapport à d'autres méthodes de production.

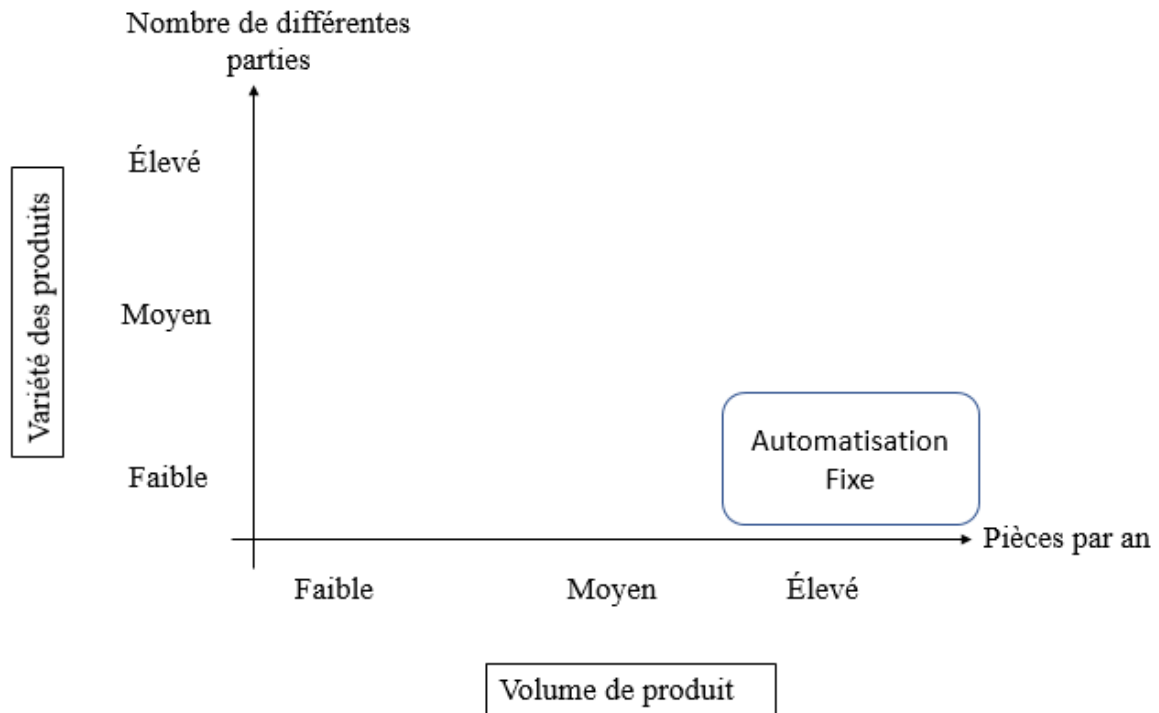


Figure 14: Automatisation fixe selon la variété et la quantité des produits

3.2. Automatisation programmable

Dans l'automatisation programmable, l'équipement de production est conçu avec la capacité de changer la séquence des opérations afin de s'adapter à différentes configurations de produits [42]. Elle peut être utilisée pour produire une variété de pièces (figure 15) avec pratiquement pas de temps perdu pour des remplacements. Son fonctionnement est contrôlé par un programme dont il est constitué d'un ensemble d'instructions codées de manière à ce que le système peut les lire et les interpréter.

Pour produire chaque nouveau lot d'un produit différent, le système doit être reprogrammé à l'ensemble des instructions qui correspondent au nouveau produit. La configuration de l'équipement d'un changement de produit peut être aussi simple que l'exécution d'un programme d'entrée différents ou il peut également inclure quelques ajustements mécaniques pour l'équipement.

Certaines des fonctionnalités qui caractérisent l'automatisation programmable sont les suivantes [39]:

- Investissements élevés dans l'équipement à usage général.
- Faibles taux de production par rapport à l'automatisation fixe.
- Flexibilité pour traiter les changements dans la configuration du produit.

- Et le plus approprié pour la production de lots.

La flexibilité ajoutée à l'automatisation fait que le premier coût de cet équipement soit supérieur à l'automatisation et qu'elle fonctionne généralement à des vitesses plus faibles.

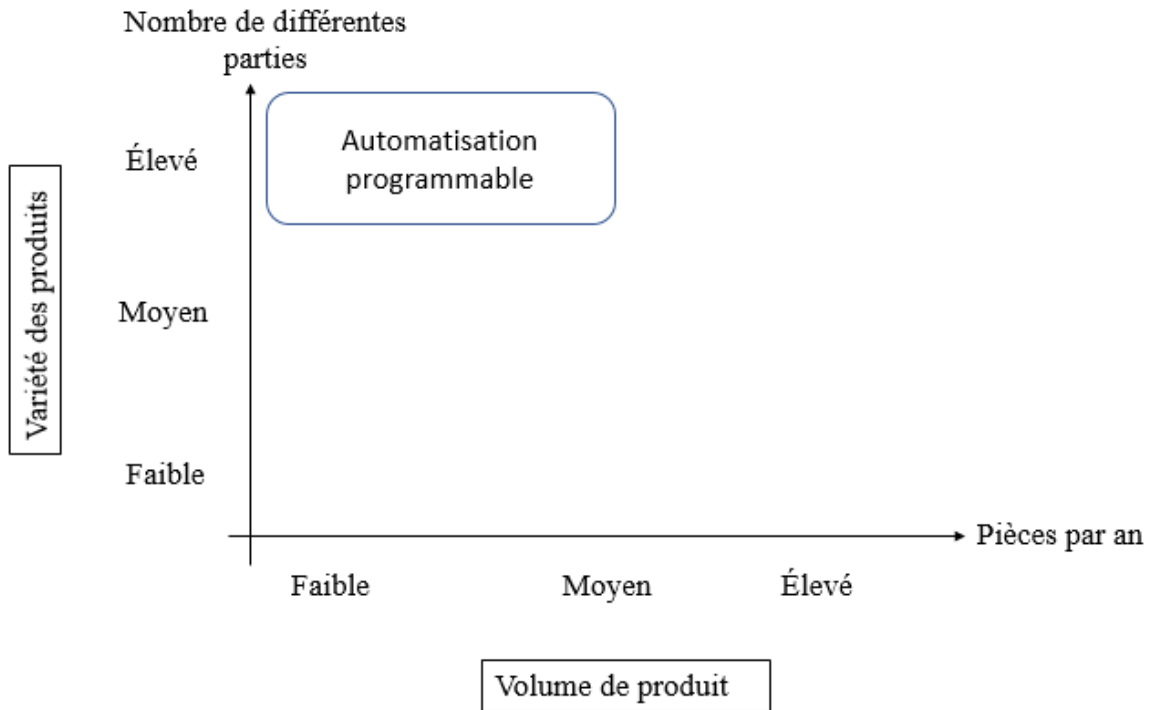


Figure 15: Automatisation programmable selon la variété et la quantité des produits

3.3. Automatisation flexible

Cette automatisation est entièrement automatisée, elle a été introduite dans les entreprises dans les années 70 pour répondre aux besoins élevés du marché [43]. À partir de la planification et de la conception du processus à l'envoi de produits, l'ensemble du système est complètement intégré pour être automatisé. Comme son nom l'indique, l'automatisation flexible est un robot ou équipement qui a été conçu pour changer facilement la chaîne de production pour une variété de combinaisons de produits ou de nouveaux produits.

Cette automatisation combine des machines à commande numérique, des robots industriels, une série de capteurs et d'autres équipements d'automatisation en un seul système intégré, c'est-à-dire l'exécution de plusieurs opérations simultanément [40]. Généralement, le bras robotique est capable de faire cinq ou six mouvements des axes avec têtes interchangeables qui peuvent effectuer une variété de tâches. En raison de la souplesse dans les mouvements possible, la possibilité de reprogrammer la fonction de l'équipement d'automatisation flexible rapidement est bien adapté à la production de mélange de produits.

La variété des pièces qui peuvent être fabriquées sur un système de production automatisé flexible est habituellement plus limitée (figure 16) qu'un système contrôlé par une automatisation programmable.

Bien entendu, toute cette flexibilité est livrée avec un prix. Il est beaucoup plus coûteux que les autres solutions d'automatisation et fonctionne à une production plus faible taux. L'investissement en automatisation flexible reste un meilleur choix à long terme pour les entreprises.

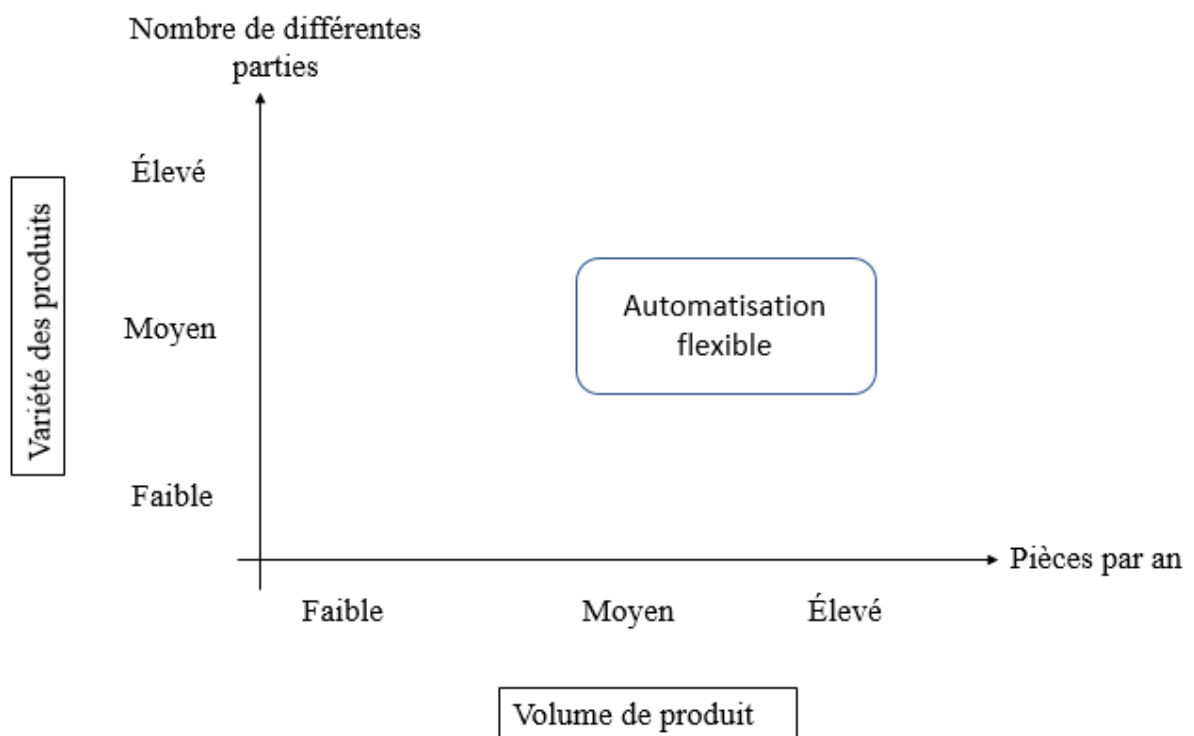


Figure 16: Automatisation programmable selon la variété et la quantité des produits

Il y'a sans doute une petite confusion entre l'automatisation flexible et programmable, l'automatisation flexible est une extension de celle programmable [39]. Les points suivants permettent la distinction essentielle entre celle flexible et programmable :

- La capacité de modifier des programmes partiels sans perte de temps de production
- Et la capacité de basculer sur la configuration physique, encore une fois sans perte de temps de production.

La modification des programmes partiels est généralement réalisée en préparant les programmes hors ligne sur un système informatique et en transmettant électroniquement les

programmes au système de production automatisé. Par conséquent, le temps nécessaire à la programmation pour le prochain travail n'interrompt pas la production sur le travail actuel.

Le progrès de la technologie des systèmes informatiques est en grande partie responsables de cette capacité de programmation en automatisation flexible.

4. Approche du système automatisé

4.1. Approche globale de l'automatisation

Le processus industriel a vu l'émergence d'un système informatisé homme-gestion qui a connu de grandes ampleurs depuis les années 80 notamment après la migration du processus centralisé vers le processus décentralisé qui garantit le contrôle total des outils de production et par l'intégration des nouveaux systèmes informatiques automatisés. Dans les entreprises manufacturières, il y a eu une tendance croissante vers l'utilisation d'ordinateurs pour effectuer de nombreuses fonctions liées à la conception et la production. La technologie associée à cette tendance est appelée CAD / CAM (Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing), pour la conception assistée par ordinateur et la fabrication assistée par ordinateur. Le nom donné à cette utilisation plus complète des ordinateurs est la fabrication intégrée par ordinateur CIM (Computer Integrated Manufacturing) [19].

L'approche du CIM consiste à mettre en évidence l'apport de l'informatique au monde des automaticiens. Ce concept est représenté par plusieurs niveaux (figure 17), il est connu souvent par la pyramide CIM, correspond à des niveaux de décision, le niveau de décision est trop important s'il est très élevé dans la pyramide du CIM, c'est-à-dire que le niveau inférieur exécute ce qui a été décidé par le niveau supérieur.

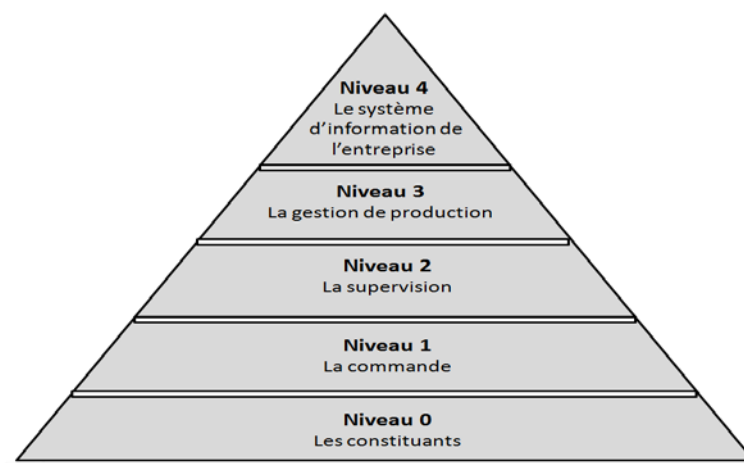


Figure 17: Pyramide de la Computer Integrated Manufacturing CIM

Pourtant, le temps d'exécution et de traitement des données dans cette pyramide est très critique (figure 18) lorsqu'un niveau est trop bas par rapport aux autres, parce que chaque niveau est en mis en œuvre avec des technologies bien identifiées à lui.

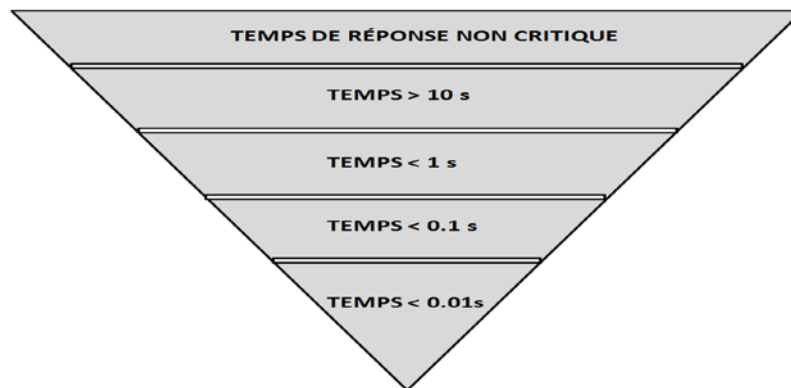


Figure 18: Temps de réponse CIM

Les architectures de production actuelles se développent d'une manière très rapide pour réduire le nombre de niveaux décisionnels [44] afin de répondre aux besoins croissants de flexibilité et aussi de personnaliser les produits.

4.2. Pyramide de l'automatisation

Dans le contexte industriel, chaque entreprise est équipée par la pyramide de l'automatisation, dont elle intègre un nombre de niveaux technologiques (figure 17 en dessus). Ces niveaux technologiques dialoguent d'une façon pyramidale et transversale entre eux à l'aide de la communication industrielle. L'information échangée dépend essentiellement de chaque niveau, mais la fiabilité des échanges reste primordiale.

4.2.1. Niveau terrain

Le premier niveau, ou « niveau de terrain » comporte les dispositifs physiques présents dans l'industrie, comme les actionneurs, les capteurs et les automates, les régulateurs et plus généralement tout matériel supportant des processus d'application ayant besoin d'avoir accès aux équipements de terrain. En plus, ce niveau interconnecte ces dispositifs entre eux via des protocoles de communication spécifique.

4.2.2. Niveau de contrôle

Le deuxième niveau, ou « niveau de contrôle », comprend et connecte les dispositifs logiques comme les ordinateurs, les API, les PID, les robots et les machines-outils de contrôle (lasers, machines à mesurer).

4.2.3. Niveau de supervision

Le niveau de supervision, troisième niveau, correspond aux systèmes d'acquisition et de contrôle des données (SCADA). Ce niveau ramène aux opérateurs les informations qui leurs sont nécessaires pour conduire le processus et qui leurs permet de fixer les points de consigne ou divers paramètres pour les régulateurs et automates. Ils connectent des automates, des systèmes numériques de contrôle-commande et des systèmes de supervision.

4.2.4. Niveau supérieur

Au niveau supérieur, appelé parfois par le niveau de planification et de gestion, se trouve deux types de systèmes : les systèmes d'exécution de la production (MES) et les systèmes de gestion intégrale de l'entreprise (ERP).

4.3. Étapes d'exécution de l'automatisation

Chaque opération exécutée avec les systèmes automatisés passe par trois étapes essentielles (figure 19) (acquisition de données, analyse de données et le contrôle de l'exécution) et avec un laps de temps très court, ces étapes permettent la correction et le maintien des résultats souhaités. Le système automatisé typique exécute ces trois étapes séquentiellement et cycliquement [45].

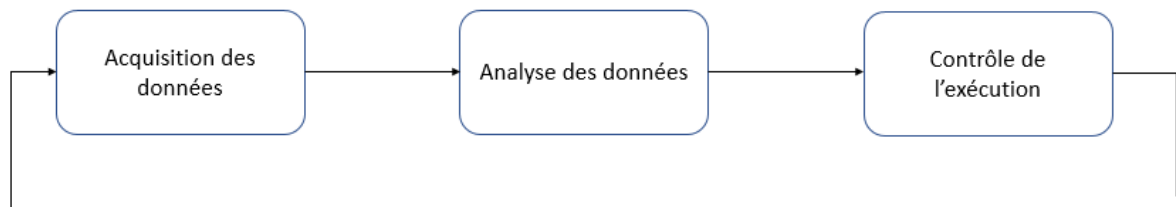


Figure 19: Etapes d'exécution de l'automatisation

4.3.1. Acquisition des données

L'acquisition de données est le processus de mesure électrique ou un phénomène physique comme la tension, le courant, le son, la température, ou la pression avec un appareil électronique le plus souvent un ordinateur.

L'acquisition de données permet le conditionnement et la conversion des signaux issues des capteurs vers un logiciel d'acquisition de données installés sur un ordinateur, comme elle permet également l'observation du comportement du processus [45].

4.3.2. Analyse des données

L'analyse des données permet de traiter un nombre très important de données et de dégager les aspects les plus intéressants. Cette étape analyse les données du processus en comparant

les données acquises via les capteurs et les résultats souhaités. Selon les résultats obtenus, les corrections et les décisions peuvent avoir lieu [45].

4.3.3. Contrôle de l'exécution

Cette dernière étape joue le rôle d'un contrôleur des modifications du processus. En plus, elle vérifie l'exécution réelle des directives ou les corrections envoyées après la comparaison des données. Ces directives appelées parfois des outputs [45].

5. Décomposition d'un système automatisé

D'une manière générale, les systèmes automatisés de production sont composés de deux parties essentielles, selon les définitions en dessus, la Partie Commande (PC) et la Partie Opérative (PO) qui dialoguent ensemble via une interface homme machine (IHM) (figure 20).

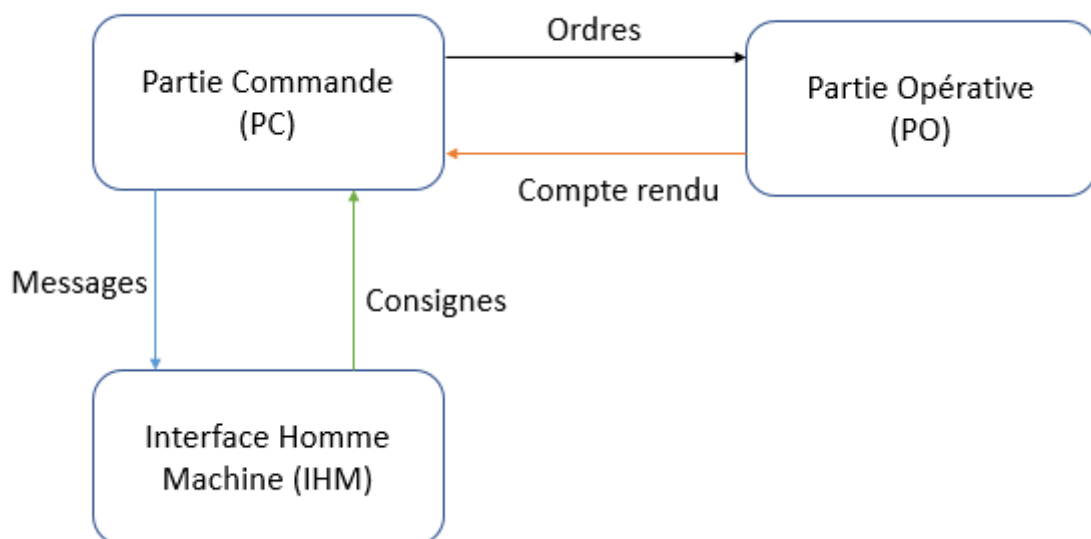


Figure 20: Communication entre la PC, la PO et l'IHM

5.1. Partie commande

La Partie Commande (PC), on l'appelle aussi l'automate, c'est l'automatisme qui en fonction des informations externes venant de la PO (capteurs), élabore des ordres externes destinés à la PO (actionneurs). Elle assure alors le traitement logique des informations, actuellement il est d'usage courant d'utiliser des Automates Programmables Industriels (API).

5.1.1. Automate programmable industriel

En quelques années, les Automates Programmables Industriels API ont connu une évolution de grande ampleur, passant de l'industrie manufacturière (fabrication d'objets finis

ou de sous-ensembles) jusqu'à de processus (élaboration de matières premières), vers la gestion des bâtiments et des systèmes exigeant une grande sécurité. Les API deviennent nécessaires pour chaque entreprise, ils permettent ainsi l'augmentation de leur productivité et la réduction de leurs coûts d'exploitation. Ils répondent aux besoins d'adaptation et de flexibilité de nombres d'activités économiques actuelles.

Selon la norme CEI 61131-1 [46], un automate programmable industriel est destiné pour l'utilisation dans un environnement industriel. Il est conçu pour remplacer les armoires à relais câblés [47].

L'API est un système électronique robuste, modulaires, opératoire et répond à des exigences techniques communément appréciées. Il utilise une mémoire programmable pour le stockage interne des instructions orientés utilisateur [9] pour implémenter des fonctions spécifiques telles que des fonctions de logique combinatoire et séquentielle, temporisations, comptage, arithmétique et à travers des entrées/sorties digitales et analogiques (figure 21), des types variés de machines et processus, il fait également le contrôle commande.

- Le contrôle permet l'observation du mode environnement (via des capteurs, des interrupteurs, des boutons poussoir, etc.), cet environnement peut être analogique ou numérique.
- La commande sert essentiellement à exécuter un ensemble d'opérations au procédé en leur donnant des consignes de fonctionnement prédéfinies et en réponse à des ordres d'exécutions.

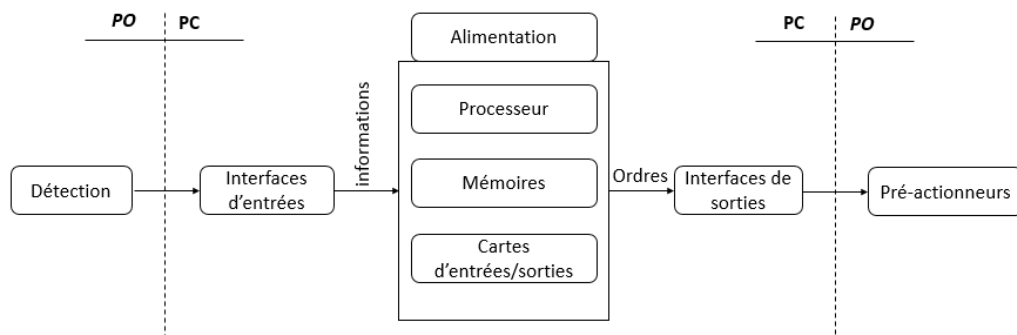


Figure 21 : Structure interne d'un API

Les API sont des périphériques informatiques communément utilisés dans l'automatisation et le contrôle industriel. Bien que les API ont été autour de l'industrie depuis les années soixante-dix [47], ils restent toujours préférés par les concepteurs industriels dans le domaine de l'automatisation. Les API sont bien adaptées à un éventail de tâches d'automatisation [48].

5.1.2. Structure interne d'un API

Les API ne se limitent pas uniquement aux logiciels, mais en réalité ils sont structurés autour d'une unité de calcul ou processeur, d'une alimentation, d'une mémoire et de modules d'entrées sorties E/S dépendant des besoins de l'application permettant de traiter et de diffuser les informations en temps réel.

5.1.2.1. Le processeur

Le rôle du processeur consiste d'une part à organiser les différentes relations entre la zone mémoire et les interfaces d'E/S, d'autre part à réaliser toutes les opérations [9] selon le programme (logiques ET, OU, les fonctions de temporisation, de comptage, de calcul PID, arithmétiques etc...). Dans la majorité des APIs, le processeur exécute ces fonctions grâce à un micro logiciel préprogrammé dans une mémoire de commande, ou mémoire système qui n'est pas accessible à l'utilisateur.

5.1.2.2. Les interfaces d'Entrées/Sorties

- *L'interface d'Entrées :*

Elle comporte des adresses d'entrée et assure l'intégration directe de l'automate dans son environnement industriel. Elle a pour but de recevoir les informations en provenance des capteurs (figure 22)¹ et de l'IHM, les traiter en les mettant en forme, en éliminant les parasites d'origine industrielle et en isolant électriquement l'unité de commande de la partie opérative pour la protection (isolation galvanique).

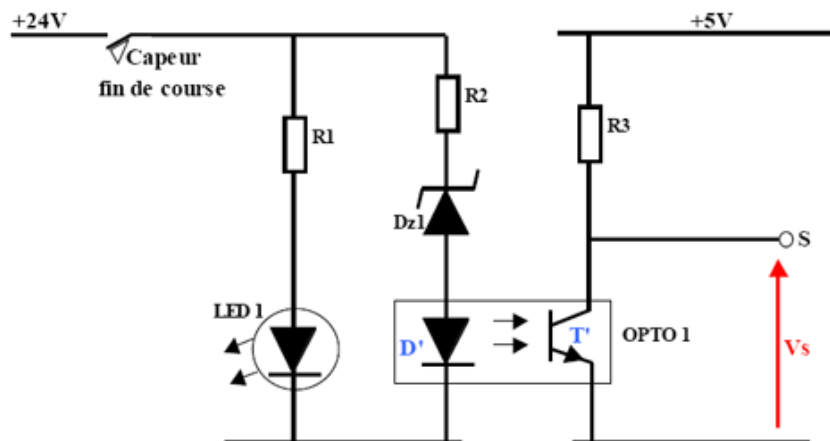


Figure 22: Principe de fonctionnement de l'interface d'Entrée d'un API

¹<http://www.technologuepro.com/cours-automate-programmable-industriel/Les-automates-programmables-industriels-API.htm> (consulté le 08/01/2015)

- *L'interface de Sorties :*

Elle comporte des adresses de sorties, elle envoie des informations aux pré-actionneurs et aux éléments de supervision de l'IHM. L'interface de sortie adapte les niveaux de tension de l'unité de commande à celle de la partie opérative du système en garantissant une meilleure isolation galvanique entre ces dernières. Un API ne peut pas commander un actionneur de puissance directement (figure 23)², d'où la nécessité d'un pré-actionneur. Le nombre d'E/S varie suivant le type d'automate.

Les cartes d'E/S ont une modularité de 8, 16 ou 32 voies. Elles admettent ou délivrent des tensions continues 0 - 24 Vcc.

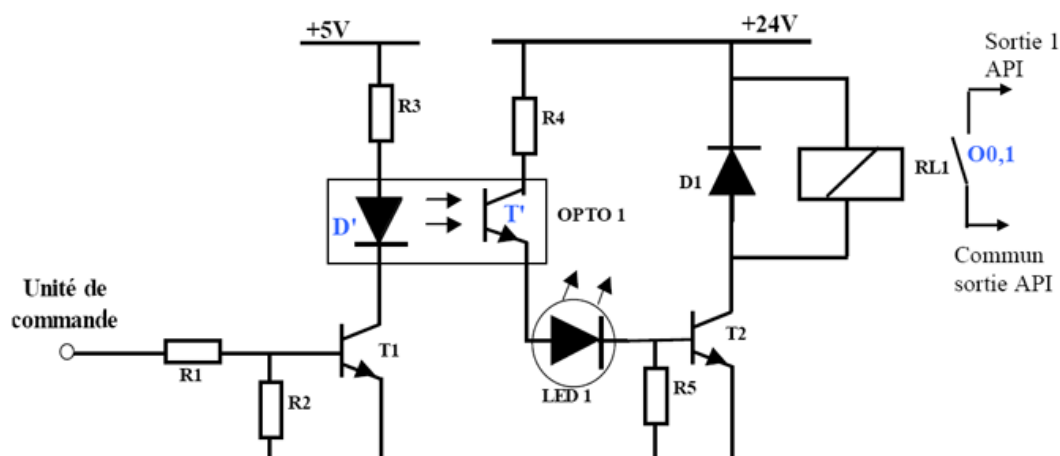


Figure 23: Principe e fonctionnement de l'interface de Sortie d'un API

5.1.2.3. La mémoire

Elle est destinée au stockage du programme compilé [9] dans la mémoire morte de type ROM (Read Only Memory), EPROM (Erasable Programmable ROM) ou EEPROM (Electrically Erasable Programmable ROM), et dans la mémoire volatile, qui perd les données lorsque l'alimentation électrique est coupée, de type RAM (Random Access Memory).

Elle permet également la gestion et la réception des informations issues des différents secteurs du système que sont le terminal de programmation (PC ou console) et le processeur qui lui gère et exécute le programme.

²Idem.

5.1.2.4. L'alimentation

La plupart des API sont alimentés par une source de tension 24V en courant continu disponible généralement en façade de l'API. Pour assurer un maximum de sécurité dans les installations industrielles, les API sont munis par des dispositifs qui détectent la baisse ou la coupure de la tension, et le contrôle des tensions internes.

Dans le cas où un défaut électrique est survenu dans l'installation, les API jouent un rôle de protecteur en procédant à une opération de sauvegarde prioritaire des informations.

5.1.3. Fonctionnement de l'API

Avant de commander les pré-actionneurs, les API reçoivent les consignes nécessaires décrivant l'état actuel du système et les exécutent suivant un programme prédéfini dans leurs mémoires. Généralement les API ont un fonctionnement cyclique [9] (figure 24).

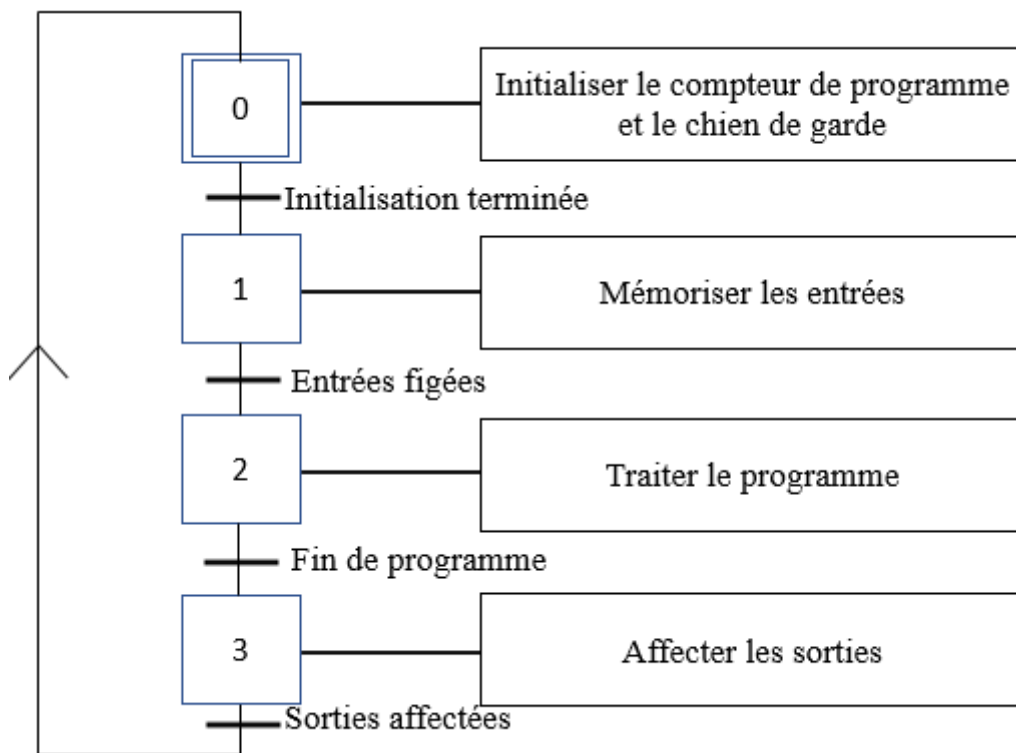


Figure 24: Cycle d'un API

Le processeur réalise toutes les fonctions et il est connecté aux autres éléments (mémoire et interface E/S) par des liaisons parallèles connues par les bus dont elles véhiculent les informations sous forme binaire ou hexadécimale.

Le fonctionnement synchrone de l'API, en comparaison avec les interfaces entrées et les interfaces sorties, reflète un processus de traitement des entrées figées en mémoire qui sont favorisées pour tout ce qui concerne le reste du cycle.

Chaque automate possède son propre jeu d'instructions. Mais, les constructeurs proposent aussi une interface logicielle de programmation répondant à la norme CEI 61 131-3. Cette norme définit cinq langages de programmation industriels.

5.1.4. Langage de programmation




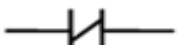
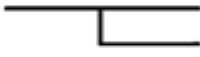
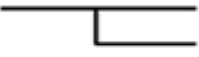
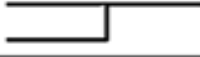
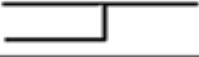


Les structures et les softwares de développement des automates sont soumis à des normes techniques, ils assurent une certaine homogénéisation des codes sources pour le contrôle-commande [49]. Grâce à cette convergence des langages de programmation, les applications automatisées en sont améliorées.

Les API sont programmés à l'aide de langages spécialisés, chaque marque d'API a développé sa console de programmation selon un ensemble de règles de conformité. La norme CEI 61131-3 est celle qui standardise la programmation des automates programmable industriel, elle définit cinq langages [9] correspondant aux familles de langages les plus utilisés pour la programmation des API. Les constructeurs proposent tous une interface logicielle de programmation répondant à cette norme. Les quatre langages standards des automates décrits par la norme CEI 61131-3 sont :

- Le langage textuel de liste d'instruction IL (*Instruction List*) : est considéré comme un langage de bas niveau c'est-à-dire un langage à une instruction par ligne. Il est semblable au langage assembleur.
- Le langage textuel de texte structuré ST (*Structured Text*) : est connu par les automaticiens comme un langage de haut niveau. Grâce à ST, la programmation de tout type d'algorithme est devenue admissible que ce soit plus ou moins complexe.
- Le langage graphique de diagrammes de blocs fonctionnels FBD (*Functional Block Diagrams*) : la base de ce langage est la programmation graphique à l'aide de blocs, qui permet la représentation des variables, des opérateurs ou des fonctions. Il permet également de manipuler les différents types de variables.
- Sequential Function Charts (*SFC*) : un langage graphique qui permet la structuration de tout comportement séquentiel pouvant être décrit dans l'un des quatre autres langages de la norme.
- Le langage graphique de schéma à relais LD (*Ladder Diagrams*) : c'est un langage graphique très connu dans le milieu industriel et chez les automaticiens par le langage Ladder, parce qu'il s'inspire des circuits de commande basés sur la logique

électrique, les équations combinatoires étant câblées à l'aide de contacts et de relais. Ce langage est essentiellement dédié à la programmation d'équations booléennes (vrai/faux). Le langage à relais (Ladder Diagram) est basé sur un symbolisme très proche de celui utilisé pour les schémas de câblage classiques. Les symboles les plus utilisés sont donnés au tableau 4 suivant :

Tableau 4: Symboles usuels en langage LD

Fonction	Symbole	
	Européen	American
Contact ouvert au repos		
Contact fermé au repos		
Début de branchement		
Fin de branchement		
Affectation		

5.1.5. Amélioration des API

Récemment, il y a eu un grand intérêt de la part des chercheurs universitaires et industriels d'étudier et de développer des solutions qui pourraient améliorer les capacités standard des APIs. Ces solutions sont des réseaux logiques reconfigurables appelées Reconfigurable Logic Controllers (RLC) [50] et elles sont basées sur de faible coût et de la reconfiguration, ces solutions sont les circuits FPGA (*Field-Programmable Gate Array*) c'est-à-dire un circuit logique programmable. Les FPGAs sont bien adaptées aux opérations arithmétiques. La grande majorité des codes scientifiques s'appuient fortement sur 64 bits arithmétique à virgule flottante (souvent appelé double précision arithmétique à virgule flottante).

Les fabricants modernes des FPGA fournissent des mécanismes pour reconfigurer dynamiquement la puce. La dynamique reconfiguration permet de reconfigurer un module partiel tout en conservant la partie statique inchangée. Le système de la puce sera en mesure de reconfigurer une partie de lui-même, sans aucune perturbation de l'exécution du reste du système.

5.1.5.1. Concept de la FPGA

FPGA (pour Field-Programmable Gate Array en anglais ou un circuit logique programmable en français) est un circuit intégré logique reprogrammable plusieurs fois après

sa fabrication. Il est constitué de plusieurs cellules logiques élémentaires et bascules logiques librement connectables. Chaque cellule est capable d'exécuter une fonction choisie parmi plusieurs possibilités. Les interconnexions sont également programmables.

Chaque circuit logique programmable est constitué des interconnexions programmables qui permettent de mettre en œuvre un circuit numérique reconfigurable et des blocs d'E/S afin de permettre l'accès du circuit au monde extérieur.

Les fonctions combinatoires et séquentielles sont réalisées par des matrices de blocs logiques configurable dont elles incluent autour d'elles des blocs E/S qui permettent la gestion de ces interfaces E/S lors de la communication avec les modules extérieurs.

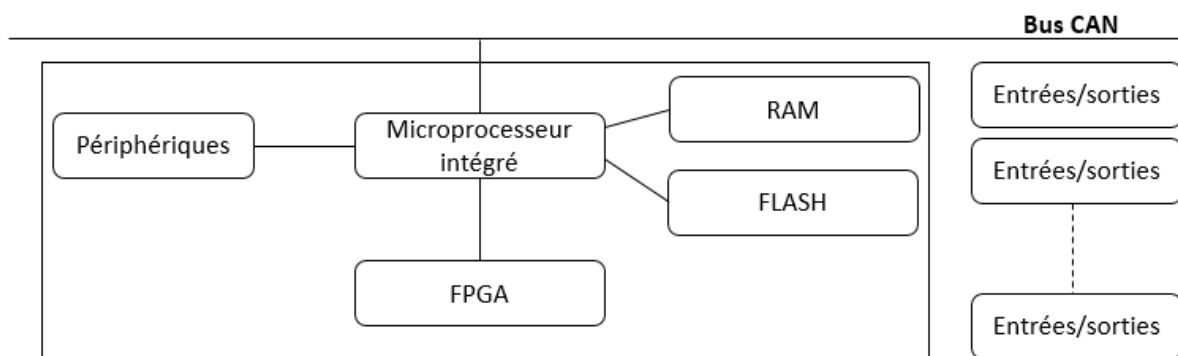


Figure 25: Structure interne de l'API avec module de la FPGA

La figure 25 illustre la conception de l'architecture matérielle de l'API à base de FPGA. Correspondant à la structure classique de l'automate, le module tampon E/S et le module de mémoire interne de données seront intégrés dans le nouveau système. Une fois que la FPGA est configurée, avec une interface adaptée, il fonctionne comme un automate donnant performance satisfaisante à une souplesse raisonnable. Le nouveau schéma peut améliorer les performances, réduire les coûts de fabrication et de faire appliquer la flexibilité de la logique de commande du système de fabrication [51], ainsi il peut fournir de nombreux avantages tel que :

- Flexibilité : les concepteurs peuvent facilement mettre à niveau l'architecture des API. Ainsi, par exemple, certaines fonctionnalités ou instructions pourraient être ajoutées dans le modèle existant.
- Précision : la conception rapide permet l'intégration des fonctions de temps critiques au matériel comme le capteur de proximité, la détection du capteur de surveillance de la santé avec plus de précision.

- Cycle de développement court : en raison de l'utilisation de la norme VHDL et la conception des outils automatisés, le temps est devenu très réduit. Aussi le code de commande s'exécute directement dans la carte.
- Rentabilité : les automates peuvent répondre aux exigences du marché par la satisfaction des besoins des clients en augmentant les performances et les fonctionnalités.

Cette nouvelle solution peut effectuer les mêmes fonctions que l'automate original, et elle peut répondre aux signaux d'entrée avec l'exécution parallèle de processus à vitesse électrique, qui va considérablement améliorer la vitesse de l'API. En outre, la technologie FPGA à base de l'automate peut être reconfiguré plusieurs fois comme un nouveau programme est converti et téléchargé.

5.2. Partie opérative

La Partie Opérative (PO) est aussi appelée la partie opérationnelle [9] ou la partie puissance. Elle contient les organes de puissance (actionneurs) qui agissent sur la matière d'œuvre tel qu'un moteur électrique, un vérin pneumatique. Les capteurs qui rendent compte sur l'état du système tel qu'un capteur inductif, photoélectrique, un capteur de température, etc.

Pour exécuter une séquence des opérations, la PC envoie l'ordre (actions) d'exécution à la PO. Dès la fin de l'exécution de la tâche, cette dernière informe la PC de la réalisation de chaque tâche à l'aide des capteurs.

5.2.1. Capteurs

Un capteur est un composant technique qui détecte une grandeur physique [42] puis la transforme en se rapportant au fonctionnement du système et traduit cette grandeur en un signal exploitable et manipulable par la partie commande de ce système (figure 26). Ce signal est généralement électrique sous forme d'un signal basse tension de l'ordre de 5V à 24V.

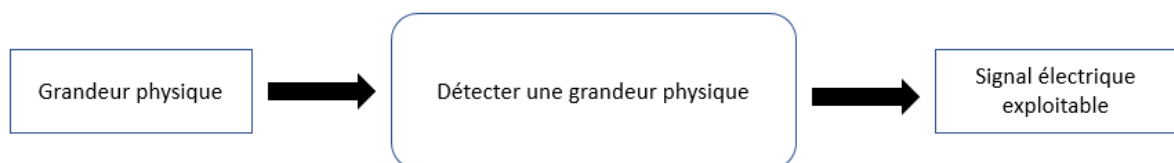


Figure 26: Transformation d'une grandeur physique à un signal exploitable

Le progrès technologique est une source abondante de capteurs et de très nombreux secteurs de l'industrie a été profitée de cette technologie. Il existe trois types de capteurs, et ces trois sont les plus répandus.

- Capteur analogique : La sortie est une grandeur électrique dont elle peut prendre une infinité de valeurs continues limités entre deux certaines valeurs limites.
- Capteur logique : Ce capteur est appelé souvent capteur Tout Ou Rien (TOR), la sortie ne peut prendre que deux valeurs logiques soit 1 ou 0 à la sortie.
- Capteur numérique : La sortie fournie par le capteur est une séquence d'un nombre binaire. Contrairement au capteur analogique, le capteur numérique à la PC d'en déduire une infinité de valeurs discrètes.

5.2.2. Actionneurs

Un actionneur est un dispositif qui transforme l'énergie [42], il change l'état de l'énergie reçu pour fournir un travail, modifier le comportement ou l'état d'un système. Les actionneurs gouvernent les échanges d'énergie des organes principaux du processus et se diffèrent selon l'énergie utilisée (électrique, pneumatique et hydraulique).

Les actionneurs électriques sont des convertisseurs d'énergie permettant de convertir l'énergie électrique en rotation mécanique. Par exemple le moteur asynchrone, alimenté par un réseau triphasé, est le plus répandu dans les installations industrielles.

5.2.3. Pré-actionneurs

Les pré-actionneurs assurent la bonne distribution de l'énergie aux actionneurs, ils sont situés entre ces derniers et la partie commande précisément l'interface de sortie.

Dans les installations électriques, les pré-actionneurs peuvent exister sur deux types : un relais ou un contacteur. Le rôle principal du contacteur est d'assurer l'extinction le plus vite possible de l'arc électrique engendré par la commutation de l'énergie électrique de forte puissance. Par exemple, lors de l'ouverture du circuit en cours de fonctionnement, le contact en cause engendre un arc électrique qui peut être dangereux pour les personnes et les équipements.

Dans les installations pneumatiques, les pré-actionneurs sont généralement des distributeurs, le plus connu est le vérin. Son rôle du pré-actionneur pneumatique est la distribution de l'air arrivé sous une grande pression aux différentes chambres de l'actionneur selon un signal de commande au préalable.

5.3. Partie supervision

Il n'y a guère de consensus sur ce que doit être l'architecture d'un système de supervision idéal, à cause de la diversité des systèmes tel que les systèmes continus ou systèmes à événements discrets etc. Malgré cette diversité, l'architecture simplifiée (figure 27) de la supervision de n'importe quel système permet la détermination des modes de fonctionnement du système supervisé [52], cette architecture se repose sur le niveau bas dont elle est constituée des capteurs, des actionneurs et des API [53].

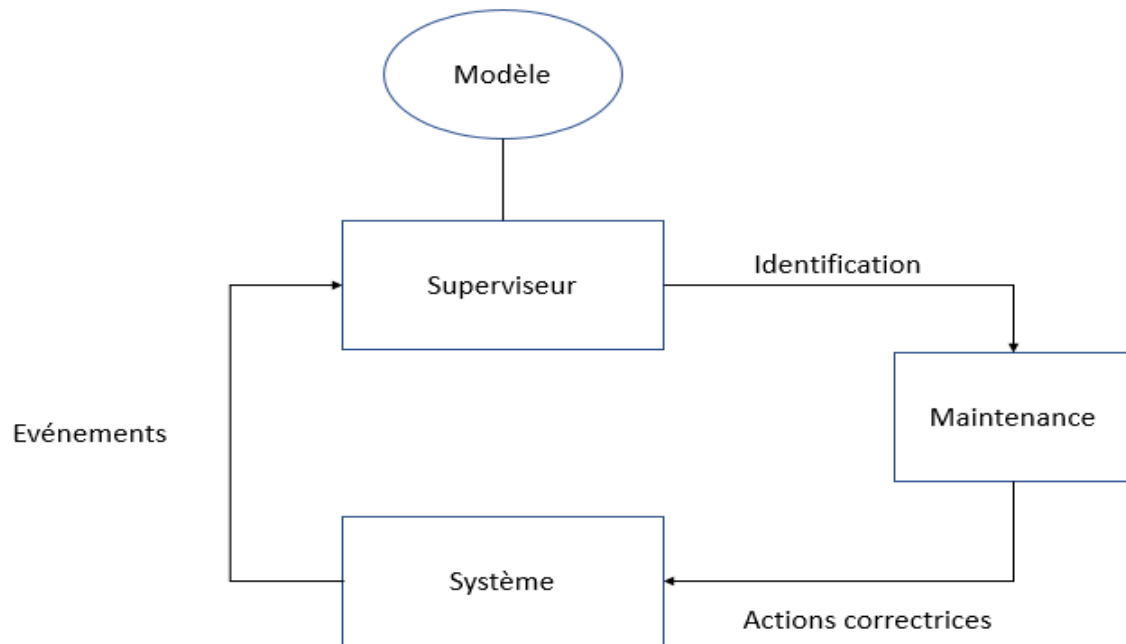


Figure 27: Architecture simplifiée de la supervision [52]

La supervision industrielle sert également à la sauvegarde de l'historique [10] des interventions et des alertes du système afin de les exploiter en d'autres interventions ou bien pour faire des rapports sur l'état du système. Selon les informations reçues, la supervision détermine la période et le mode de fonctionnement du système c'est-à-dire le diagnostic pour le passé, le suivi pour le présent et la prédiction pour le futur [52].

Dans le processus industriel, la supervision concerne deux parties essentielles, que ce soit le système, l'acquisition des données et la commande des paramètres du processus. La commande des paramètres est confiée exclusivement aux automates programmables industriels. L'acquisition des données se fait dans la plupart du temps par des systèmes d'acquisition et de contrôle des données SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) dont leurs fonctions principales est le traitement en temps réel d'un grand nombre d'événements, de mesures, d'alarmes et de retour d'état de fonctionnement à l'aide du

matériel informatique et d'Interface Homme Machine (IHM). En ce qui concerne l'IHM, les utilisateurs des systèmes automatisés deviennent de plus en plus exigeants. Outre que les données transmises soit fiables et disponible n'importe où, ils s'attendent que l'IHM soit interactif et qui aura plus de choix graphique [54].

L'IHM permet à l'opérateur de configurer et superviser le système, il communique avec le système grâce aux moyens de dialogue pour donner des consignes et pour recevoir des messages [19]. Quand il y'a une anomalie dans le processus industriel, la supervision permet à l'opérateur de ramener ce processus à son fonctionnement normal [9]. Cette fonction réside dans un carrefour de plusieurs flux d'informations [55], ces informations doivent être remontées aux superviseur en temps réel. Pour cela, les entreprises préfèrent l'architecture de la supervision à base des réseaux sans fil pour s'assurer que le responsable de la supervision ait toutes les informations nécessaires même s'il est loin de la salle de supervision.

5.3.1. Réseaux sans fil dans l'industrie

L'utilisation de la technologie sans fil dans les systèmes de supervision offre un certain nombre d'avantages pour les entreprises tel que : la disponibilité des informations précises et l'élimination du câblage ce qui implique la réduction des coûts de l'architecture de la supervision. Une telle technologie offre la possibilité de déploiement des capteurs dans les endroits les plus difficiles à accéder par les être humaines et par conséquent une meilleure gestion d'informations.

Malheureusement, aucun type de technologie sans fil ne résout tous les problèmes notamment en ce qui concerne la consommation énergétique du protocole utilisé. Pour remédier ce problème les entreprises investissent dans les réseaux sans fil qui consomment le moins possible d'électricité. Ce qui est apparu ces dernières années comme un réseau efficace est le réseau ZigBee par ce que son rendement d'investissement est maximum.

5.3.1.1. Protocole ZigBee

Le protocole ZigBee est conçu pour répondre à une grande variété d'applications, y compris la supervision industrielle. Le ZigBee s'appuie sur la norme IEEE 802.15.4 pour les couches physique et liaison, qui sont les couches 1 et 2 du modèle OSI (Open Systems Interconnection). C'est une norme de transmission de données sans fil permettant la communication de machine à machine à très bas prix, faibles débits, faible encombrement et avec une très faible consommation d'énergie. Le faible coût permet à la technologie d'être largement déployé dans les applications de contrôle et de surveillance, la faible consommation

permet une longue durée de vie en utilisant des batteries plus petites et le maillage de réseau fournit une fiabilité élevée et d'une portée plus importante [56].

Le protocole ZigBee a été approuvé par l'Institut des Ingénieurs en Electronique et Electricité IEEE (the Institute of Electrical and Electronics Engineers) en 2003, qui donne les spécifications pour la sous-couche MAC (Medium Access Control) et la couche physique (PHY) pour des réseaux personnels sans fil bas débit (LR-WPAN Low Rate-Wireless Personal Area Network). Il est supporté par la norme IEEE802.15.4, qui standardise deux couches de base PHY et MAC du réseau afin de faciliter l'interconnectivité des différents capteurs, elle offre la possibilité d'établir un réseau sans fil complexe, portable et flexible.

L'avantage majeur du protocole ZigBee est sa faible consommation électrique, grâce à un mode de fonctionnement connu par DOZE (ou somnolence en français). Ce mode permet à une entité communicante ZigBee de consommer moins d'énergie ($100\mu\text{W}$) tout en passant en mode opérationnel en très peu de temps $300\mu\text{s}$ [57], [58].

Ce qui caractérise le protocole ZigBee, c'est le fait d'utiliser que quatre couches sur les sept du modèle OSI. La couche Physique (PHY) contient la fréquence radio (RF) de l'émetteur-récepteur ainsi que son mécanisme de contrôle de bas niveau, et la sous couche MAC (Medium Access Control) qui donne accès au canal physique pour tous les types de transfert.

Les couches supérieures sont composées d'une couche réseau NWK (Network Layer), qui fournit la configuration du réseau, la manipulation et le routage des messages, et d'une couche application APL (Application Layer), qui est dotée de 2 sous couches APS (Application support Sub-Layer), qui lui est chargé de gérer la table de correspondance permettant d'associer les équipements entre eux et l'entité ZDO (Zigbee Device Object) qui est chargée de définir le rôle d'un objet dans le réseau et de sécuriser les relations entre les équipements.

L'architecture du ZigBee se compose de quatre couches (figure 28) : physique, MAC, réseau et application. Le détail de cette architecture et la topologie du ZigBee sont détaillés dans l'annexe A.

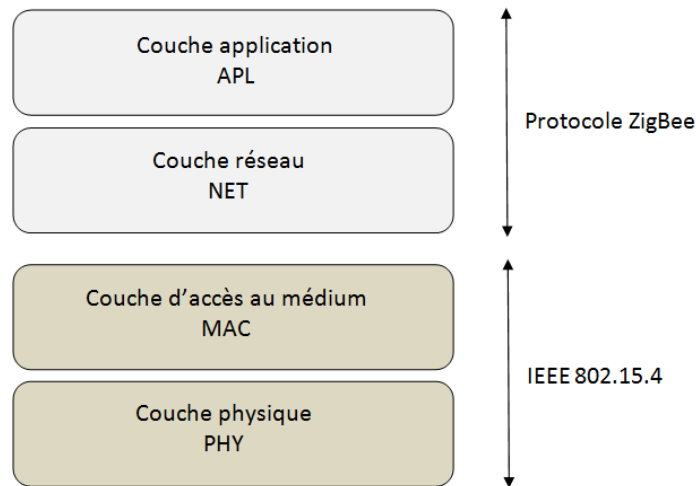


Figure 28: Couches du protocole ZigBee

5.3.1.2. Protocole Wifi

Wi-Fi (Wireless Fidelity) est en réalité un réseau répondant à la norme IEEE 802.11 (ISO/IEC 8802-11) est un standard international décrivant les caractéristiques d'un réseau local sans fil (WLAN). Il permet aux utilisateurs de surfer sur Internet à haut débit lorsqu'il est connecté à un point d'accès ou en mode ad hoc, la technologie 802.11 est généralement considérée comme la version sans fil de 802.3 Ethernet [59], et est la plus utilisée à travers le monde, sans doute du fait de sa grande simplicité, de son faible coût de mise en œuvre mais aussi grâce aux importants soutiens techniques et financiers dont elle a bénéficié.

5.3.1.3. Protocole Bluetooth

IEEE 802.15.1/Bluetooth [60] est une norme de réseau sans fil fédérateur dont l'idée est née au début des années 1990. Son objectif initial était de proposer une norme universelle pour les communications sans fil, plus performante et plus globale que les liaisons infrarouges, déjà très répandues à l'époque [61].

Le Bluetooth a un débit de 1 Mbit/s et une portée d'une dizaine de mètres, il offre de plusieurs avantages grâce à la faible consommation énergétique. Son utilisation est généralement simple ce qui rend Bluetooth très populaire. Il propose une pile protocolaire complète, de la couche physique à la couche application.

Bluetooth utilise la bande ISM (industriel, scientifique, et médical) des 2,4 GHz (2,402 GHz à 2,480 GHz) en divisant cette bande en 79 canaux de largeur 1 MHz et met en œuvre une modulation de type GFSK (Gaussian frequency-shift keying en anglais ou modulation par déplacement de fréquence) en FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum en anglais ou étalement de spectre par saut). Le débit en bande de base est de 1 Mbits/s et la fréquence

nominale des sauts FHSS de fréquence de 1600 Hz, soit une période de 625µs. Du fait de l'utilisation des sauts de fréquence, Bluetooth impose un fonctionnement en maître/esclave pour le partage du médium radio.

Dans le tableau 5, nous avons rassemblé les trois protocoles de communication avec leurs caractéristiques.

Tableau 5: Comparaison entre différents protocoles

Standard	Bluetooth	Wifi	ZigBee
IEEE	802.15.1	802.11a/b/g	802.15.4
Fréquence	2.4 GHz	2.4 GHz ; 5 GHz	868/915 MHz ; 2.4 GHz
Débit	1 Mb/s	54 Mb/s	250 Kb/s
Portée	10 m	100 m	10 - 100 m
Bande passante	1 MHz	22 MHz	0.3/0.6 MHz ; 2 MHz
Diffusion	FHSS	DSSS, CCK, OFDM	DSSS
Autonomie	Des jours	Des heures	Des années
Equipements par réseau	8	2007	> 65000
Protection des données	16-bit CRC	32-bit CRC	16-bit CRC
Applications	Discours sans fil	LAN sans fil	Contrôle à distance, mesure, contrôle

6. Industrie 4.0 : modernisation des systèmes automatisés

L'industrie 4.0 est un terme utilisé pour la première fois en 2011 par l'Union de recherche allemande (German Industry-Science Research Alliance). Elle se réfère à la numérisation totale de la production industrielle. Ce concept décrit la vision des usines intelligentes qui se caractérise par la mise en réseau complète de toutes les pièces à produire [25] c'est-à-dire le contrôle en temps réel de la chaîne de production à travers les techniques d'informations et de communication et également par l'installation des robots qui sont de plus en plus nombreux dans les entreprises.

Il s'agit de repenser les systèmes de production, autour d'une nouvelle génération d'usines intelligentes (Smart Factories) [62], ce qui signifie mettre l'ensemble des technologies et des

nouveaux concepts tel que BigData et l'Internet des objets pour valoriser la chaîne de production.

Les systèmes d'automatisation évoluent vers un environnement intelligent tel que les appareils intelligents, les systèmes intelligents, les organisations intelligentes et les villes intelligentes, où l'intelligence ici peut être défini comme des systèmes qui présentent des fonctionnalités étendues, des fonctionnalités multiples, autodiagnostic, configuration et connectivité [54].

Les entreprises de futur vont être un mélange entre le monde réel et le monde virtuel, c'est-à-dire la communication continue et instantanée entre les différents systèmes et outils intégrés dans la chaîne de production à l'aide des capteurs connectés ou bien des puces RFID. Les systèmes de production seront assez intelligents pour effectuer des auto-diagnostic ou de détecter une faille dans leur fonctionnement et ainsi de pouvoir effectuer une maintenance préventive de manière proactive (anticipée).

La finalité de cette quatrième révolution industrielle est l'aide précieuse des industriels à gagner en productivité, à surmonter plus facilement les difficultés et à améliorer les processus de décision. Elle permet également la flexibilité et l'adaptation facile aux nouveaux modèles économiques.

L'industrie 4.0 se caractérisent par une grande flexibilité et par une utilisation plus efficace des ressources. Pour caractériser l'industrie 4.0 plusieurs leviers ont été pris en compte :

- Communication en temps réel pour obtenir des données en temps réel et au moment opportun.
- Évaluation à grande échelle des critères choisis.
- Autoformation des liaisons ad hoc des données.
- Mise au point de la normalisation des rapports pour l'implémentation dans l'ensemble du système.
- Représentations virtuelles des objets physiques pour la collaboration avec le monde physique.
- Contrôle automatique et prétraitement des données pour soulager les employés des activités routinières.
- L'industrie 4.0 ne sera activée que par des niveaux de collaboration plus élevées à l'intérieur et à l'extérieur des cycles de fabrication. [63]

Outre que l'industrie 4.0, un autre terme qui est en relation étroite avec elle est le cyber-système physique (CPS) où des éléments informatiques collaborent pour le contrôle et la commande d'entités physiques. Les capacités physiques et informatiques sont intégrées [64] telles que la détection, la communication et l'actionnement physique.

6.1. Système cyber physique : la base de l'industrie 4.0

Les systèmes Cyber-physiques (CPS en anglais pour Cyber Physical Systems) intègrent des dispositifs électroniques (appelé objets pour être en harmonie avec l'internet des objets) et de logiciels. Les CPS se connectent entre eux ou par l'intermédiaire le plus souvent l'internet afin de construire un système réseau caractérisé par sa simplicité. Ils sont connu aussi comme des systèmes cyber-physiques d'automatismes industriels [65], qui intègrent des fonctionnalités innovantes, où des éléments informatiques en interaction avec des entrées et des sorties physiques [66] collaborant pour le contrôle et la commande d'entités physiques.

Lors de l'acquisition des données, les CPS convertissent les valeurs physiques en données numériques ce qui permet l'interaction avec différents logiciels même s'ils sont très loin des endroits où ces systèmes sont y installés. Ces données sont alors mises à disposition aux divers services connectés au réseau qui utilisent ces actionneurs pour impacter directement les mesures prises dans le monde réel. Le CPS simulera et comparera donc les options de production sur la base d'instructions fournies, il proposera alors la solution optimale en se basant sur cinq fonctions principales [67] informatique, communication, contrôle de précision, coordination et autonomie.

L'utilisation principale des CPS, dans les chaînes de production industrielle, est pour assurer le développement des architectures construites sur l'internet afin de simplifier le contrôle et la commande à distance de systèmes automatisés de production. Le cyber système physique permettra la communication dans l'industrie de demain entre trois éléments principaux: les êtres humains, les machines et les produits [68]. Pour ce faire le CPS nécessite trois niveaux essentiels [69]:

- Les objets physiques
- Modèles de données des objets physiques mentionnées dans une infrastructure de réseau
- Services basés sur les données disponibles

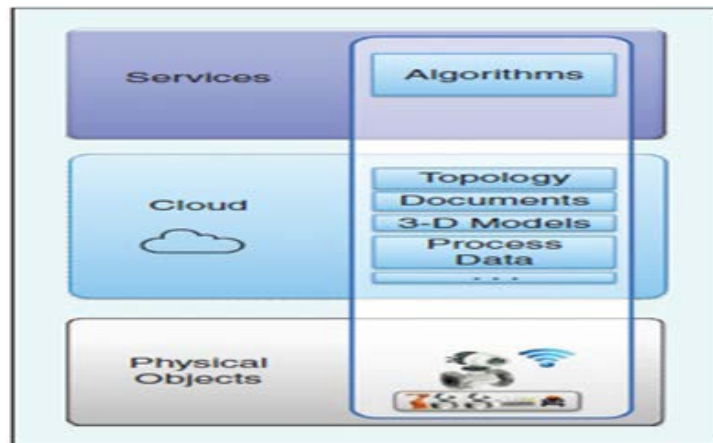


Figure 29: Les trois niveaux du CPS [69]

Ces niveaux (figure 29) permettent aux processus indépendants de management et à l'internet des objets (Internet of Things IoT) d'interagir [70] avec le monde réel et virtuel. Cette interaction ouvre un nouvel aspect de la production est celui du passage de la production centralisée à la production décentralisée. Les clients peuvent commander leurs produits directement via des applications en temps réel grâce à des logiciels de production, des objets physiques réels en tant que source d'informations et de la boucle de rétroaction entre employés et clients.

Selon les travaux de [71], Chaque CPS se détermine par les caractéristiques suivantes :

- Haut niveau d'intégration physique/cyber.
- Capacités de traitement dans chaque composant physique, dû au fait que les ressources en traitement et communication sont généralement limitées.
- Hautement connectés, via réseaux avec ou sans fil, Bluetooth, GSM, GPS etc.
- Adapté à des échelles temporelles et spatiales multiples.
- Capable de reconfiguration/réorganisation dynamique.
- Hautement automatisés, en boucles fermées.
- Fiables, voire certifiés dans certains cas.

7. Perspectives de l'automatisation dans le monde

Nous allons présenter les perspectives des systèmes automatisés dans les pays les plus industrialisés dans chaque continent et selon les informations disponibles.

7.1. En Europe

7.1.1. Le Royaume-Uni

Les entreprises industrielles jouent un rôle très important dans l'économie britannique. Tous les secteurs d'activités sont impliqués dans ce progrès économique, hormis le nombre des systèmes automatisés et robots installés dans les entreprises anglaises reste modeste par rapport aux autres pays de l'union européen. Le nombre de robots industriels par million d'heures de travail n'atteint pas le 0.5 [72] dans le Royaume-Uni.

Pour encourager les entreprises britanniques à avoir plus de productivité en utilisant l'automatisation, le gouvernement a adopté une stratégie industrielle pour l'horizon 2020 [73], pour apporter le soutien à tous les secteurs d'activités, concernant principalement la robotique et les systèmes autonomes (RAS).

L'objectif majeur de cette stratégie est le développement de la technologie industrielle réelle [73] tel que le Manufacturing Execution System (MES) ou la gestion des processus industriels, et le Computer Integrated Manufacturing (CIM).

7.1.2. La France

Elle a une grande ampleur industrielle dans l'union européenne, elle se caractérise par un niveau assez remarquable d'automatisation dans l'industrie manufacturière dans plusieurs domaines de production en masse tel que l'automobile et hors automobile [74]. Cette automatisation permet la création de la valeur ajoutée et un taux d'emploi assez important lors de son adoption, notamment par le lancement du projet de l'innovation 2030 qui est basé sur 7 ambitions dans des domaines très différents qui pourront constituer des piliers du développement [75].

7.1.3. L'Allemagne

Le Ministère fédéral allemand a lancé une grande opération de prospective qui vise à comprendre les grandes tendances technologiques, identifier les défis scientifiques des quinze prochaines années et prévoir leurs impacts éventuels. Parmi les onze champs de recherche prioritaires, le champ de la nouvelle technologie dont l'axe principale est « Apprendre et travailler dans un monde intelligent connecté » [76]. Les scénarios qui peuvent être envisagé par cette stratégie à l'horizon 2030 sont :

- L'homme a largement le contrôle sur les systèmes informatiques
- Les systèmes informatiques décident arbitrairement, au moins en partie
- Les systèmes informatiques deviennent indépendants

7.2. En Asie

7.2.1. La Chine

Elle est sans aucun doute le pays où la croissance économique risque de perdurer. A l'horizon de 2030, elle sera la première puissance économique mondiale, accompagnée dans le top 10 d'autres pays émergents : Inde 3ème, Brésil 4ème, Russie 6ème, Mexique 7ème, Indonésie 8ème [77]. La Chine se dote d'une vision de 5 objectifs essentiels vers 2030, Il est donc impératif qu'elle progresse dans sa chaîne de la valeur, abandonne son industrie de base et se concentrant sur le développement d'une industrie innovante [78].

Pourtant, les autorités chinoises ont indiqué avoir démarré les travaux dans un domaine purement technologique pour se doter d'un lanceur spatial capable de placer en orbite les charges les plus lourdes et d'amener des hommes jusqu'à la Lune [79].

7.2.2. L'Inde

Longtemps restée à l'ombre de sa puissante voisine, l'Inde semble s'éveiller peu à peu. Elle fait partie des pays en développement dont la croissance économique a été la plus forte. Avec un système politique et une stratégie économique fort différents, elle se profile comme l'un des futurs géants de l'économie mondiale.

Sa stratégie longue terme s'articule sur deux points dans le domaine de l'industrie pour renforcer son développement. Dans un premier temps, elle se base sur l'importation de la nouvelle technologie étrangère pour aider les industriels indiens à renforcer leurs capacités. Dans le deuxième point, elle se concentre sur la recherche et le développement de haute technologie afin d'atteindre 2.4% de leur PIB en 2034 [80].

7.2.3. Le Japon

Il est l'un des pays les plus développés, ces marques sont connues dans le monde entier. L'industrie manufacturière est l'une des forces du Japon, mais le pays à peu de ressources naturelles. Par conséquent, les entreprises japonaises doivent importer des matières premières, qu'elles utilisent pour fabriquer des produits finis destinés au marché intérieur ou à l'exportation. L'industrie la plus importante du pays est l'électronique qui a fait en quelques années au Japon des progrès extraordinairement rapides.

Cette tendance a exigé au Japon de perdurer dans le domaine de la nouvelle technologie et d'équiper les entreprises par des robots qui vont atteindre un million de robots à l'horizon de 2030 [81].

7.2.4. La Russie

Certes que la Russie demeure aujourd'hui une des 10 économies les plus importantes et puissantes au niveau international, pourtant elle n'a pas posé une vision stratégique concernant la production civique, elle vise à être la première en armement.

7.3. En Amérique

7.3.1. Le Brésil

Le Brésil est aujourd'hui le 9ème producteur industriel du monde, cette puissance régionale est ouverte sur le monde. Au départ, il est considéré comme un outsider, à tout de même réussi à grimper à la 5ème place du classement.

L'économie brésilienne est en pleine mutation, et grâce à sa jeune main d'œuvre, ce qui est souvent un signe positif pour une économie en bonne santé, la production pourra s'accroître avec l'adoption d'une vision stratégique en se basant sur cinq facteurs afin de se lancer dans la construction des navires, d'aéronefs et d'automobile [82].

7.3.2. Le Mexique

Au Mexique, il y a deux axes qui vont soutenir la croissance. Le premier des axes est le facteur externe, comme les coûts de main-d'œuvre augmentent en Chine, plusieurs pays se tournent vers la Mexique pour la production. En outre, la construction aérospatiale a une grande valeur ajoutée pour le pays parce que son coût est très élevé et demandant un capital humain intensif.

Le deuxième axe est les liens forts de libre-échange entre les deux économies (Mexique et les États-Unis) qui seront également apportés un soutien pour la croissance au Mexique [83].

7.3.3. Les États-Unis

Ils sont la première puissance économique mondiale selon le produit intérieur brut (PIB) nominal avec un taux de croissance qui est l'un des plus forts des pays développés. Le Pays industrialisé est aujourd'hui largement tourné vers le secteur tertiaire et misant massivement sur l'innovation. Le développement des industries de pointe est le résultat d'une politique d'investissements dans la recherche fondamentale et la recherche et développement (R&D).

Les progrès de l'intelligence artificielle seront immédiatement intégrés aux développements de la robotique. Les avatars et robots fourniront des données inédites liées au toucher, à l'odorat. Ils bénéficieront d'une plus grande autonomie et d'une intelligence artificielle embarquée conséquente.

Les États-Unis produisent aujourd’hui l’essentiel de l’innovation technologique mondiale. Ils ont parfaitement compris l’intérêt stratégique d’une réflexion à toute échelle portant sur les évolutions et les risques associés.

Pour faire face à la fin de la domination mondiale américaine, les États-Unis sont insistés dans le rapport Global Trends 2030 [84] sur le lancement de la production des implants, prothèses et exosquelettes motorisés qui se généraliseront à toutes les sphères d’activités humaines à l’aide des systèmes automatisés très puissants. En plus, des instituts de recherche intégrant des équipes de chercheurs dans le domaine des systèmes de réalité augmentée afin d’améliorer notre compréhension des phénomènes complexes réels.

7.4. En Afrique

7.4.1. L’Afrique du Sud

Longtemps première puissance économique du continent, l’Afrique du Sud présente des résultats économiques qui la placent au premier rang sur le continent africain. À elle seule, l’Afrique du Sud réalise un quart du PIB du continent africain, elle s’est basée sur le secteur minier, de grandes régions industrielles se sont donc implantées dans les zones même d’extraction, où se sont développées des villes importantes.

Le taux de chômage reste élevé malgré l’industrie minière. Elle s’est ensuite diversifiée dans l’industrie et surtout l’industrie manufacturière afin de réduire le taux de chômage à 6% à l’horizon 2030. Pour cette vision, l’Afrique du Sud pose 3 scénarios (baseline scenario, solid minerals scenario and diversified dynamic economy scenario) pour 2030 afin de garder sa place économique dans le continent. Grâce à cette vision l’Afrique du Sud comptera créer plus d’un million de poste de travail que par l’industrie [85].

7.4.2. Le Maroc

Le Maroc, un pays en pleine émergence, est la cinquième puissance économique d’Afrique, il paraît comme un pays relativement modeste, pourtant il est le deuxième pays émergent le plus prometteur pour l’investissement derrière l’Afrique du Sud selon le classement établi par Bloomberg [86], il est également dans la liste des pays émergents les plus prometteurs dans le monde.

Après avoir déployé deux principales stratégies sectorielles depuis les années 2000 à savoir “E-Maroc” et “Maroc Numeric 2013”, il adapte également une stratégie industrielle pour le long terme allant jusqu’à 2030 qui couvre un périmètre large de thèmes : smart cities,

innovation, éducation et formation, digitalisation de l'Etat, commerce électronique et l'industrie bien entendu.

Il est vrai que le développement industriel est indispensable pour la prospérité économique du Maroc. A partir de cette approche, il vise dans un premier temps la création de 500 000 emplois industriels à l'horizon 2020 qui représentera une enveloppe de 20 milliard de dirhams [87], et la construction des parcs industriels à vocation locative pour faciliter l'accès au foncier tel que la zone franche de Tanger et de Kenitra. Cette attribution concerne principalement les secteurs automobiles et aéronautiques qui se basent sur des écosystèmes productifs.

8. Conclusion

Nous avons commencé ce chapitre par une brève histoire des trois révolutions industrielles. Chaque révolution industrielle contribuait à la naissance d'une autre plus développée et basée sur la précédente jusqu'à l'apparition des systèmes automatisés industriels. Nous avons également décrit les trois types des systèmes automatisés présents dans les entreprises (automatisation fixe, programmable et flexible) qui sont composés de la partie commande, la partie opérative et l'interface d'homme machine. Le progrès technologique est en plein développement, c'est pour cela nous avons mentionné la modernisation des systèmes automatisés appelée industrie 4.0 et les stratégies proposées par quelques pays du quatre continents dans l'objectif d'acquérir les systèmes automatisés modernes tout en négligeant l'impact de l'automatisation dans les PME.

Chapitre 3

Impact économique, environnemental et
social des systèmes automatisés dans les
PME marocaines

1. Introduction

Nous allons présenter dans ce chapitre la méthodologie et ses résultats de notre étude, ainsi que le choix des secteurs industriels et les trois villes à étudier. A la fin de ce chapitre, nous allons interpréter les résultats obtenus afin de choisir un domaine de contribution.

2. Contexte de l'étude

L'économie marocaine se caractérise par une large diversification et une grande ouverture au marché national et international. Dans notre étude, nous nous intéressons au secteur textile, agroalimentaire et l'automobile.

- Le textile est un secteur qui a pu garder sa place dans l'économie marocaine malgré la concurrence internationale, il contribue par 7% de la valeur ajoutée grâce à la stratégie industrielle et par la création de 27% des postes dans le pays [88].
- Le premier secteur industriel du Maroc est le secteur agroalimentaire qui bénéficie d'une demande assez importante à l'échelle national qu'à l'international. L'ensemble des entreprises opérants dans ce secteur est 29% [89] des entreprises industrielles et elles offrent plus de 90000 emplois.
- L'industrie automobile marocaine s'est accéléré ces dernières dix années à des niveaux de croissance soutenus. Sa performance est particulièrement remarquable à l'export (premier secteur exportateur) et en termes de création d'emplois.

3. Le questionnaire

Pour procéder à faire cette enquête, l'élaboration du questionnaire est essentielle et était la première étape dans le recueil des données. Le questionnaire est devenu la méthode la plus utilisée pour faire les enquêtes, chez la plupart des chercheurs, par rapport aux deux autres méthodes : l'entretien et l'observation [90]. En outre, le questionnaire permet le recueil des informations d'une façon plus simple et facile en envoyant des questions précisément posées à un nombre assez important d'enquêtés afin de vérifier, d'une manière statistique, à quel point ces informations sont généralisables [91]. Cette méthode de la récolte des données est connue dans le milieu scientifique comme un instrument de connaissance scientifique [92], elle s'applique à un échantillon précis pour engendrer des chiffres qui vont servir à la soustraction de la subjectivité.

3.1. Parties du questionnaire

Le questionnaire établi dans notre enquête est divisé en cinq parties (annexe B), chaque partie contient des questions en relation avec une thématique précise en se basant sur des questions parfois fermées à réponse unique et parfois à choix multiple. Ces parties sont les suivantes :

- La première partie « Entreprise » contient des questions simples et générales sur l'entreprise (la tranche d'âge et la répartition du personnels, le secteur d'activité, la taille de l'entreprise et les années de son existence) afin de gagner la confiance de l'enquêté.
- La deuxième partie « Economie » contient des questions orientées à la production tel que la quantité et la qualité de produits fabriqués et le temps de sa production, ainsi que le prix du produit et le marché cible de l'entreprise.
- La troisième partie « Environnement », cette partie traite la consommation en eau et en électricité de l'entreprise, en plus le type et le processus de traitement des déchets industriels.
- La quatrième partie « Social » est divisée en deux sous parties. La première section contient des questions sur les entreprises qui font la formation continue à leurs salariés et ses répercussions sur le salarié, l'emploi et l'entreprise. La deuxième partie est l'inverse de la première, c'est-à-dire que les entreprises qui ne font pas la formation à leurs salariés passent directement à cette section sans remplir la première section, elle traite les obstacles qui leur empêchent à former leurs salariés.
- La cinquième partie « Automatisation » contient des questions liées aux systèmes automatisés industriels afin de savoir le niveau d'automatisation des entreprises marocaines, leurs utilisateurs et les compétences nécessaires pour ces équipements.

Dans le début du questionnaire, nous avons rassuré les entreprises enquêtées de garder la confidentialité et l'anonymat de leurs réponses afin de les encourager à remplir le questionnaire et avoir des informations exactes et précises.

3.2. Etapes du questionnaire

Après avoir défini les aspects à traiter dans cette enquête, nous avons commencé à élaborer le questionnaire sous le logiciel Sphinx Plus² V5, dont il est dédié à la gestion des enquêtes et les données. Le logiciel Sphinx est organisé en 3 parties logiques [93] de réalisation de

l'enquête : la conception du questionnaire, la collecte des informations et le traitement des données.

3.2.1. Conception du questionnaire

Le premier objectif de cette première partie est la rédaction des questions de toutes types (questions fermés, numériques, textes et code etc.), ensuite l'organisation de ces questions selon les parties du questionnaire et enfin d'accéder à son impression rapide (figure 30).

Variable	Libellé	Modalités de réponse / Contrôles
Entreprise		
1. Secteur	Secteur d'activité :	Textile ; Agroalimentaire ; Automobile ;
2. Taille	Taille de l'entreprise (employés) :	1 à 9 ; 10 à 49 ; 50 à 99 ; 100 à 200 ; Plus de 200 ;
3. Cadres/ingénieur	Cadres/ingénieurs	
4. Techniciens5	Techniciens5	
5. Opérateurs2	Opérateurs2	
6. Cadres4	Cadres4	18-24 ans ; 25-44 ans ; 45-54ans ; Plus de 55 ans ;
7. Techniciens4	Techniciens4	18-24 ans ; 25-44 ans ; 45-54ans ; Plus de 55 ans ;
8. Opérateurs4	Opérateurs4	18-24 ans ; 25-44 ans ; 45-54ans ; Plus de 55 ans ;
9. création	Depuis combien d'années l'entreprise s'est créé :	Moins d'1an ; Entre 1 et 3 ; Entre 4 et 6 ; Entre 7 et 10 ; Plus de 10 ;
Economie		
10. équipe	Disposez-vous de :	Une équipe (shift) ; 2 équipes ; 3 équipes ;
11. Quantité	Quantité de biens fabriqués par jour (une seule équipe) :	Moins de 200 ; De 200 à 400 ; De 400 à 600 ; Plus de 600 ; Autres : ;
12. obligation	Cette quantité est obligée par :	Le marché ; La concurrence ; Le stock ; Autres : ; <i>Vous pouvez cocher</i>
13. temps de product	Le temps nécessaire pour fabriquer un seul produit :	Moins d'une heure ; 1 heure ; 2 heures ; 4 heures ;
14. qualité	La qualité des produits est-elle :	Moyenne ; Bonne ; Excellente ; Autres : ;
15. test de qualité	Faites-vous un test de qualité du produit sur :	Moins de 50 articles ; De 50 à 100 ; De 100 à 150 ; Autres : ;
16. prix	Jugez-vous le prix des produits est :	Moins cher ; Convenable ; Cher ; Plus cher ;
17. choix du prix	Pourquoi ce choix :	Qualité du produit ; Concurrence ; Pas de concurrence ; Le temps de fabrication ;
18. destination du produit	Votre production est destinée au marché :	Régional ; National ; International (export) ; Autres : ; <i>Vous pouvez cocher</i>
Environnement		

Figure 30: Conception du questionnaire sous le logiciel Sphinx plus² V5

3.2.2. Collecte des informations

La deuxième partie permet de collecter les résultats de l'enquête avec une possibilité de modification et la gestion. Le logiciel permet la saisie des réponses issues des PME participantes à notre étude d'une manière séquentielle c'est-à-dire une par une (figure 31).

REponses (mode rapide) - (54 observations)	
Environnement	
- La consommation énergétique mensuelle en [kWh]:	
1. Secteur	Textile
2. Taille	50 à 99
3. Cadres/ingénieurs	13
4. Techniciens	36
5. Opérateurs	32
6. Cadres	45-54ans
7. Techniciens	25-44 ans
8. Opérateurs	Plus de 55 ans
9. création	Plus de 10
10. équipe	Une équipe (shift)
11. quantité	Moins de 200
12. obligation	Le stock;-;-;-
13. temps de production	1 heure
14. qualité	Excellente
15. test de qualité	Autres : ...
16. prix	Convenable
17. choix du prix	Concurrence;-;-;-
18. destination du produit	National;International (export)
19. énergie	Electrique;-
20. consommation énergétique	De 200 à 300
21. Cette consommation est :	Raisonnable
22. réduire cette consommation	Arrêt des machines inutiles;-;-
23. La consommation majeure est due aux	Systèmes de production;Eclairage;-;-
24. sans arrêt	24 heures
25. Coupez-vous de l'électricité	Jamais;-;-
26. consommation de l'eau	Plus de 35
27. déchets	Eaux;Vapeur d'eau;Fumée;-;-;-;-
28. traitement des déchets	Traitement à l'entreprise;-;-;-

Figure 31: Saisie des données dans le logiciel Sphinx plus² V5

3.2.3. Traitement des données

Cette dernière partie est l'étape cruciale dans l'enquête par ce qu'elle permet de faire parler les données issues du questionnaire, ainsi elle les rend lisibles et compréhensibles par l'utilisateur. Elle a pour but d'analyser les résultats rassemblés et de les faire communiquer. Le logiciel permet l'analyse des données avec des tableaux à plat ou d'une façon croisée selon le besoin des utilisateurs (figure 32).

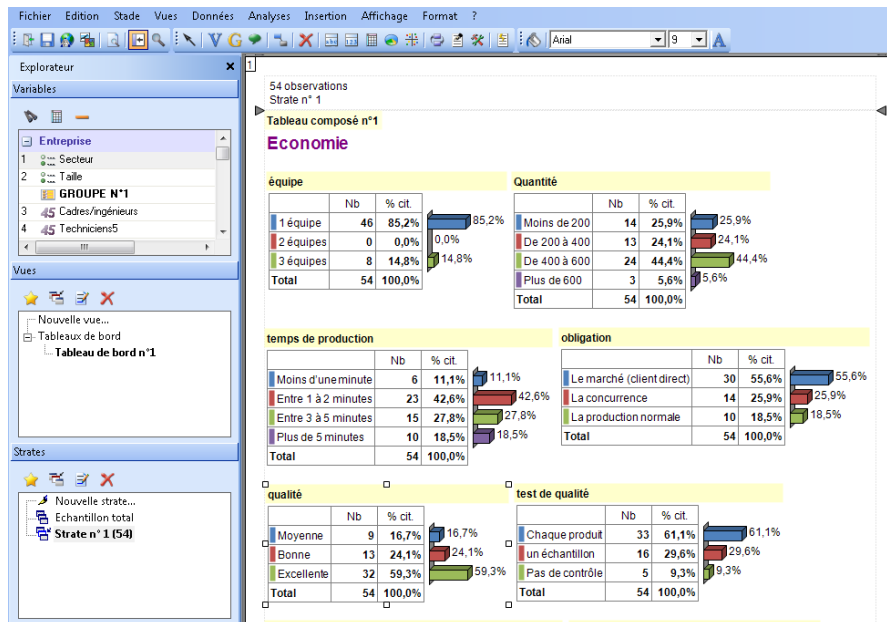


Figure 32: Traitement des données par le logiciel Sphinx plus² V5

3.3. Pré-test du questionnaire

Cette phase est essentielle dans toute étude par questionnaire, il s'agit d'une évaluation du questionnaire lui-même et cette étape devient qualitative plus que quantitative [91].

Après avoir préparé le questionnaire, nous avons mené dans un premier lieu notre étude uniquement sur les PME de la ville de Fès dans les 6 secteurs (La chimie et parachimie, la mécanique et métallurgique, l'agroalimentaire, le textile, le cuir et l'électronique).

Notre questionnaire comportait dans la section sociale deux parties comme mentionné en dessus dans les parties du questionnaire : la première contient des informations sur les PME qui font de la formation à leurs salariés et la deuxième partie était dédié aux PME qui ne font pas de la formation à leurs collaborateurs.

Nous avons pris en considération les remarques et les modifications proposées par les PME interrogées, c'est-à-dire que le questionnaire est jugé un peu long. Nous avons donc dû enlever la deuxième partie de la section sociale en plus de quelques questions jugées inutiles. En outre, pour généraliser les données sur toutes les PME marocaines, il était nécessaire de choisir des entreprises de toutes les villes marocaines ce qui est un peu difficile. Pour cela, nous avons choisi les secteurs les plus dominants dans chaque ville des trois villes industrielles.

4. Choix des entreprises

Le tissu industriel marocain est constitué majoritairement de PME comportant moins de 200 employés, ce qui représente 95% du tissu productif national [94]. L'étude s'est basée sur un échantillon de 450 PME dans les trois villes industrielles (Fès, Casablanca et Tanger).

4.1. Entreprises selon la ville

4.1.1. Entreprises de la ville de Fès

Fès dispose de 11 zones industrielles aménagées et réparties en 6 secteurs d'activité différents. Elle bénéficie de plusieurs atouts pour la promotion du secteur industriel et d'une situation privilégiée entre les pôles économiques du pays. Elle compte 542 entreprises [95] qui emploient 9% de personnes par rapport au niveau national. Le secteur textile est le secteur le plus dominant à Fès dont il exporte une quantité assez importante de la production (à peu près 60% avec le cuir).

Nous avons choisi un échantillon de 200 PME opérantes dans ce secteur situées dans les zones industrielles Sidi Brahim et Ain Chkef pour remplir le questionnaire.

4.1.2. Entreprises de la ville de Casablanca

La ville de Casablanca est sans doute la plus grande ville par excellence du Maroc et sa locomotive économique par ce qu'elle représente également la capitale économique du pays. Elle est le premier pôle industriel avec plus d'un tiers des établissements industriels du pays, c'est une ville à vocation industrielle. Elle réalise 50 % de la valeur ajoutée du Maroc et impulse une dynamique économique à l'ensemble du pays.

Casablanca contient des entreprises de toute taille (très petites « TPE », petites et moyennes « PME » et grandes entreprises « GE ») dans tous les secteurs, elle est également un carrefour industriel incontesté. Nous avons choisi le secteur agroalimentaire comme secteur témoin pour notre étude, mais nous nous limitons que sur les PME dont les effectifs oscillent entre 10 et 200 salariés. Dans les zones industrielles de Ain Sebaa et Bouskoura, nous avons pris 120 PME du secteur agroalimentaire pour remplir le questionnaire de cette étude.

4.1.3. Entreprises de la ville de Tanger

La zone franche de Tanger (Tanger Free Zone « TFZ ») est la zone industrielle du complexe portuaire Tanger Med, elle est développée sur une superficie de 500 hectares et située à proximité de l'aéroport international de Tanger. La TFZ est réservée aux entreprises dont l'activité est orientée principalement vers l'exportation et confère à ces entreprises des avantages exceptionnels qui renforcent leur compétitivité à l'export grâce à un port connecté à plus de 100 destinations mondiales et en plus qui encouragent davantage d'autres entreprises à y investir.

La zone franche de Tanger abonde des entreprises opérant dans le secteur automobile. La demande de l'automobile des lots de terrain dépasse l'offre ce qui pousse les parties prenantes d'ouvrir une nouvelle zone industrielle près de la TFZ et qui sera dédiée à l'industrie d'automobile appelé Tanger Automotive City sur une superficie de 60 Ha.

Parmi toutes les PME installées à la zone franche de Tanger, nous avons pris 130 PME du secteur de l'automobile pour répondre à notre questionnaire.

4.2. Le choix d'échantillon

Un échantillon est un ensemble de composants extraits d'individus, d'objets, d'évènements ou d'une manière générale une population étudiée qui permet de tirer des conclusions

applicables à la population entière. Pour que la population soit représentative, notre échantillon a été pris d'une manière aléatoire simple c'est-à-dire que tous les éléments de notre population ont une probabilité égale (non nulle) et de faire partie de notre échantillon.

Un échantillon représentatif n'est pas le but en soi, mais ce que nous souhaitons que les résultats statistiques de l'étude aient la capacité d'être extrapolés à l'ensemble de la population [96]. D'une autre façon, nous souhaiterions que les résultats soient représentatifs.

Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, nous avons donc pris que 450 PME comme un échantillon dans les trois secteurs. La répartition des PME est dans le tableau 6.

Tableau 6: Nombre des PME choisi dans les 3 secteurs

Secteur d'activité	Textile	Agroalimentaire	Automobile	Total des PME
Echantillon de PME	200	120	130	450

4.3. Envoi du questionnaire

Ce qui est apparu lors des premières prises de contact téléphonique est que l'accès aux PME est difficile malgré qu'elles sachent que l'étude entre dans le cadre de la recherche scientifique, et même si elles se déclarent intéressées par l'étude, la recherche est loin d'être une priorité [97] pour la majorité des PME marocaines.

Face aux contraintes d'accès aux PME, et dans le but d'obtenir des meilleurs résultats nous avons pris la décision de les rendre visite, muni de notre questionnaire sous format papier et d'une lettre d'appui de la part de notre laboratoire. Pourtant, l'accès n'était pas du tout évident aux PME et quelques-unes demandent un questionnaire en ligne pour le remplir, ce qui nous a obligé à utiliser la plateforme Google formulaire pour en créer un.

Les entreprises ont leurs préoccupations ce qui rend la mise en œuvre du mode d'administration du questionnaire en face à face très difficile. Nous avons donc accepté le mode auto-administré dont il est le plus utilisée puisque moins coûteux et garantit le sentiment d'anonymat et de la confidentialité de l'information transmise, ainsi qu'il permet à la personne enquêtée de répondre au moment le plus adéquat.

Les avantages et les inconvénients [98] du mode auto-administré sont présentés dans le tableau 7 suivant :

Tableau 7: Avantages et inconvénients du mode auto-administré

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> -Le mode d'auto-administré est le moins couteux par rapport aux autres modes. -Une opération de communication en plus de l'étude. -Une grande liberté pour répondre. -Pas d'influence de la part de l'enquêteur. -Une garantie d'anonymat. -Possibilité de joindre le questionnaire à un courrier. -La dispersion géographique des répondants (si l'internet est utilisé). 	<ul style="list-style-type: none"> -Le temps de réponse est long. -Le problème de représentativité. -La surreprésentation des réponses extrêmes (les très mécontents et les très satisfaits). -Le taux de participation est faible. -La difficulté de garantir une meilleure compréhension des questions. -Le manque du sérieux lors de la saisie.

Nous avons dû attendre la réponse des PME enquêtées, malgré les relances téléphoniques et par E-mail, elles se sont beaucoup tardées à nous répondre.

Sur un total de 450 petites et moyennes entreprises, notre questionnaire a été rempli dans sa totalité que par 54 entreprises soit 12% des entreprises ciblées.

5. Résultats de l'étude

Après avoir collecté et traité les données, nous allons les présenter en commençant par la grandeur économique jusqu'à l'aspect social en passant par l'aspect environnemental. Nous allons également présenter le niveau d'automatisation dans les PME marocaines.

5.1. Grandeur économique des PME

5.1.1. Nombre d'équipes dans les PME

Selon notre étude, 85% des PME possèdent une seule équipe de production soit 46 PME réparties comme suit : 25 PME du secteur textile, 10 entreprises de l'agroalimentaire et 11 entreprises de l'automobile (tableau 8).

Aucune PME de notre étude n'a 2 équipes. Par contre, 8 PME ont déclaré avoir 3 équipes de production ce qui représente 15% des PME avec 5 entreprises dans l'automobile, 2 PME dans le secteur agroalimentaire et la dernière entreprise dans le secteur textile.

Tableau 8: Nombre d'équipes dans les PME par secteur

	1 équipe	2 équipes	3 équipes	Total
Textile	25	0	1	26
Agroalimentaire	10	0	2	12
Automobile	11	0	5	16
Total	46	0	8	54
Pourcentage	85%	0%	15%	100%

5.1.2. Quantité de production

La quantité de produits fabriqués par les PME de notre échantillon est variée par rapport au secteur d'activité. Par exemple la quantité produite dépassant 600 articles existe que dans le secteur automobile avec seulement 3 PME soit 6%. Les PME qui fabriquent entre 400 à 600 produits sont les plus dominantes avec un pourcentage de 44% soit 24 PME dans les trois secteurs : le textile et l'automobile ont 9 PME de chaque et le secteur agroalimentaire n'a que 6 PME.

En ce qui concerne l'intervalle de 200 à 400 articles produits le taux des PME est 24% soit 13 PME au total dont 9 PME dans le textile, 3 PME dans le secteur agroalimentaire et une PME dans l'automobile. 26% des PME qui produisent moins de 200 articles soit 14 PME réparties en 3 entreprises dans les deux secteurs d'agroalimentaire et d'automobile par contre 8 PME dans le troisième secteur (tableau 9).

Tableau 9: Quantité de biens produits par secteur

	Moins de 200	De 200 à 400	De 400 à 600	Plus de 600	Total
Textile	8	9	9	0	26
Agroalimentaire	3	3	6	0	12
Automobile	3	1	9	3	16
Total	14	13	24	3	54
Pourcentage	26%	24%	44%	6%	100%

5.1.3. Temps de production

Les systèmes automatisés industriels ont la capacité de fabriquer des produits rapidement en moins d'une minute selon 6 PME soit 11% des entreprises répondantes (4 PME dans le secteur automobile et une entreprise de chaque secteur restant).

Avec un taux de 43% soit 23 PME, plus que la moitié des PME ont des systèmes automatisés qui fabriquent des produits dans une durée entre une et deux minutes, ces PME sont réparties entre 7 PME dans le textile et 8 PME de chaque autre secteur.

Concernant le temps de production entre 3 et 5 minutes, 28% des PME (soit 15 PME au total) déclarent que ce temps de fabrication est nécessaire pour les systèmes automatisés afin de produire un seul article, ce qui représente 12 PME dans le secteur textile, une seule PME dans l'agroalimentaire et deux PME dans l'automobile.

D'après 10 PME de notre échantillon soit 18%, les systèmes automatisés prennent un temps assez remarquable qui dépasse les cinq minutes pour produire un seul produit dans 6 PME du secteur textile et 2 PME des deux secteurs (tableau 10).

Tableau 10: Temps de production d'un seul bien par secteur

	Moins d'une minute	Entre 1 à 2 minutes	Entre 3 à 5 minutes	Plus de 5 minutes	Total
Textile	1	7	12	6	26
Agroalimentaire	1	8	1	2	12
Automobile	4	8	2	2	16
Total	6	23	15	10	54
Pourcentage	11%	43%	28%	18%	100%

5.1.4. Dépendance de la production dans les PME

L'analyse statistique a montré que plus de la moitié des PME (56% des PME soit 30 entreprises) ont déclaré que la quantité des produits fabriqués par les systèmes automatisés est destiné aux donneurs d'ordres c'est-à-dire que ces 30 PME sont des entreprises sous-traitantes, ces sous-traitantes sont réparties en 16 PME du secteur automobile, 11 PME de textile et 3 PME de l'agroalimentaire (tableau 11).

Par contre, la production de 14 entreprises subie à la concurrence et cela représente 26% d'eux, répartie entre 5 PME dans le textile et 9 PME dans l'agroalimentaire. En ce qui

concerne la production normale, 10 entreprises du secteur textile produisent des biens d'une façon normale soit 19% des PME.

Tableau 11: Dépendance de la production dans les PME

	Sous-traitance	Concurrence	Production normale	Total
Textile	11	5	10	26
Agroalimentaire	3	9	0	12
Automobile	16	0	0	16
Total	30	14	10	54
Pourcentage	56%	26%	18%	100%

5.1.5. Qualité de la production

Les systèmes automatisés produisent des biens jugés d'une excellente qualité selon 32 entreprises soit 59% des PME répondantes. Pour 13 PME qui représentent 24% des entreprises enquêtées la qualité des produits de ces systèmes est bonne, par contre 9 PME de notre échantillon soit 17% déclarent que la qualité des biens fabriqués par les systèmes automatisés est moyenne (figure 33).

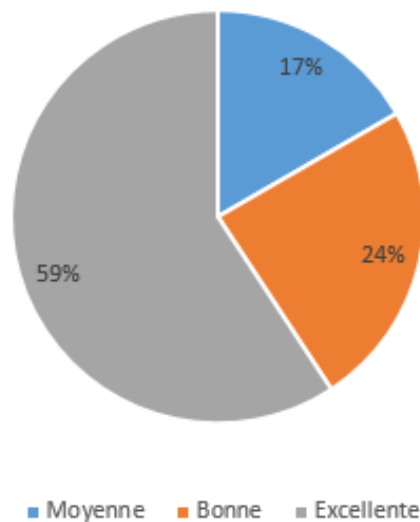


Figure 33: Qualité de production

5.1.6. Contrôle qualité de la production

D'après 33 PME participantes à notre étude soit 61%, le contrôle qualité est fait pour chaque produit fabriqué par les systèmes automatisés. 30% des entreprises soit 16 PME choisissent un échantillon de la production pour faire le contrôle qualité. Par contre, 5 PME ne s'intéressent pas au contrôle qualité du produit (figure 34).

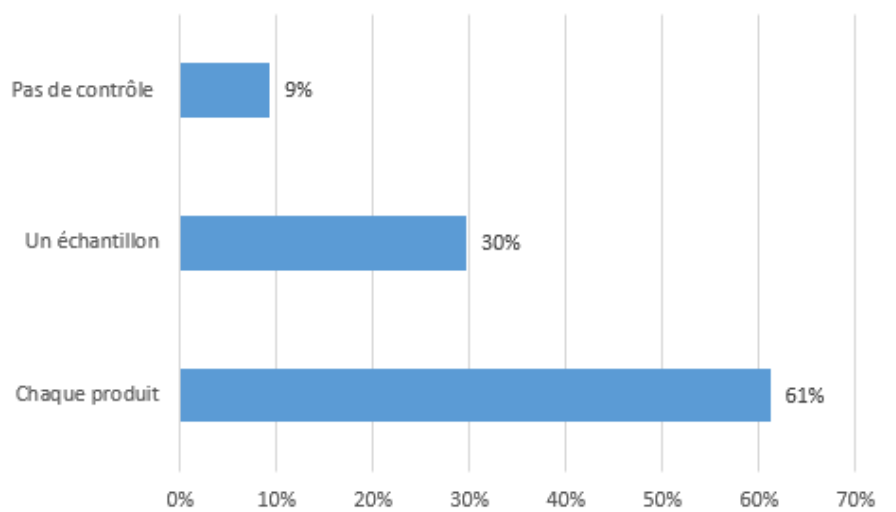


Figure 34: Type de contrôle qualité

5.1.7. Responsable du contrôle qualité

Que ce soit le type de contrôle qualité effectué, 29 PME (soit 54%) de notre étude confient cette tâche à leurs salariés, par contre 25 PME (soit 46%) consacrent des systèmes automatisés entiers pour faire le contrôle qualité des produits (figure 35).

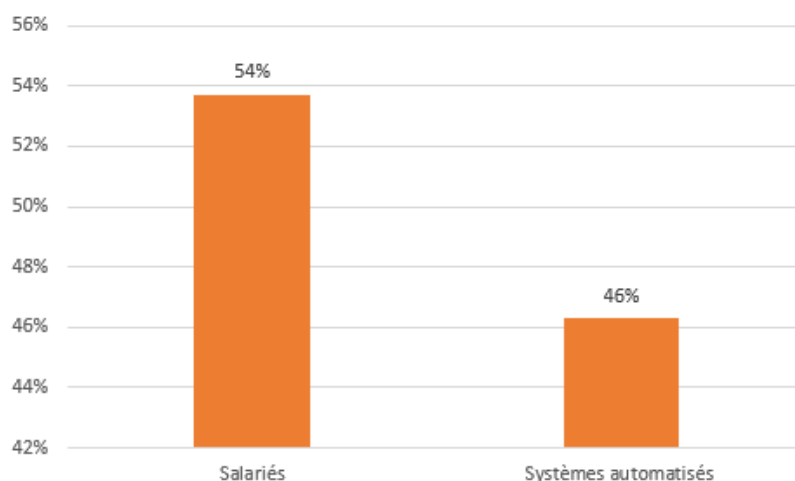


Figure 35: Responsable du contrôle qualité

5.1.8. Prix des produits

Concernant le prix des produits fabriqués par les systèmes automatisés, 36 entreprises (soit 67%) déclarent que le prix de leurs biens est moins cher par rapport à 18 PME (soit 33%) qui estiment que le prix de leurs produits est convenable. Aucune entreprise de notre étude a déclaré que le prix de son produit est cher (figure 36).

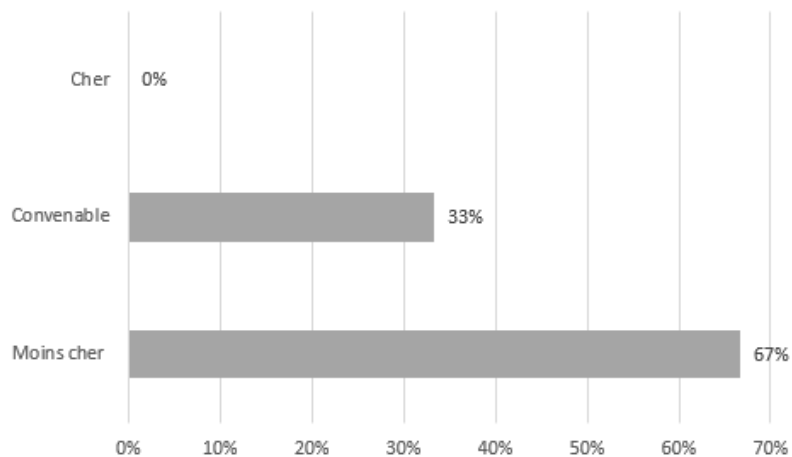


Figure 36: Prix des produits

5.1.9. Choix du prix de produits

Malgré le contexte économique difficile, 52% des entreprises (soit 28 PME) subissent de la concurrence acharnée c'est-à-dire que le prix de leurs productions dépend du prix des concurrents. 28% des PME déclarent que leurs prix ne sont que le prix de la production. Pour 20% des entreprises le choix de leurs prix est justifié par la qualité du produit fabriqué par les systèmes automatisés (figure 37).

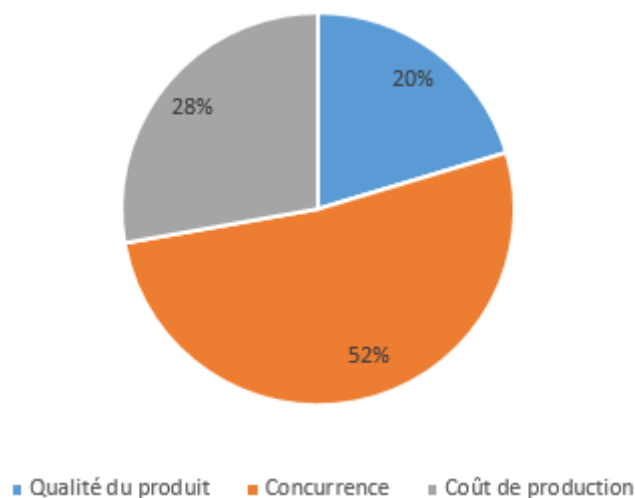


Figure 37: Choix du prix

5.1.10. Marché ciblé par les PME

Le marché local détient une grande partie, avec un taux de 52%, de la production industrielle faite par les entreprises participantes à notre étude à savoir 16 PME qui travaillent dans le secteur textile et 12 PME qui opèrent dans l'agroalimentaire.

Par contre l'export vient en deuxième place avec un pourcentage de 48%, par ce que 16 PME enquêtées du secteur automobile et que 10 PME du textile exportent toutes la production à l'étranger (tableau 12).

Tableau 12: Marché ciblé par les PME par secteur

	National	International	Total
Textile	16	10	26
Agroalimentaire	12	0	12
Automobile	0	16	16
Total	28	26	54
Pourcentage	52%	48%	100%

5.2. Aspect environnemental

5.2.1. Source énergétique utilisée

Le rôle que l'énergie joue dans le développement économique est très important, c'est pour cela que l'électricité a été choisie à l'unanimité (54 entreprises répondantes) comme la source d'énergie la plus utilisée par les trois secteurs de l'industrie marocaine par rapport aux deux autres types d'énergie proposées par notre enquête (solaire et fuel).

5.2.2. Consommation d'énergie

L'enjeu majeur de chaque industrie est la consommation énergétique. Les PME marocaines ont une consommation moyenne en électricité très variée (figure 38). 19% des PME ne dépassent pas 4000 KVA, ces PME font partie du secteur textile (soit 7 PME) et agroalimentaire (soit 3 PME). La consommation électrique de la tranche 4000 et 7000 KVA représente 26% des PME du secteur automobile (soit 3 PME) et agroalimentaire (soit 4 PME), par contre la tranche comprise entre 7000 et 10000 KVA est considérée comme la plus élevée par un pourcentage de 35% des PME des trois secteurs : textile (soit 7 PME), agroalimentaire (soit 4 PME) et automobile (soit 8 PME). 20% des PME consomment plus de 10000 KVA du secteur automobile (soit 5 PME), agroalimentaire (soit 1 PME) et textile (soit 5 PME).

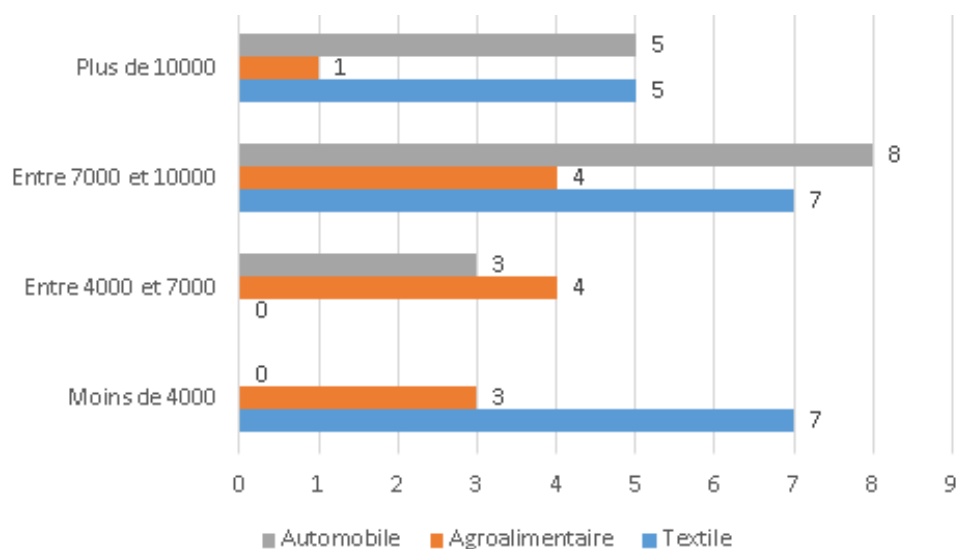


Figure 38: Consommation en électricité par secteur

5.2.3. Dispositifs consommateurs de l'électricité

D'après les PME de notre étude, les systèmes automatisés sont des énergivores (figure 39) c'est-à-dire qu'ils consomment davantage l'électricité par rapport aux autres dispositifs et cela dans les trois secteurs (26 PME du textile, 12 PME de l'agroalimentaire et 16 PME de l'automobile). Concernant la consommation des ordinateurs, elle vient en deuxième place dans chacun des deux secteurs : l'automobile par 14 PME et l'agroalimentaire par 7 PME. L'éclairage qui est considéré comme le moins consommateur de l'électricité dans les secteurs automobile (2 PME) et agroalimentaire (5 PME), il dépasse la consommation des ordinateurs dans le secteur textile (19 PME).

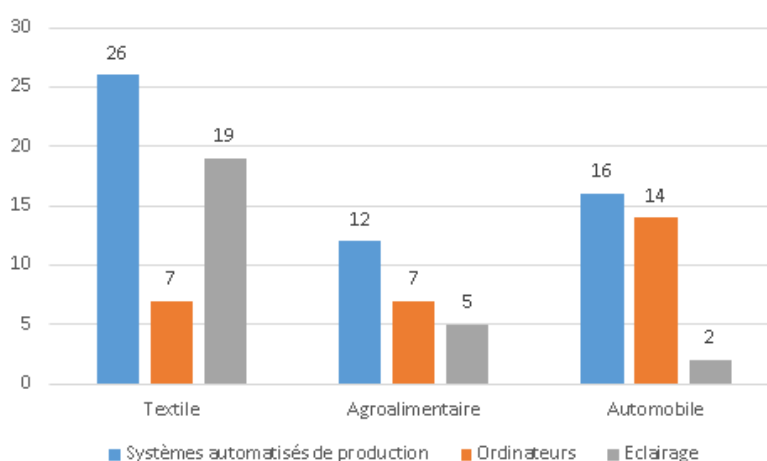


Figure 39: Dispositifs consommateurs de l'électricité

5.2.4. Durée de fonctionnement des systèmes automatisés

La consommation électrique des systèmes automatisés est très élevée c'est à cause de leurs fonctionnements sans cesse (figure 40). 85% des PME déclarent que ces systèmes d'automatisation fonctionnent 8 heures par jours, par contre 15% des PME laissent les systèmes de production fonctionner sans arrêt pendant 24 heures.

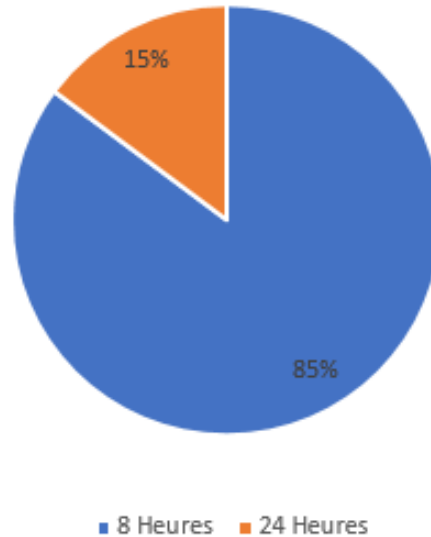


Figure 40: Durée de fonctionnement des systèmes automatisés

5.2.5. Souhait de réduction de la consommation en électricité

Toutes les 54 entreprises répondantes à notre étude démontrent une réelle volonté de réduire leurs factures d'électricité. 28% des PME déclarent qu'elles sont intéressées par les panneaux solaires, 31% des PME vont déléguer cette mission aux bureaux d'études et 41% des PME vont déminuer leurs consommations électriques par l'arrêt des machines inutiles (figure 41).

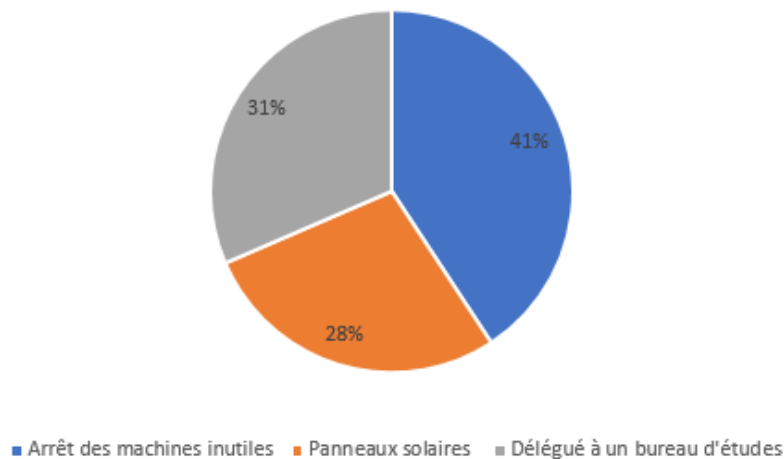


Figure 41: Souhait de réduction de la consommation en électricité

5.2.6. Arrêt des systèmes automatisés

Outre que les méthodes choisies par les PME marocaines pour réduire leurs factures (figure 42), elles sont également conscientes de l'importance de quelques habitudes qui aident à réduire la consommation électrique. 72% des PME (soit 39 entreprises) déclarent qu'elles coupent l'électricité à la fin de la journée, mais seulement 28% PME (soit 15 entreprises) ne s'intéresse pas à l'arrêt de leurs systèmes automatisés et elles les laissent en veille.

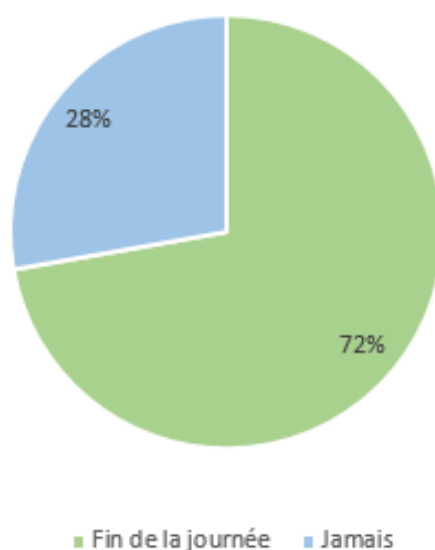


Figure 42: Arrêt des systèmes automatisés

5.2.7. Types de déchets industriels

Chaque petite et moyenne entreprise produit des déchets, ces derniers prennent trois formes essentielles (figure 43) : solides (végétaux, découpes animales, cartons, palettes, etc.), liquide (eaux usées, huiles végétales, huiles moteur, etc.) et gazeux (fumée, vapeur, etc.). Dans notre étude nous avons demandé aux PME de souligner les déchets les plus générés par leurs activités. D'après cela, nous avons constaté que 85% des PME (soit 46 PME) génèrent des déchets solides, les déchets liquides sont produits par 11% des PME (soit 6 PME) et que 4% des PME (soit 2 PME) jettent en air des déchets gazeux.

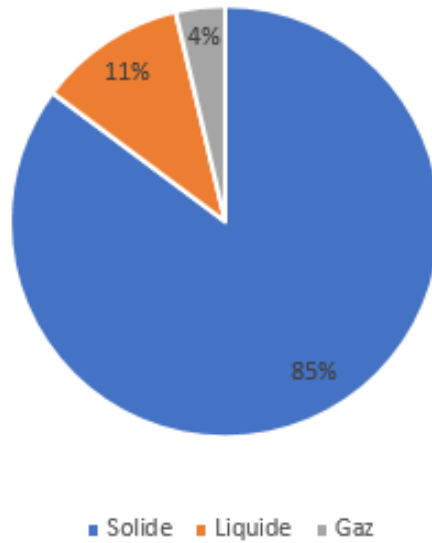


Figure 43: Types de déchets industriels

5.2.8. Gestion de déchets industriels

Chaque entreprise est amenée à gérer leurs déchets industriels (figure 44) quels que soient son secteur d'activité de façon à respecter l'environnement. 33% des PME recyclent leurs déchets, 41% des PME sous-traite la gestion de leurs déchets à des entreprises spécialistes en la matière et 26% des PME mettent leurs déchets dans la décharge.

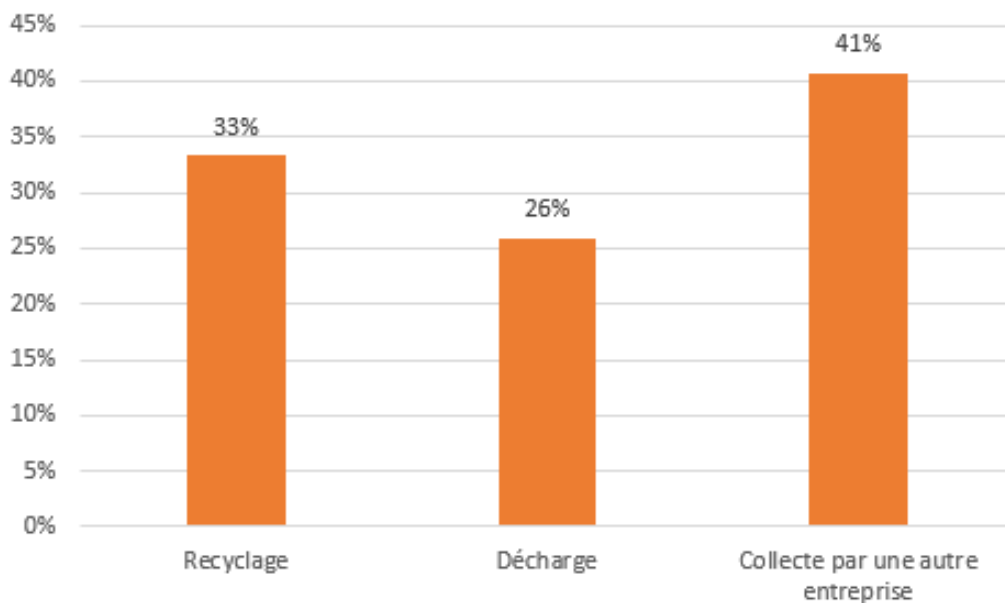


Figure 44: Gestion de déchets industriels

5.3. Aspect social

5.3.1. PME et la formation

En matière de la formation continue, les entreprises marocaines sont relativement impliquées dans la formation de leurs employés. Le secteur textile, vient à la dernière place (figure 45) dans la formation de ces personnels par 16%. Avec 52%, le domaine de l'automobile occupe la première place dans la formation de leurs collaborateurs, par contre le secteur agroalimentaire prend la deuxième place par 32%.

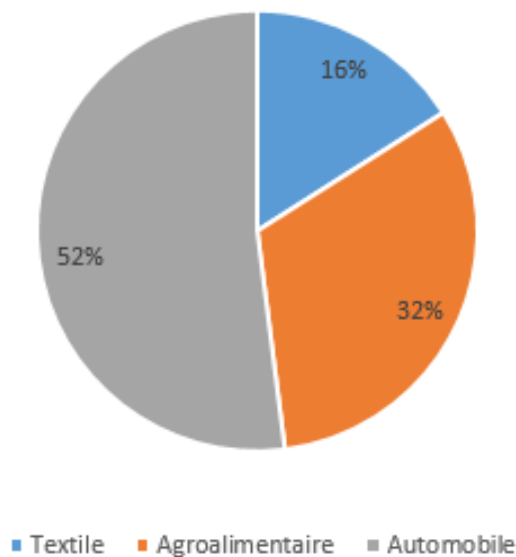


Figure 45: Répartition des PME formatrices par secteur

5.3.2. Formation des nouveaux recrutés

D'après l'analyse des données, nous constatons (figure 46) que les entreprises du secteur automobile requièrent des profils dont leurs cursus sont adaptés avec les besoins de l'entreprise (53%). En plus, elles consacrent plus de temps les à former (61%) sur les systèmes automatisés.

A propos du secteur textile, le cursus de 18% personnes recrutés est adapté aux besoins des entreprises de ce secteur, par contre 9% de ses recrutés bénéficient de la formation.

Pour le secteur agroalimentaire, les entreprises recrutent des personnes avec un cursus adapté à leurs besoins (29%). En plus, elles organisent des formations pour ces nouveaux recrutés (30%).

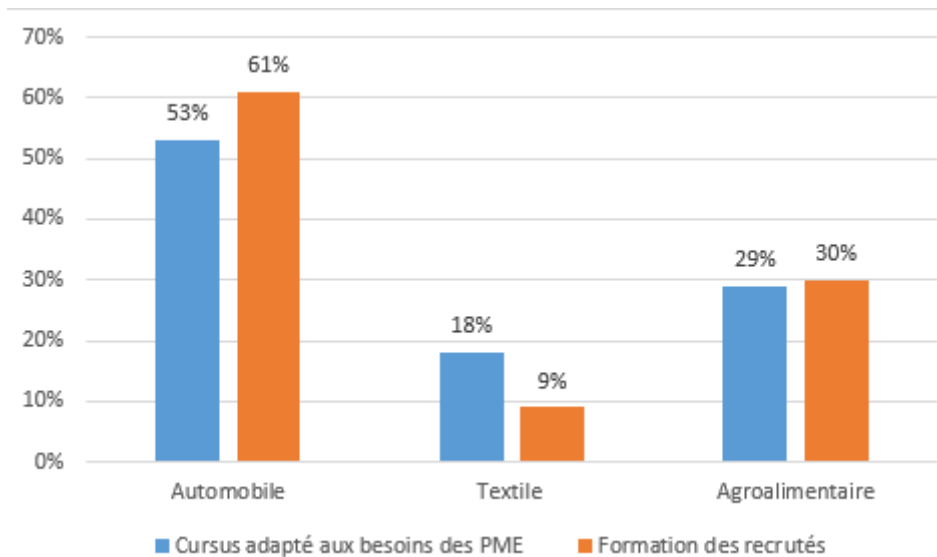


Figure 46: Formation des nouveaux recrutés

5.3.3. Genre et la formation

Le taux d'accès à la formation continue des hommes qui représente 73% (figure 47) est plus élevé par rapport à celui des femmes représentant 27%, ce qui explique que les métiers en relation avec les systèmes automatisés industriels sont dominés majoritairement par les hommes.

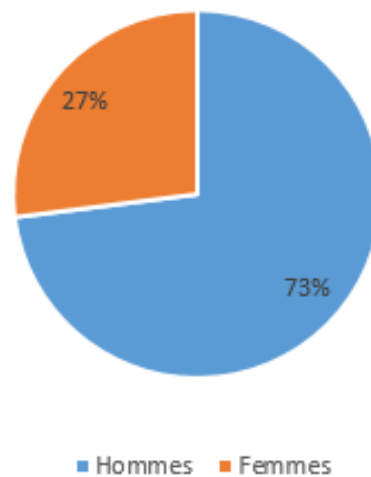


Figure 47: Répartition des formés par genre

5.3.4. Salariés formés par grade professionnel

L'étude faite montre que la participation à la formation continue, dans les PME marocaines, dépend essentiellement du grade professionnel (figure 48).

Les entreprises formatrices consacrent la grande partie des formations aux cadres, plus de 80% des cadres ont été formés plus de 5 fois. Concernant les agents des systèmes automatisés,

notamment les techniciens et les opérateurs, plus de 70% ont été bénéficiés à leurs tours de la formation, mais ils ne dépassaient pas 5 fois.

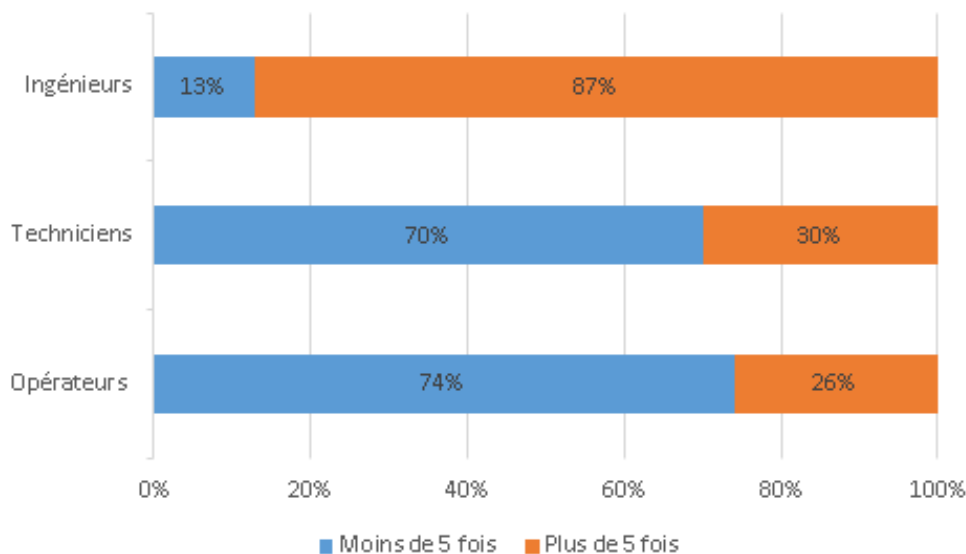


Figure 48: Nombre de formation par grade professionnel

5.3.5. Thèmes de formation

Au Maroc, selon la figure 49, les petites et moyennes entreprises s'intéressent par la formation continue aux nouvelles technologies et informatiques en premier lieu (33%), puis la thématique de l'hygiène, sécurité et condition de travail (19%) et celle de techniques industrielles (18%). Tous ce qui concerne le commerce, la vente et le marketing attire l'attention des PME marocaines (7%) mais ce n'est pas assez, en plus la formation structurée au tour des compétences de base a le même taux que la dernière thématique.

La formation spécifique à une fonction (14%) ne se fait que de temps en temps par ce que les PME comptent sur la formation initiale des salariés ou sur leurs expériences. Les changements qui se déroulent dans les PME ne sont pas très importants en vue des PME pour faire une formation, un pourcentage faible de ces entreprises (2%) qui organisent des formations associées à des changements dans l'organisation.

5.3.6. Modes de formation

La variété des modes de formation n'est pas équitable dans les PME marocaines (figure 50). La formation interne est la plus dominante (85%) par rapport aux autres modes de formation. Par contre la formation externe, dans n'importe quel organisme, est faible avec un taux de 12% ce qui explique que les PME ne préfèrent pas envoyer leurs salariés ailleurs de l'entreprise et craignent la diminution de la productivité. La formation par alternance est

rarement trouvée dans les PME marocaines, il y'a que 3% des formations par alternance et cela est dû à des conventions avec d'autres entreprises notamment les fournisseurs.

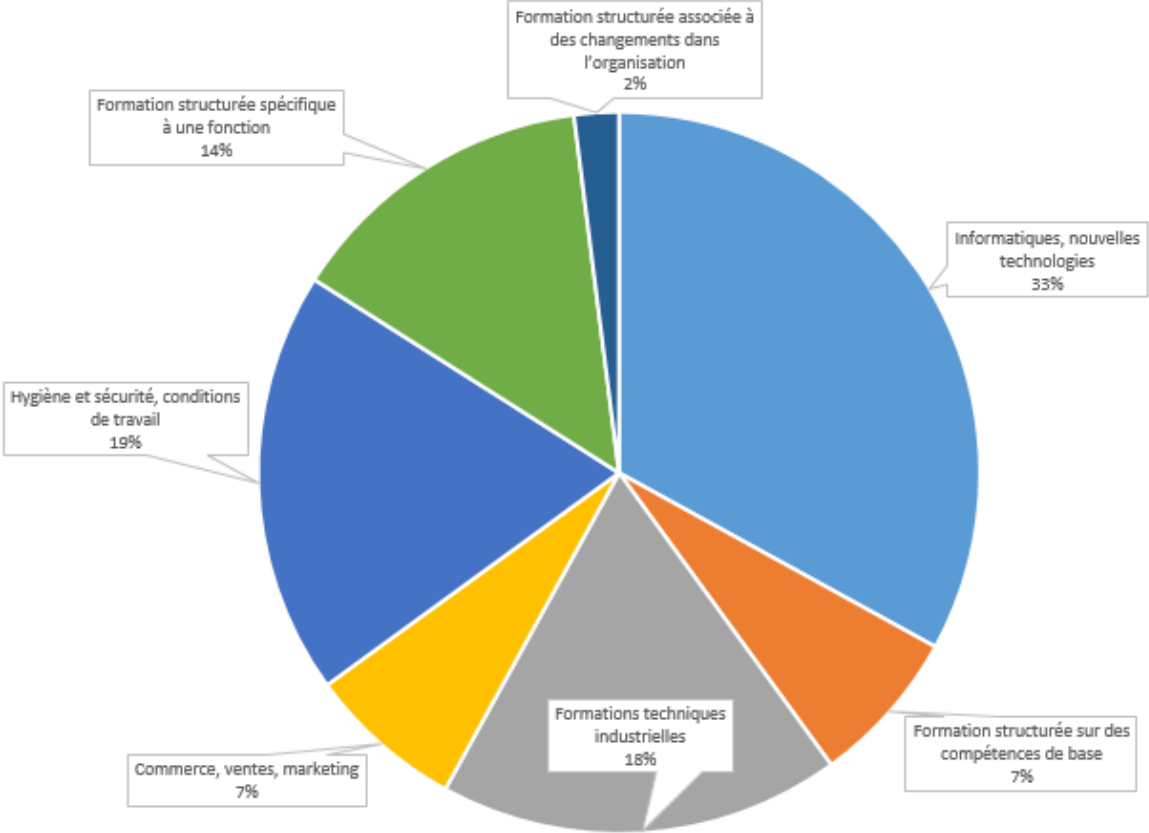


Figure 49: Thèmes de formation

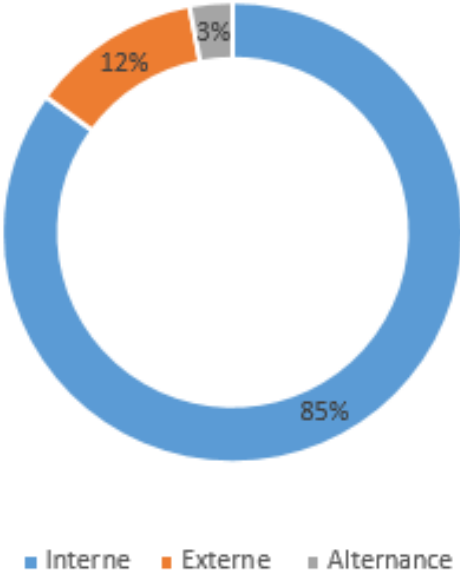


Figure 50: Modes de formation

5.3.7. Impact de la formation continue

Dans un contexte industriel où la concurrence est de plus en plus acharnée, les PME formatrices veulent avoir de l'impact direct et positif de la formation continue. Les figures (51, 52 et 53) en dessous présentent l'impact de la formation sur trois aspects (la personnalité, l'emploi et l'entreprise) tous secteurs confondus.

5.3.7.1. Impact de la formation sur la personnalité

Le premier avantage de la formation continue sur la personnalité est la ponctualité (figure 51), un taux assez remarquable (98%) par les PME des trois secteurs ce qui est considéré comme un indice positif pour les employeurs. L'aptitude à communiquer et être sociable est une compétence rare dans le personnel, elle atteint 80% après la formation. La motivation et l'intérêt pour les activités confiées aux salariés sont assez importants avec un pourcentage de 90%. En plus, la capacité à travailler en équipe (91%), dont elle est l'art d'aider les collègues dans une activité commune, et la gestion des conflits (80%) sont des compétences très estimées par les employeurs.

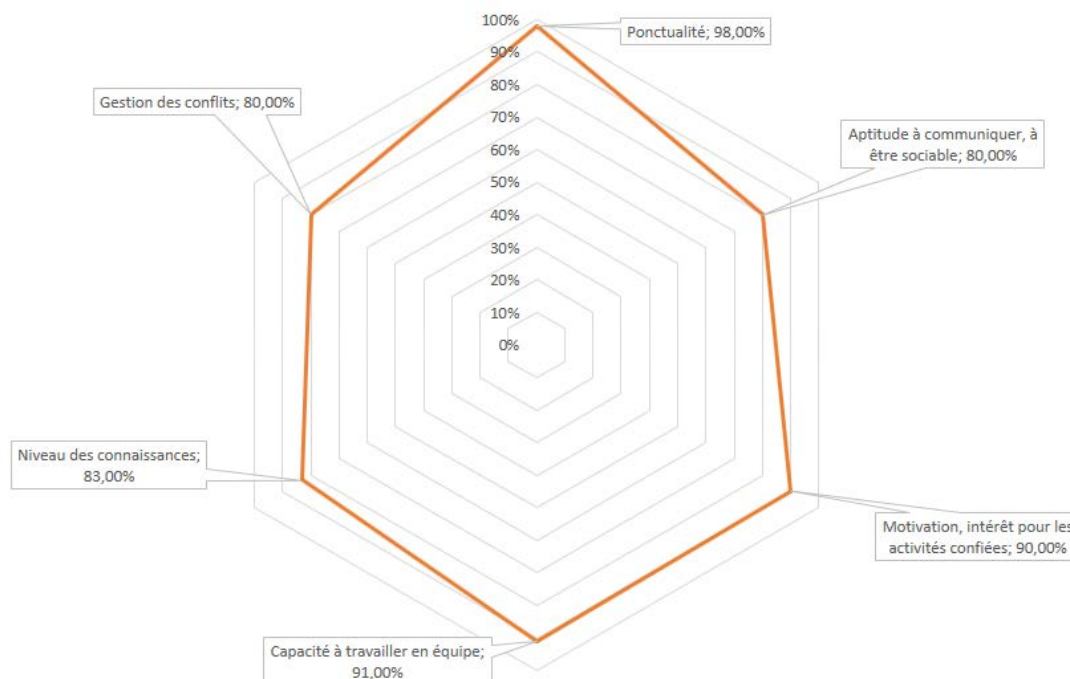


Figure 51: Impact de la formation sur la personnalité

5.3.7.2. Impact de la formation sur l'emploi

A propos de l'impact qui concerne le travail effectué, selon la figure 52, les résultats montrent que la capacité à travailler de façon autonome et efficace, et la qualité du travail réalisé ont tous les deux atteint un pourcentage trop important (95%), pourtant le niveau de compétences, de savoir-faire et la capacité à s'adapter aux objectifs, besoins, exigence et

contraintes de la mission ont eux aussi ne dépassent pas les 89%. En outre, 93% est la capacité à organiser le travail ce qui explique une productivité assez importante.

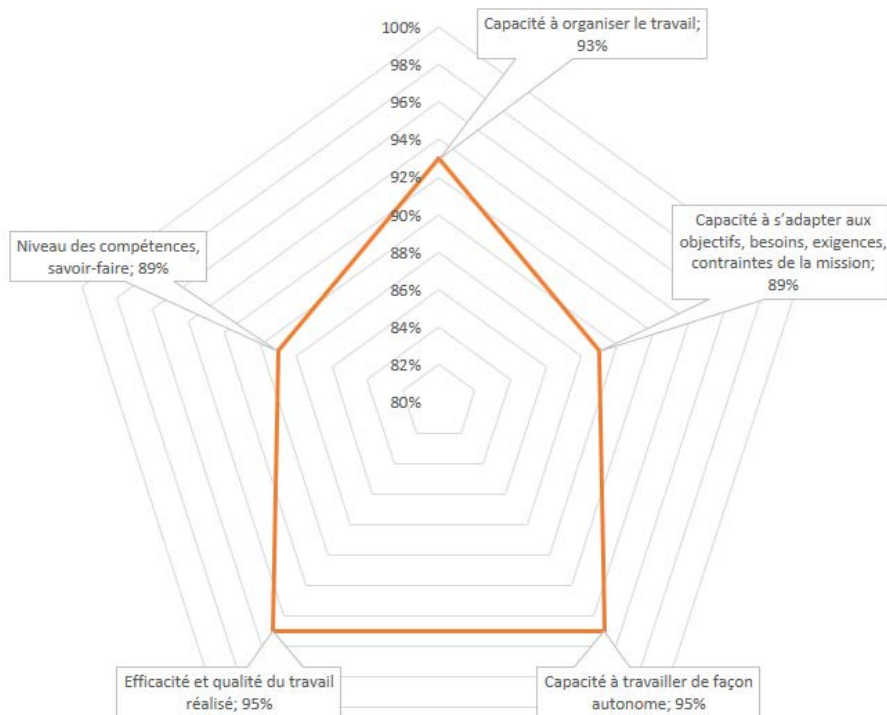


Figure 52: Impact de la formation sur l'emploi

5.3.7.3. Impact de la formation sur l'entreprise

Le changement ressenti par les employeurs après la formation de leurs personnels, (figure 53), est en premier lieu l'augmentation de la productivité de leurs salariés par un taux de 86% ce qui est très significatif pour l'entreprise, ensuite la compétitivité de l'entreprise elle-même par 93%, et en fin l'adaptation dans l'entreprise par 95%.

Les formations dispensées par les entreprises en faveur de leurs salariés et les investissements établis dans les systèmes automatisés visent généralement à accroître la productivité (86%), réduire le coût des opérations (98%), diminuer les déchets (95%), augmenter la sécurité du travail (73%) et avoir bien sûr une meilleure qualité du produit (97%).

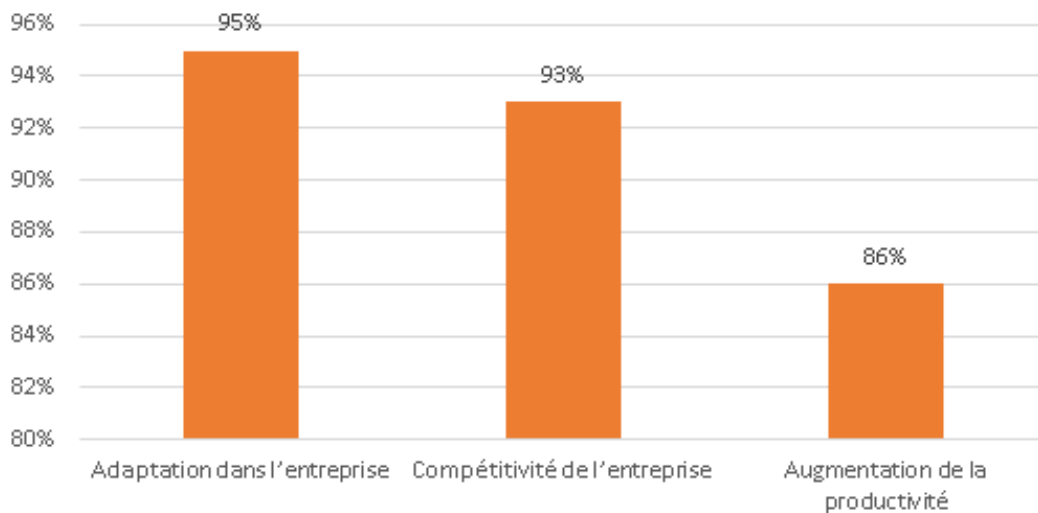


Figure 53: Impact de la formation sur l'entreprise

5.3.8. Degré d'atteinte des objectifs de formation

La finalité des formations est l'atteinte des objectifs visés par les entreprises (figure 54). 67% des PME marocaines déclarent que les objectifs de la formation sont atteints de 50% à 70%, seulement 7% des entreprises atteignent presque tous les objectifs de la formation c'est-à-dire entre 70% et 100%. Par contre, la formation dans 26% de PME enquêtées aboutissent à un résultat modeste dont il est entre 20% et 50%.

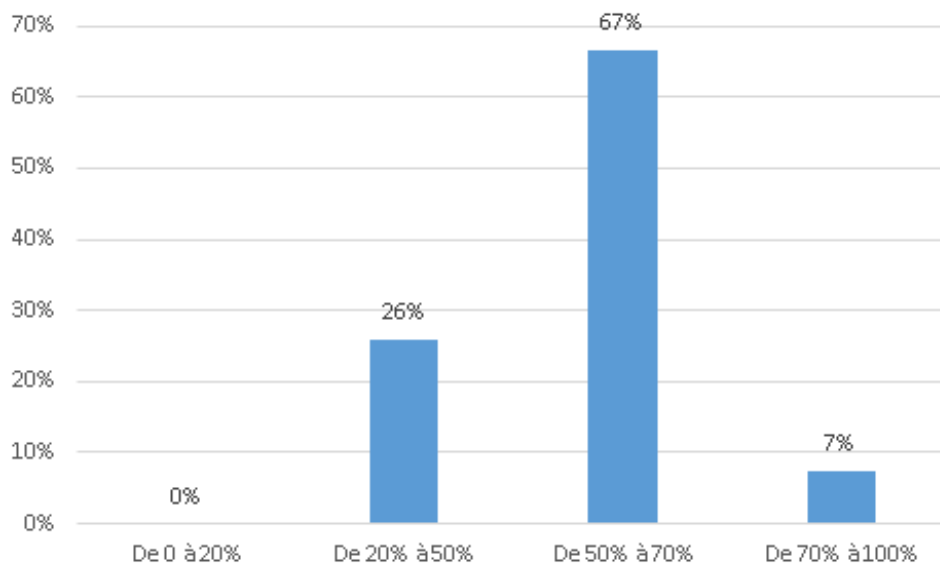


Figure 54: Degré d'atteinte des objectifs de formation

5.4. Niveau d'automatisation dans les PME

5.4.1. Nombre de systèmes automatisés

Les systèmes automatisés sont présents dans les activités industrielles, une telle présence n'est pas équitable et elle varie d'un secteur à l'autre (figure 55).

- Dans le secteur textile l'étude dévoile que le taux des équipements automatisés industriels est faible dans les petites et moyennes entreprises marocaines. 45% des PME opérant dans le textile ont moins de 10 systèmes automatisés, par contre les PME qui ont entre 10 et 20 systèmes ne dépassent pas 34% et celles qui dépassent 20 équipements sont à peu près 21%.
- Par ailleurs, environ 15% des PME du milieu agroalimentaire qui ont moins de 10 systèmes automatisés, 36% des entreprises industrielles ont entre 10 et 20 systèmes de production, pour plus de 20 équipements le taux des PME agroalimentaires est 49%.
- A propos du secteur automobile, 67% des entreprises se dotent de plus de 20 systèmes automatisés, par contre 9% de ces dernières ont moins de 10 équipements et 24% ont entre 10 et 20 systèmes d'automatisation.

La différence de ces pourcentages entre les trois secteurs industriels est due essentiellement aux exigences des clients, à la délicatesse des tâches effectuées et à la nature du marché envisagé (marché local ou international), par exemple les clients du secteur automobile exigent des pièces respectant les normes de sécurité et de précision à l'ordre de micromètre.

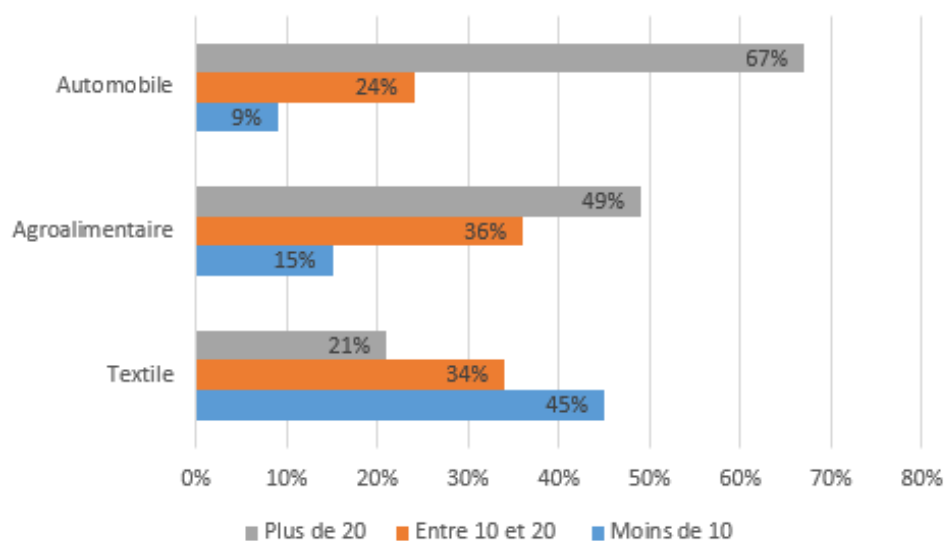


Figure 55: Taux des systèmes automatisés dans les PME dans les 3 secteurs

5.4.2. Installation des systèmes automatisés

La majorité des petites et moyennes entreprises interrogées, à peu près 96%, déclarent qu'elles ont installés les systèmes automatisés le premier jour de la création de l'entreprise. Par contre 4% des PME, issues du secteur automobile, poursuivaient leurs investissements dans le développement de leurs chaînes de production plus tard. L'ajout de nouveaux systèmes automatisés est dû au lancement d'un nouveau produit ou après l'expansion.

5.4.3. Utilisation des systèmes automatisés

La figure 56 montre que les utilisateurs des systèmes automatisés dans les entreprises sont les opérateurs avec 74% dont ils sont classés en premier rang, et 21% des techniciens connaissent bien comment travailler avec ces équipements.

Par contre, une partie des ingénieurs estimée par 5% manipule les systèmes de production, ce taux est jugé soit par leurs responsabilités de la chaîne de production, par le lancement d'un nouveau produit ou bien pour faire la maintenance.

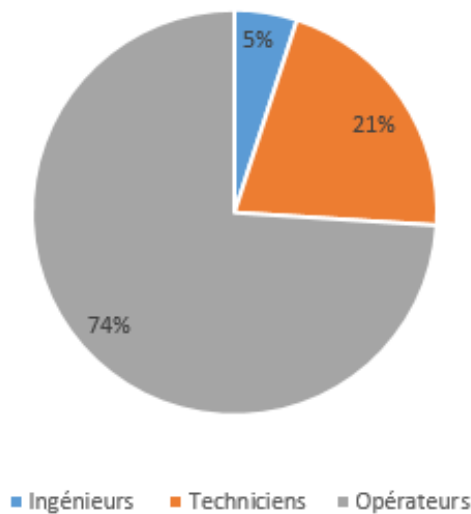


Figure 56: Utilisation des systèmes automatisés

5.4.4. Niveau de compétences pour utiliser les systèmes automatisés

En fait, les PME des trois secteurs industriels avouent, après le questionnement, que les compétences nécessaires pour l'utilisation des systèmes automatisés de production diffèrent d'un secteur à l'autre (figure 57).

- Le secteur automobile déclare que 72% de leurs employés ont plus de 70% des compétences nécessaires à l'utilisation des systèmes automatisés, 25% des utilisateurs de ces systèmes ont entre 50% et 70% des compétences, et le 3% qui reste réparti en 2% qui ont des compétences entre 20% et 50%, et enfin 1% de moins de 20% des compétences.
- En ce qui concerne l'agroalimentaire, le taux des employés qui ont plus de 70% des compétences est un peu faible avec 7%, ceux qui ont des compétences entre 20% et 50% pour utiliser les systèmes de production sont estimés par 48% de personnes. Le pourcentage de ceux qui ont des compétences entre 50% et 70% est à peu près 32% et ceux qui ont moins de 20% des compétences sont 13%.

- Le secteur textile se caractérise également par un faible pourcentage, seulement 2%, des compétences plus de 70% de leurs salariés. 16% des utilisateurs d'automatisation qui ont entre 50% et 70% des compétences, ceux qui ont des compétences entre 20% et 50% sont estimés par 26%, et plus de la moitié de ces utilisateurs, 56% de personnes, ont moins de 20% des compétences.

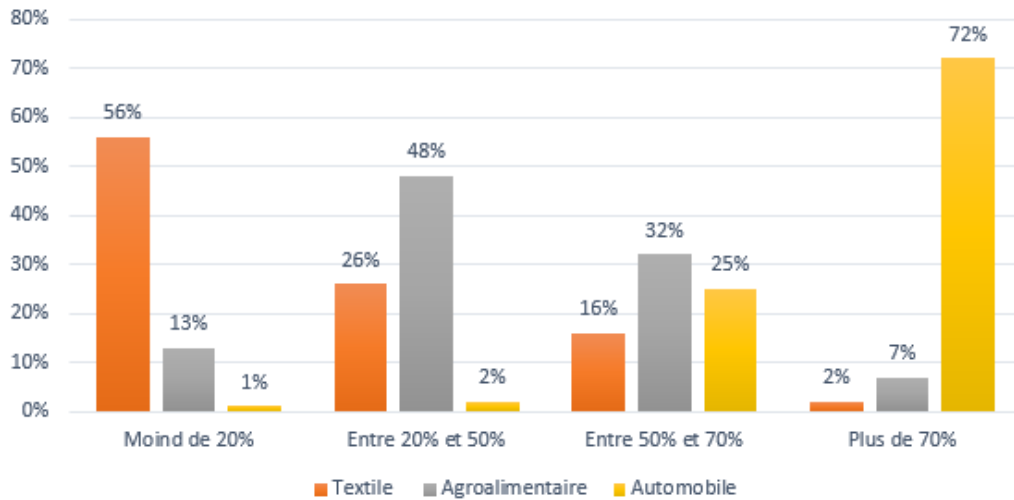


Figure 57: Niveau de compétences par secteur à utiliser les systèmes automatisés

5.4.5. Réseaux locaux industriels dans les PME

Parmi les 5 réseaux locaux industriels RLI (Profibus, Modbus, Inter-bus, Ethernet/IP et As-interface), proposés dans cette étude, seulement 3 réseaux présents dans 72% de PME de l'industrie marocaine (figure 58). Le réseau industriel le plus utilisé dans ces PME est le Profibus par 44%. Ensuite le fameux réseau industriel Ethernet/IP vient à la deuxième place avec un pourcentage de 33%. Enfin celui de la société MODICON, le protocole Modbus représente 23% de sa présence dans l'industrie marocaine.

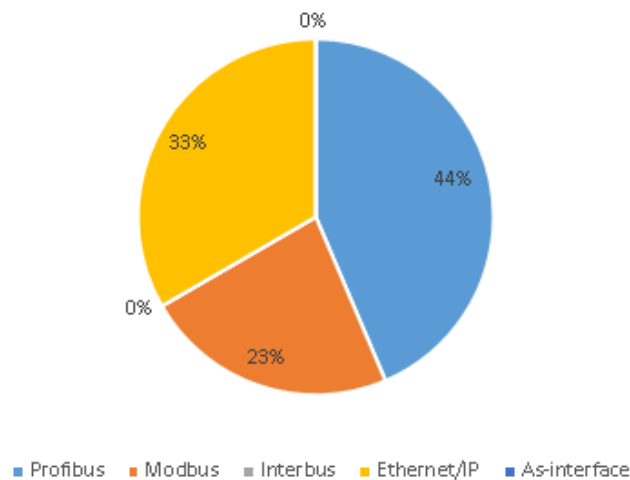


Figure 58: Réseaux locaux industriels dans les PME

5.4.6. Raisons de ne pas avoir un RLI

28% des PME de notre étude sont toutes issues du secteur textile n'ont pas de réseau local industriel. 53% de ces PME, ce qui représente la majorité, disent que ce réseau industriel n'est pas nécessaire et 20% craignent la perte d'argent en investissant dans ce réseau. Par contre, 27% veulent l'installer mais l'opportunité ne s'est pas encore présentée (figure 59).

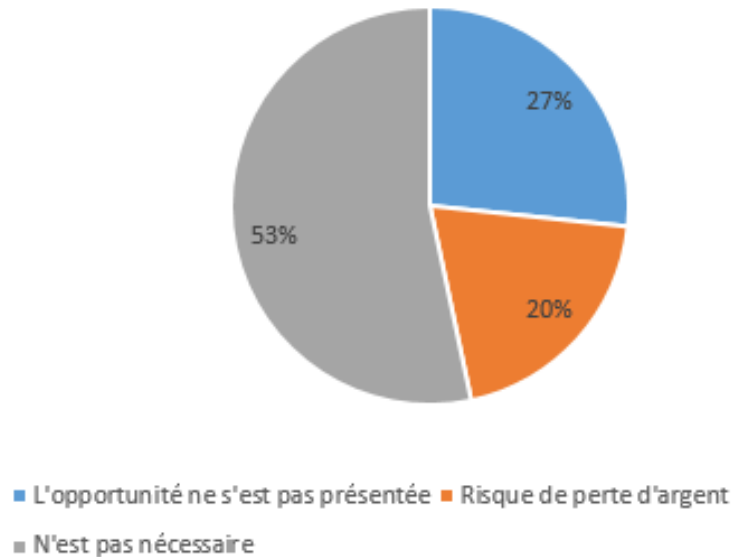


Figure 59: Raisons de ne pas avoir un RLI

5.4.7. Supervision dans les PME

C'est une évidence que 72% des PME qui ont des réseaux locaux industriels disposent également de la supervision, par contre 28% des PME qui n'ont pas de RLI n'ont pas de la supervision (figure 60).

D'après ces 39 entreprises, qui disposent de la supervision, avouent que 49% des techniciens et 44% des opérateurs se chargent totalement de la supervision dans l'entreprise. Par contre, seulement 7% des ingénieurs s'occupent du contrôle commande au sein de l'entreprise.

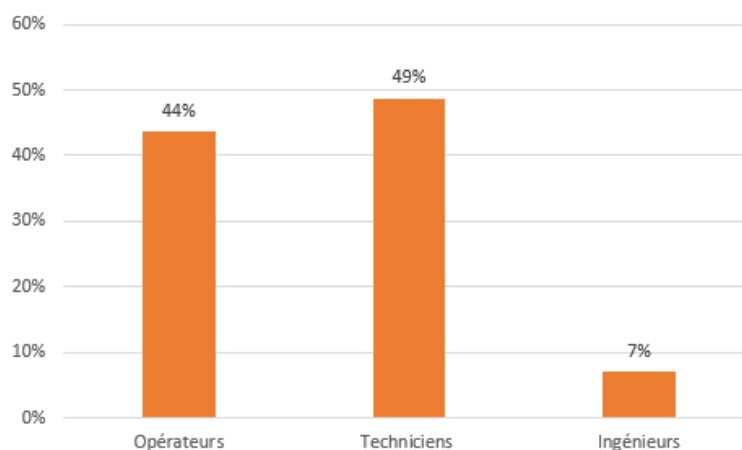


Figure 60: Supervision dans les PME

5.4.8. Impact des systèmes automatisés sur l'emploi

93% des PME répondantes à notre étude déclarent que les systèmes automatisés ont un impact neutre sur l'effectif de leurs salariés, et 7% des entreprises ont recrutés de nouveaux personnels pour travailler sur les systèmes automatisés (figure 61). Par contre, aucune de ces PME a licencié leur salarié à cause de l'automatisation, mais d'autres facteurs peuvent en exister.

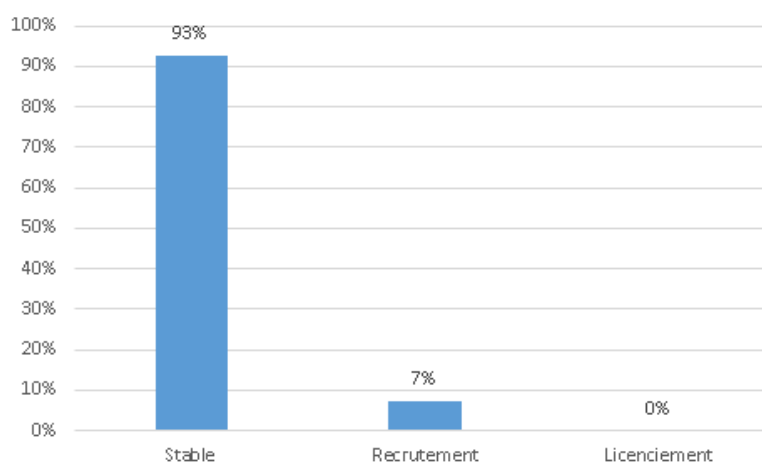


Figure 61: Impact des systèmes automatisés sur l'emploi

6. Interprétation des résultats de l'étude

6.1. Grandeur économique des PME

La production des petites et moyennes entreprises marocaines est caractérisée par la diversité et la rapidité, elle répond aux besoins et aux attentes du marché national et vise l'international par l'exportation grâce à la production de masse à l'aide des systèmes automatisés. Malgré que la majorité des PME possèdent une seule équipe travaillant que 8

heures par jour, les produits fabriqués par l'automatisation sont jugés d'une excellente qualité, même si la majorité de la production est issue de la sous-traitance.

L'opération du contrôle qualité des biens est incluse dans les PME marocaines, parce que chaque produit soumis à un test de conformité afin de vérifier si le produit est conforme ou non. Les moyens appropriés de contrôle qualité sont disponibles dans le marché national et international, et malgré leurs disponibilités une grande partie des PME préfèrent effectuer ce test par l'être humain.

Certes que le prix des produits ne reflète pas la bonne ou la mauvaise qualité, mais il existe plusieurs facteurs qui peuvent indiquer la qualité de produits. Les PME interrogées ont déclaré que le prix de leurs produits est moins cher, puisque les concurrents vendent les mêmes produits avec un prix similaire, c'est-à-dire que le prix a été obligé par la concurrence et n'est pas par l'entreprise.

6.2. Aspect environnemental

L'électricité est la source d'énergie la plus utilisée dans toutes les PME du secteur : automobile, textile et agroalimentaire. La consommation électrique dans ces PME dépend de plusieurs dispositifs tel que les ordinateurs, l'éclairage et les systèmes automatisés, mais ces derniers consomment énormément d'énergie. Malgré que la durée de fonctionnement des systèmes automatisés soit 8 heures par jour, leurs consommations d'électricité restent très élevées et la plus préférées par rapport aux autres sources énergétiques.

Plusieurs PME considèrent que la facture d'électricité est une charge financière qui freine la réalisation du bénéfice pour l'entreprise, cependant une volonté assez remarquable par celle-ci pour réduire la consommation électrique, ressentie lors de notre étude, il s'agit des gestes simples et conscients qui permettent d'économiser la consommation électrique et par conséquent la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable.

Pour que les PME maintiennent une meilleure compétitivité, l'allégement de la consommation énergétique des systèmes automatisés est essentiel. Ainsi, plusieurs recherches scientifiques sont impliquées dans la réduction de la consommation électrique des systèmes automatisés afin d'optimiser la consommation énergétique de l'automatisation [16]. En outre, l'adoption d'une source d'énergie alternative, tel que les panneaux solaires par les PME, diminue les coûts énergétiques et augmente la performance et la compétitivité économique [99], cette solution est adaptée par les grandes entreprises dont elles ont déjà installé les

panneaux solaires sur le toit de leur site de production afin de protéger l'environnement et minimiser la facture d'électricité.

En plus, les déchets industriels représentent également un problème sérieux pour les PME puisque tous les types de déchets sont présents dans l'industrie marocaine (solide, liquide et gazeux) et leurs traitements est complexe un peu. Les accords signés durant la conférence internationale sur le climat COP21 à Paris et COP22 à Marrakech, ainsi que l'engagement dans le développement durable au niveau du pays rendent l'intervention plus délicate.

La valorisation des déchets industriels est devenue une nécessité pour toute entreprise, c'est pour cette raison les PME s'orientent vers l'adoption du traitement écologique tel que le recyclage dont il commence à avoir une grande place dans les PME marocains. Les moyens nécessaires pour faire le recyclage au niveau interne des entreprises ne sont pas à la portée de ces PME, ce qui les pousse à chercher d'autres alternatives comme la sous-traitance de la collecte et le recyclage des déchets industriels.

L'impact des entreprises, d'une manière générale, sur l'environnement est considéré comme une menace réelle pour les générations futures, pour cela les entreprises adoptent l'approche du développement durable afin de minimiser leur effet environnemental. Cette adoption de la part des PME n'est pas volontaire malheureusement, mais elle est soumise à des pressions gouvernementales et elle est exigeante également pour avoir le label de la responsabilité sociales des entreprises RSE.

6.3. Aspect social

Les défis rencontrés par les PME sont multiples, mais le capital humain doit être sur la première ligne de la to-do-liste des ressources humaines. La formation des salariés reflète une importance et une reconnaissance de la part de l'entreprise en faveur de ces salariés.

Les PME qui organisent des formations régulières à leurs personnels sont celles qui investissent dans les nouvelles technologies et celles qui consacrent la totalité ou une partie de leurs productions à l'export. Pourtant, elles préfèrent les ingénieurs et les techniciens pour bénéficier des formations par rapport aux opérateurs. L'équité entre les bénéficiaires de la formation n'est pas présente car il y'a une préférence encore une fois sur le genre. Les femmes sont moins formées en comparaison par les hommes, cela est dû à la prédominance des hommes dans les catégories ingénieurs et techniciens plus que les opérateurs (voir figure 4, p15).

La question de modernité occupe l'intérêt de toute entreprise ce qui est tout à fait légitime, c'est pour cela que les PME consacrent la majorité des thèmes de formation sur les nouvelles technologies. Plusieurs modes de formations sont appliqués dans les PME mais le nouveau mode de formation e-learning est négligeable, ce qui représente une contradiction de ces dernières puisqu'elles cherchent à être moderne mais elles ne profitent pas des nouveaux outils technologiques pour les formations.

Les formations dispensées créent un impact positif sur les formés, sur les tâches effectuées et sur l'entreprise. La productivité des salariés formés est ressentie par les PME, ils deviennent plus autonomes dans l'exécution des tâches et plus productifs notamment après l'acquisition de nouvelles compétences. Cette observation permet à l'entreprise d'être plus soulagée car les formations atteignent les objectifs escomptés de la formation.

La place dans les PME est dédiée que pour les salariés les plus compétents et ceux qui ont la capacité d'acquérir de nouvelles compétences notamment avec l'avènement de l'industrie 4.0. Le niveau de la formation des salariés dans les PME marocaines est considéré faible [4], malgré les efforts établis par quelques-unes pour assurer les formations à leurs personnels. La plupart des entreprises qui ne s'intéressent pas à la formation préfèrent recruter des personnes compétentes dès le début au lieu de voir les salariés formés quitter l'entreprise formatrice [94]. Pourtant, les compétences doivent être à jour par des formations, dès que possible, puisque le monde se caractérise par un changement rapide et les compétences deviennent de plus en plus obsolètes. En outre, ces personnes formées sont considérées comme un atout pour les PME face aux autres concurrents.

Plusieurs recherches mettent en exergue le rôle de la formation dans l'augmentation de la productivité et la performance des salariés dans la médecine, la conduite, la chirurgie, la mécanique, le militaire et l'aviation [100]. Dans le contexte industriel, les formations ne devront plus considérer comme une option pour les PME mais une nécessité parce que les salariés formés dans les techniques liées au changement technologique seront les plus adaptables à ce progrès et les plus favorisés. Elles sont une source de motivation de plus pour les salariés puisqu'elles leurs permettent d'acquérir de nouvelles compétences.

Malheureusement, l'importance de la formation n'est pas assimilée et sa valeur n'est pas encore appréciée par les PME [4]. Par contre, les obstacles rencontrés par les PME lorsqu'elles veulent organiser les formations [94] ont été décrit par plusieurs chercheurs, et ils

concluait que la formation est un élément clé et important dans la constitution et le maintien d'une main-d'œuvre efficace [100], [101].

6.4. Niveau d'automatisation dans les PME

Le niveau d'automatisation dans les PME marocaines est modeste [102]. Malgré ça, le secteur automobile présente une forte adoption et investissement dans les systèmes automatisés par rapport aux secteurs agroalimentaire et textile. Cette implication est due essentiellement aux exigences de la clientèle du secteur automobile au niveau du globe.

La nouvelle technologie installée dans les PME demande des personnels qualifiés voire polyvalents afin de bien manipuler ces systèmes sans risque et avec une précaution élevée. Ceux qui utilisent habituellement les systèmes automatisés de production dans tous les secteurs étudiés sont les opérateurs, et ils prennent en charge la supervision des installations avec l'aide des réseaux locaux industriels performants tel que Profibus. Les opérateurs du secteur automobile sont plus compétents que ceux des autres secteurs, notamment dans l'utilisation de la communication industrielle qui est quasi négligeable dans le textile.

D'après notre étude, le licenciement n'est pas présent dans les PME étudiées, c'est-à-dire que la cause principale du licenciement des salariés n'est pas due essentiellement à l'automatisation des processus industriels. Ceux et celles qui ont commis une faute grave affectant la production ou le fonctionnement de l'entreprise sont directement licenciés, et concernant les personnels non productifs les PME leur donnent une autre chance afin de progresser dans leurs carrières, sinon ils seront obligés de les licencier [103]. A propos du recrutement, il est remarquable dans notre PME avec un taux faible malgré l'existence des systèmes automatisés.

L'hypothèse de la substitution de l'être humain dans l'industrie par les systèmes automatisés industriels est réfutée par les résultats en dessus, mais le risque est toujours présent pour les agents des systèmes automatisés, surtout que les tâches routinières qui ne demandent pas des capacités cognitives sont les plus susceptibles d'être automatisées [104] dans les prochaines années, et celles qui demandent de la capacité cognitive, même si elles sont routinières, sont difficiles à l'automatisées prochainement.

Les perturbations technologiques vont affecter, au fur et à mesure, toutes les entreprises que ce soit leurs tailles ou leurs lieux et aucune ne sera à l'abri de ces perturbations. Une telle situation exige une bonne préparation de la part des deux : PME et salariés. La préparation des PME est représentée par l'investissement dans les nouvelles technologies, l'adoption de

nouveaux systèmes automatisés dans les PME engendre un accroissement économique de ces dernières c'est-à-dire la quantité produite des biens sera moins chère ce qui encouragera l'achat. Et celle des salariés est représentée par leurs encouragements à acquérir de nouvelles compétences qui seront compatibles avec cette technologie.

Les employés peuvent être réaffecté aux nouveaux postes créés par la nouvelle installation de l'automatisation. Certes, il y'aura des salariés ne possédant pas les compétences pour cette réaffectation, mais les PME doivent les aider afin d'acquérir les compétences nécessaires dont ils auront besoin pour cette réaffectation. Parmi l'aide que l'entreprise peut présenter à leur personnel est la formation. Elle peut être considérée comme une solution qui aidera les opérateurs à se perfectionner dans la manipulation de l'automatisation dans les deux situations : normales et anormales [105].

7. Conclusion

Ce chapitre a été divisé sur trois parties. La première est constituée du contexte de l'étude d'où nous avons montré l'intérêt du choix des secteurs industriels (textile, agroalimentaire et automobile) et leurs villes respectivement (Fès, Casablanca et Tanger). La deuxième a été consacrée pour l'élaboration des différents volets du questionnaire (Entreprise, Economie, Environnement, Social et Automatisation) et la méthode utilisée pour collecter les données. Et la dernière partie pour présenter les résultats obtenus dans chaque volet et son interprétation.

Chapitre 4

Contribution à l'amélioration des
compétences des agents de SAP
industriels via l'e-learning

1. Introduction

Nous allons mettre en exergue, dans ce chapitre, l'importance des compétences et leurs types, ainsi que les modes d'acquisition de ces compétences liées au contexte industriel. Nous présenterons l'élaboration, la conception et la modélisation de la plateforme de formation des agents des systèmes automatisés industriels en se basant sur le modèle d'acceptance de la technologie.

2. De l'artisanat à la qualification

Le terme ouvrier définissait tous les artisans du 18^{ème} siècle quel que soit leurs métiers. Plus tard, notamment avec la révolution industrielle, ce terme désigne ceux qui travaillent manuellement dont leur fonction principale est la production en échangeant ce service par un salaire. Cette évolution du vocabulaire exprime les mutations de la société.

La cupidité conduisait les patronats du 19^{ème} siècle à exiger un travail toujours plus intense pour la maximisation du profit, surtout avec le développement de l'éclairage au gaz qui a permis l'allongement de la journée de travail qui pouvait atteindre 15 heures par jours dans la plupart des usines. Les ouvriers n'avaient droit qu'à une journée de repos hebdomadaire.

En raison de la croissance démographique et de l'exode rural, les travailleurs étaient plus nombreux et commençaient à dépasser les emplois disponibles. Le chômage était chronique, ce qui permettait au patronat de maintenir de bas salaires et d'exercer une pression constante sur les salariés afin d'augmenter la productivité. Dans les usines les règlements imposés étaient très sévères. En plus de tout manquement qui était sanctionné par une amende voire un licenciement, la fatigue permanente et les conditions de travail pénibles multipliaient les risques d'accidents du travail.

Durant la révolution industrielle, les usines s'équipaient avec des machines de fabrication connues plus tard par les systèmes automatisés. Cette intégration des systèmes a eu un apport relativement positif pour les ouvriers : un petit soulagement concernant les tâches dangereuses. L'automatisation s'occupait du travail qui demandait une grande force et contribuait à la diminution des heures de travail pour les ouvriers. Certes que c'est un avantage pour les employés mais les conditions de travail restaient toujours pénibles, et en plus les ouvriers qui n'avait aucune qualification représente la majorité dans les usines.

Après le développement technologique, les systèmes de production deviennent plus sophistiqués, rapides et multitâches. Grâce à cette tendance, les entreprises cherchent souvent des compétences et aptitudes nécessaires pour occuper un poste déterminant, ce qui est appelé plus tard par la qualification professionnelle. Cette qualification peut être acquise par plusieurs méthodes :

- Un enseignement de qualité validé par un diplôme.
- Une formation continue décernée par un organisme reconnu.
- Une expérience professionnelle acquise sur le terrain.

3. Notion de compétences

La notion des compétences se présente souvent comme une notion insaisissable et polysémique au regard de la diversité de ses usagers. Il s'agit de plusieurs recherches qui abondent la littérature de cette notion et qui essaient de la donner une définition précise selon le domaine d'étude parce que la notion de compétence reste floue. Cette notion a connu un grand succès dans presque tous les domaines en commençant par l'économie et la gestion, en passant par la sociologie et la psychologie et en arrivant à l'ingénierie. Selon le sociologue Guy Le Boterf la compétence est *la mobilisation ou l'activation de plusieurs savoirs, dans une situation et un contexte donné* [106], d'une manière simple la compétence est liée à la capacité d'exécuter une tâche que ce soit le domaine d'intervention.

Dans le domaine de génie industriel, la compétence est la mobilisation d'un ensemble de savoirs hétérogènes d'une façon spontanée et pertinente [107], aboutissant à la production d'une performance reconnue, par rapport à un environnement donné et dans le cadre d'une activité finalisée [108].

En outre, le Mouvement Des Entreprises De France a proposé une définition adaptée avec le contexte industriel : *« la compétence professionnelle est une combinaison de connaissances, de savoir-faire, expériences et comportements s'exerçant dans un contexte précis. Elle se constate lors de sa mise en situation professionnelle à partir de laquelle elle peut être validée. C'est donc à l'entreprise qu'il appartient de la repérer, de la valider et de la faire évoluer »* [109].

Plusieurs recherches d'identification des compétences ont été également contribuées à la définition de la compétence et elles ont donné cette définition : *« la compétence est la*

capacité d'un acteur (un individu, un collectif de travail), à agir et réagir avec la pertinence requise pour réaliser une activité ou un ensemble d'activités dans un type de situations de travail donné. L'acteur est au cœur d'un processus qui consiste à sélectionner, combiner et mobiliser ses connaissances, son savoir-faire, ses aptitudes et comportements d'une part, et des ressources de l'environnement d'autre part, en vue d'atteindre les performances escomptées » [110].

La compétence est l'intersection entre quatre aspects (figure 62) observables et mesurables, qui sont les connaissances, les habilités psychomotrices, la capacité à résoudre les problèmes et les attitudes [111].

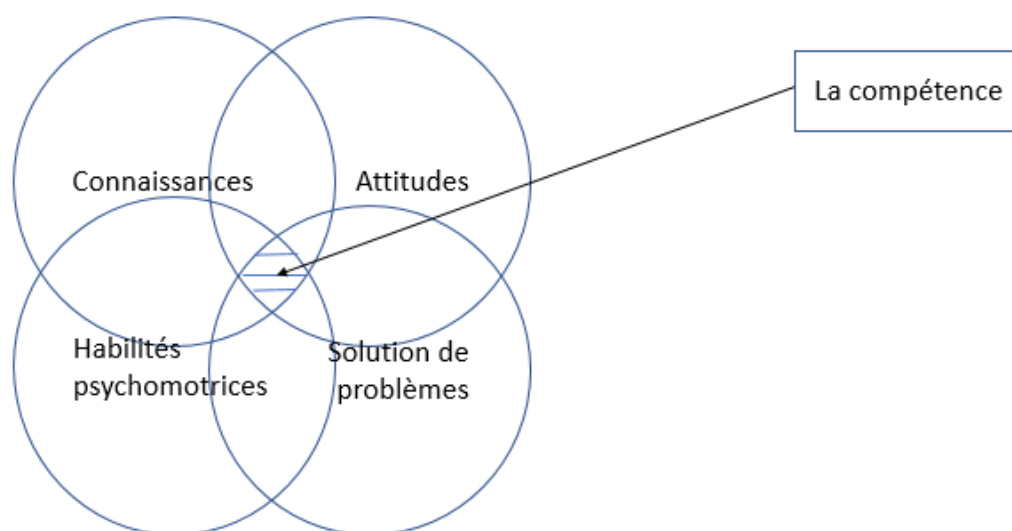


Figure 62: Compétence : intersection entre 4 aspects observables et mesurables [111]

Malgré cette définition issue d'un ensemble de recherches en la matière, une autre définition de la compétence restait, depuis 1991 jusqu'à 2000, très connue et souvent utilisée. Elles s'appuyaient sur une composante tripartite celle du « savoir, savoir-faire, savoir-être [112], [113]. Le premier pilier est la connaissance dont elle est décrite par le savoir, le deuxième est le savoir-faire ce qui représente l'expérience professionnelle acquise et le troisième pilier est celui du savoir-être qui repose sur le comportement de l'individu.

La notoriété de ce triptyque fait couler beaucoup d'encre à cet égard, parce que l'attribution du savoir ou la connaissance à la définition de compétence n'est pas évidente parce que la connaissance est liée à la qualification et n'est pas à la compétence, puisque la qualification dépend essentiellement du temps de formation [114] c'est-à-dire que la validation de la qualification nécessite un diplôme par contre la compétence ne l'est pas. Il

existe deux idées contradictoires concernant la qualification : le premier courant affirme que la qualification dépend de l'homme et non du poste de travail. A l'opposé de ce dernier, le deuxième courant déclare que la qualification n'appartient pas à l'homme, elle appartient au poste de travail.

La différence entre la compétence et la qualification a été traitée dans l'article de [114], il a pu analyser les trois modèles trouvés dans la littérature scientifique de chaque concept : la compétence et la qualification. Il a déduit ensuite qu'il y'a une ressemblance entre la définition récente de la compétence et celle de la qualification. La distinction entre la compétence et la qualification dès lors est négligée dans cette thèse.

Puisqu'il n'y'a pas de définition précise et unanime de la compétence, cette notion a été traitée dans la littérature selon trois échelons : individuel, collectif et organisationnel [112]. La compétence individuelle est liée à la compétence d'une seule personne, la compétence collective est en relation avec la compétence d'une équipe par contre la compétence organisationnelle reflète ce que l'entreprise peut faire.

Nous nous intéresserons dans ce qui suit que par la compétence individuelle afin de savoir leur type ainsi que les différents modes d'acquisition de cette compétence. Dans notre recherche, l'utilisation du terme compétence, seul, fait référence implicitement à la compétence individuelle.

4. Types de compétences

Dans un monde caractérisé par une forte perturbation économique, les entreprises cherchent constamment des personnes compétentes afin de garder leurs places concurrentielles nationale voire mondiale. Pour cela, les gestionnaires des ressources humaines ne confondent pas dans leur jargon entre le terme management par compétences et la gestion des compétences [112] lors de la recherche de nouveaux salariés à leurs entreprises, parce que le management par compétences est lié à des capacités sur le terrain, par contre la gestion des compétences est la mise en pratique des outils de gestion.

La distinction entre le management par compétences et la gestion des compétences reste toujours une question de recherche des spécialistes en la matière. Pourtant, ils se sont mis d'accord sur le fait que les compétences se scindent en deux catégories complémentaires : les compétences techniques et les compétences non techniques [115], [116], ou les compétences

requis et les compétences acquises [117]. Cette division permet facilement aux entreprises de choisir les bonnes personnes dotées des capacités qu'elles cherchent.

4.1. Compétences techniques : Hard Skills

La compétence technique, parfois appelée compétence concrète ou professionnelle, est un savoir développé et dédié à un domaine spécifique dont elles renvoient à la maîtrise des tâches relatives aux processus et à des aptitudes liées à des fonctions très pointues. En d'autres termes, il s'agit de mise en application des méthodes, des procédures et d'outils. Les compétences techniques des employés apportent des indications indispensables sur ce qu'ils peuvent faire sur l'étendue de leurs capacités, ce qui signifie l'acquisition de l'expertise technique [118].

Le recrutement dans les entreprises est basé en premier lieu sur les compétences techniques, d'où la nécessité de l'identification des domaines d'activités afin d'attribuer chaque compétence à son propre domaine et pour que l'évaluation des employés soit équitable.

Les nombreux avantages offerts par les compétences techniques dépendent tous de la rigueur de la personne et d'un environnement dynamique dans lequel elles peuvent être appliqués.

4.2. Compétences non techniques : Soft Skills

Inversement aux compétences techniques, il est difficile de déléguer aux systèmes automatisés des compétences non techniques [119]. Ces derniers sont des compétences abstraites et comportementales [118] et plutôt orientées vers les interactions humaines dont elles font appel à l'intelligence émotionnelle et des attributs de personnalité qui affectent les différentes interactions interpersonnelles. Elles visent à collaborer avec l'autrui selon un mode communicatif, coopératif et faire preuve d'un comportement social. En plus, elles incitent les personnes à contribuer de manière constructive dans l'aménagement de son environnement professionnel, de savoir organiser, de décider avec précision et d'être disposé à assumer des responsabilités.

La nécessité des compétences non techniques dans les entreprises devient de plus en plus très importante, il en existe plusieurs à développer. Les chercheurs trouvent des difficultés à lister un nombre de ces compétences, parce qu'elles varient d'une entreprise à l'autre. Ce qui est important ce n'est pas le nombre, mais leurs acquisitions et leurs applications dans le moment opportun. Parmi lesquelles se trouve la gestion des conflits, l'innovation, la

communication et la maîtrise des langues et l'esprit de travail en groupe. Ce sont des capacités négligées par la plupart des salariés, mais très demandées par rapport à des compétences techniques, et c'est eux qui font la différence lors de recrutement [120].

5. Modes d'acquisition de compétences

Dans le monde économique, le recrutement de personnes ayant acquis de nouvelles compétences adaptées aux besoins des entreprises est un enjeu majeur pour eux, par ce que le monde entier devient un village planétaire et la concurrence devient plus acharnée. Avec l'avènement de l'industrie du future (industrie 4.0), les compétences seront formellement complexes et de plus en plus diversifiées, ainsi que le cycle de vie des produits deviendra plus court [121] à cause de la personnalisation des produits.

Au fur et à mesure du progrès des nouvelles technologies, plus le salarié est en état stagnant de ces compétences, plus il sera très difficile et coûteux pour lui de se rattraper. Pour cela, l'acquisition sur de nouvelles compétences est indispensable.

Plusieurs dispositifs techniques et interactifs existent afin de faciliter le travail de coopération entre les individus au sein d'un groupe, ainsi de nombreuses modes qui permettent l'acquisition de ces aptitudes sont disponible. Nous allons citer brièvement quelques méthodes principales qui permettent d'acquérir les compétences que ce soit techniques ou non techniques.

5.1. Enseignement supérieur

Toujours considéré comme producteur et diffuseur du savoir, l'enseignement supérieur permet également un niveau de vie modeste voire excellent aux individus avec plus de stabilité économique [122].

La principale ressource du potentiel humain de chaque entreprise est l'enseignement supérieur, et c'est elle qui prépare premièrement les gens au monde du travail [123]. C'est pour cette raison que les universités marocaines ont harmonisé leurs cursus de la formation initiale avec les normes de la plupart des pays dans le monde entier parce qu'elles ont adopté la nouvelle réforme pédagogique basée sur le système LMD (Licence, Master et Doctorat).

Le système LMD ou le système modulaire est composé de plusieurs semestres : pour la licence 6 semestres, pour le master 10 semestres et 3 ans après le master pour le doctorat. L'effectif des diplômés marocains du premier et deuxième cycle (licence et master) dans les sciences de l'ingénieur, la technologie et les sciences et techniques est 11 003 lauréats [124].

Certes que les universités marocaines préparent et forment en masse. Ces efforts sont face à un défi qui pourra leur défavoriser si cela n'est pas pris en considération, ce défi majeur est la mise à jour des formations, c'est-à-dire qu'elles doivent répondre aux exigences du marché du travail.

En effet, l'importance de l'enseignement supérieur est primordiale à la diffusion du savoir en faveur des nouveaux lauréats et leurs préparations au monde de l'emploi, et l'état devra donner un grand intérêt à la formation initiale de ces citoyens parce que la bonne qualification des lauréats encourage les investisseurs étrangers à y débarquer. La qualité de l'enseignement supérieur permet à l'entreprise de s'adapter à son environnement et d'améliorer son développement [123].

5.2. Formation continue

La formation continue professionnelle est un enjeu crucial pour la compétitivité de toutes les entreprises, parce que le progrès des systèmes automatisés de production et les nouvelles technologies sont parmi les facteurs qui demandent un personnel qualifié.

La formation continue est un ensemble des activités de formation planifiées à l'avance et financées entièrement ou partiellement par l'entreprise, elle permet à l'individu d'acquérir le savoir et le savoir-faire nécessaire à l'exercice d'un emploi ou d'une activité professionnelle. L'intérêt porté à la formation continue par toutes les entreprises, surtout les petites et moyennes entreprises, est vu comme un élément indispensable à la professionnalisation et comme une nécessité dans la profession. La formation des salariés joue un rôle important au niveau de la cohésion interne de l'entreprise et de l'implication du salarié : ce dernier se sentira davantage motivé et ses résultats seront sans doute meilleurs s'il sentait l'implication de l'entreprise à sa formation.

La formation continue est le moyen de la qualification du salarié qui lui permet un accès à l'emploi et la progression sûre dans sa carrière. Elle représente également une compétitivité accrue à l'entreprise et la création de la richesse en s'appuyant sur le capital humain [125].

De nombreuses recherches qui ont entamé la thématique de la formation continue et son intérêt pour l'entreprise et le salarié, en plus les rapports et les interventions officielles des personnes chargées de ce volet sont multiples. Par exemple, le délégué général de l'emploi français a souligné l'importance de la formation continue en disant : *c'est « un facteur connu d'augmentation de la productivité du travail. Elle permet en effet aux salariés de s'adapter plus rapidement aux innovations techniques et organisationnelles et les conduit à gagner en*

efficacité dans l'exercice de leur travail [125]». En outre, le ministre de la fonction publique et de la modernisation de l'administration marocain a déclaré lors de la stratégie nationale de la formation continue : « les plans sectoriels de la formation continue devraient constituer un outil incontournable pour l'amélioration des compétences et l'expertise des fonctionnaires afin de leur permettre d'exercer les diverses fonctions et d'avoir des formations spécialisées de qualité. Des mesures ont été également prises par le ministère en coordination avec les parties concernées, pour assurer le financement des programmes de formation continue » [126].

Le discours a mis l'accent sur la nécessité d'introduire la formation continue dans les différents secteurs de l'administration public et l'aide à son financement. Il a également mentionné implicitement la formation continue dans les entreprises, puisque l'article 23 du code du travail renforce leurs recours à la formation continue de leurs salariés pour améliorer le développement de leurs compétences. L'article 23 du code du travail reconnaît que « *les salariés ont le droit de bénéficier des programmes de lutte contre l'analphabétisme et la formation continue* »³.

5.3. Coaching

Le coaching représente l'accompagnement professionnel personnalisé (individuel ou collectif) dont il permet au client un épanouissement remarquable dans la vie personnelle que professionnelle, avec une manière caractérisée par l'autonomie et la rigueur dont il est basé essentiellement sur les disciplines des sciences humaines et économiques.

Le coaching cherche à débloquer les capacités internes de la personne [127] dans une période bien déterminée, la personne coachée remarque un approfondissement de ses connaissances et l'amélioration de ces compétences.

Si la confiance n'est pas établie, il pourra survenir des tensions entre le coach et le coaché [128]. Par contre, l'interactivité établie, entre les deux, aide à la clarification des objectifs et l'engagement à les atteindre en ne se concentrant que sur les avantages du coaching. Le coaching présente plus d'avantages que d'inconvénients, par exemple :

- La conscience de soi.
- La gestion du temps.

³ Extrait de l'article 23 du code du travail marocain

- La gestion du stress.
- L'efficacité à la résolution de problèmes.
- La créativité.
- L'amélioration des relations inter personnelles et professionnelles.
- L'effet positif sur la performance.

La finalité du coaching est la même que ce soit le types de coaching appliqué :

- Le coaching individuel c'est-à-dire que le coach se concentre sur l'individu seulement dans une relation un à un.
- Le coaching d'équipe c'est la considération du groupe comme une équipe dans une relation une à plusieurs en mettant l'accent sur le processus et non le contenu.
- Le coaching collectif est le mélange des deux types précédents. Les objectifs de coaching souvent mixtes dans cette catégorie.

5.4. Formation dirigée par un instructeur : ILT

ILT (Instructor-Led Training) ou la formation dirigée par un instructeur est le mode le plus utilisé [129] et l'approche traditionnelle des formations la plus connue et acceptée [130]. Le ILT signifie qu'une personne expérimentée dirige un individu ou un groupe d'apprenants, leur fournissant le contenu directement.

La formation, selon ce mode, peut être dispensée dans un format de conférence, où l'instructeur parlera à un grand groupe. Elle peut également être livrée dans des salles plus petites, où le formateur peut interagir plus avec la classe et répondre aux questions, comme elle peut être dispensée dans des ateliers où les apprenants acquièrent beaucoup plus de connaissances pratiques. En plus, l'instructeur joue davantage un rôle de supervision et intervient dans le moment opportun si nécessaire.

La durée de ILT varie selon le besoin et l'endroit. La formation pourra durer entre une heure et plusieurs jours, comme elle pourra avoir lieu au sein de l'entreprise ou dans des salles de formations externe. La formation dirigée par un instructeur reste la meilleure façon de former les apprenants par ce qu'elle implique un contact humain entre le formateur et les formés, ainsi que la réaction directe entre eux [131].

Pourtant, l'inconvénient de ILT réside dans le temps dispensé pour chaque apprenant et les coûts les plus élevés des formateurs qui sont répartis entre les frais de déplacement, de logement et des indemnités journalières.

5.5. E-learning

Avec l'avènement des TIC dans les formations, plusieurs formations professionnelles sont disponibles via internet permettant le développement personnel et l'acquisition de nouvelles compétences à l'individu.

Les petites et moyennes entreprises cherchent à maximiser la productivité de leurs personnels, mais elles doivent d'abord leurs former sur les nouvelles technologies des systèmes de production. Les PME ne veulent pas que leurs employés quittent l'entreprise pour assister à des formations dans d'autres endroits, malgré l'impact positif de la formation, parce qu'elles considèrent ce temps comme de l'argent perdu.

Le remède à ce problème est l'intégration des formations professionnelles en ligne adaptées aux besoins de l'entreprise, appelé e-learning, qui permettront aux employés l'approfondissement de leurs connaissances et l'augmentation de leurs productivité en suivant les modules de e-learning à leurs rythmes et leurs disponibilités tout en restant au sein de l'entreprise. Ce mode de formation se caractérise par la souplesse, c'est-à-dire que les employés peuvent sauter des parties de la formation [132] qu'elles connaissent déjà et gagnent du temps.

5.5.1. E-learning : nouveau concept

L'e-learning fait référence à l'ensemble des outils facilitant l'apprentissage via l'internet et les dispositifs électroniques, c'est un environnement virtuel [133] pour le partage des connaissances. En plus, le e-learning est considéré comme « *tout dispositif de formation qui utilise un réseau local, étendu ou internet pour diffuser, ou interagir ou communiquer* » [134].

Le concept d'apprentissage en ligne a été considéré comme un dispositif technologique [135] utilisé pour fournir un ensemble des connaissances dans la sphère académique [136] et professionnelle. Ce dispositif inclut des technologies web éducatifs tel que les plateformes de formation, ainsi que l'utilisation des ordinateurs et les divers appareils mobiles pour être connecté à la plateforme. Les équipements permettant l'accès au contenu sont connus par le mode de diffusion de l'information MDI [137].

C'est les TIC qui sont à l'origine de cette tendance de formation, le passage de l'apprentissage à distance à l'apprentissage en ligne est issu de la nouvelle technologie [138]. L'intégration de MDI dans le système éducatif permet l'élargissement du rayon des connaissances et du savoirs au-delà des murs des universités et des institutions.

La Commission Européenne CE a proposé une définition du e-learning très intéressante : « *l'utilisation des nouvelles technologies multimédias et de l'Internet pour améliorer la qualité de l'apprentissage en facilitant l'accès à des ressources et des services, ainsi que les échanges et la collaboration à distance* » [139]. A travers cette définition, la CE insiste sur la qualité de l'apprentissage dispensé via internet, malgré l'impossibilité du gage de la qualité de l'e-learning avec l'existence de plusieurs prestataires de service en la matière. En plus, elle ne cherche pas à substituer les méthodes d'enseignement existante mais à compléter celles-ci.

L'objectif de la formation en ligne, e-learning, est le développement du savoir et des compétences avec des méthodes spécifiques basées essentiellement sur des capacités d'apprentissage facilitant le contenu à l'apprenant.

Dans le milieu industriel, le e-learning est un moyen très efficace pour apprendre de nouvelles compétences et acquérir de nouvelles connaissances. Les employés peuvent appliquer au sein de l'entreprise ce qu'ils ont appris comme compétence, quel que soit son type, dans les modules de formation en ligne. Comme ils peuvent également consolider leurs savoir en combinant l'expérience acquise et le savoir de la formation. En outre, la formation pourra être suivi en ligne et ne nécessitant ni déplacement ni présence de formateur, et cela grâce au système de gestion d'apprentissage LMS (Learning Management System).

5.5.2. Système de gestion d'apprentissage (LMS)

Les systèmes de gestion de l'apprentissage ou LMS (sigle anglais du Learning Management System) sont des véritables dispositifs informatiques s'appuyant sur des plateformes dédiées à la formation en ligne. Ces outils informatiques permettent la planification des formations, l'organisation des groupes, le suivi des apprenants et leurs évaluations. En plus de leurs principales fonctionnalités d'apprentissage, les LMS intègrent des outils d'administration de formations en ligne comme entre autres la création des profils des formateurs et apprenants, l'élaboration de questionnaires, suivi de progression de la formation avec les systèmes de question-réponse, l'hébergement des contenus médias etc.

Outre que les LMS, les environnements virtuels d'apprentissage VLE (Virtual Learning Environment) sont présents essentiellement pour des activités d'enseignement, au contraire

des LMS dont ils sont utilisés principalement dans la formation. Ces VLE simulent les activités de formation traditionnelles et sont dirigés majoritairement par des enseignants, cela rend les utilisateurs ne font aucune distinction fonctionnelle entre les LMS et VLE, puisque les fonctionnalités sont très semblables.

Grâce à leurs rôle facilitateur, les LMS ont été considéré comme un dispositif technologique et humain [140] puisqu'ils apportent un soutien aux apprenants et aux formateurs, ce soutien n'avait pas eu lieu sans le support technologique et le développement informatique. L'interactivité est établie avec aisance entre les apprenants et les formateurs à l'aide de la qualité de la connexion, de la configuration des ordinateurs et de la capacité des infrastructures.

La tendance des formations sur internet a créé de nouveaux contributeurs. Cela signifie que la demande des LMS sous licence libre est importante, mais la majorité s'est attirée par les LMS sous licence propriétaire parce qu'ils offrent plus de fonctionnalités [134].

- Les LMS sous licence libre subissent les termes de la Licence Publique Générale GNU. Les auteurs concèdent tout ou partie de leurs droits aux utilisateurs afin de garantir en toute liberté l'utilisation, le partage, la modification et la gratuité du LMS.
- Les LMS sous licence propriétaire sont à l'inverse d'une licence libre, c'est-à-dire que les conditions d'utilisation, de la modification et de la diffusion sont très limitées sauf paiement des droits pour en bénéficier. L'achat de la licence ne signifie pas le transfert de la propriété. Le principal avantage des LMS sous licence propriétaire est la personnalisation du LMS dont elle sera effectuée par les programmeurs et développeurs du fournisseur selon le besoin de chaque client avec un minimum de temps.

Un LMS fiable est un système qui s'occupe de toutes les tâches de la formation depuis la pédagogie jusqu'à la logistique. Ces dernières années, l'industrie des LMS devient de plus en plus intéressante puisqu'elle a connu l'intérêt de la formation en ligne et les profits engendrés par l'e-learning.

L'hébergement du LMS peut être effectuer soit au sein de l'entreprise, soit au sein d'un fournisseur externe [141]. De toute façon, les entreprises vont métriser la cadence de formation des salariés, la gestion des cours et leurs évaluations via des statistiques portant sur les résultats de chaque apprenant en temps réel à l'aide d'un serveur et d'une interface

utilisateur. Le serveur sert à exécuter plusieurs tâches tel que l'authentification des utilisateurs, le traitement des données et la gestion des formations. L'interface permet l'interaction des apprenants, des formateurs et les administrateurs avec le contenu du LMS via le navigateur web.

5.5.2.1. Avantages

La formation en ligne a attiré l'attention de plusieurs entreprises, par ce que l'e-learning répond à leurs exigences et leurs permettront de développer les compétences de leurs salariés. L'organisation des formations basée sur les TIC présente des avantages énormes que les entreprises peuvent en tirer. Pour bien assimiler le concept du e-learning dans le contexte industriel, nous allons présenter quelques avantages de celui-ci dont ils sont évoqués dans la littérature scientifique. Les quatre qualités du e-learning sont décrites brièvement en dessous.

a) Moins cher

Le véritable avantage que les entreprises cherchent en permanence est la réduction des coûts de formation, tout à fait l'e-learning coûte moins cher [142] par rapport à la formation classique. Une étude a été faite par le *e-learning magazine* [143] a démontré que 59% des entreprises interrogées déclarent minimiser les coûts de formation, d'autres études ont montré que les économies du e-learning allant de 35% à 60% [144], [145]. Une telle économie est due à l'absence de déplacement et d'hébergement, en plus des outils nécessaires à la formation en présentiel tel que la salle, les papiers, le vidéoprojecteur et les frais administratifs sont annulés avec l'e-learning.

b) Accessibilité et disponibilité

L'e-learning facilite l'accès à la formation, un simple appareil électronique (tel qu'un ordinateur, un smartphone et une tablette) équipé d'une connexion à Internet suffit [142] pour que les salariés puissent à y accéder [145]. Dans la même étude de *e-learning magazine* [143] 79% des entreprises sont d'accord que l'e-learning est disponible n'importe où et n'importe quand [38], donc il est disponible au moment où le besoin se manifeste. Ce qui veut dire qu'il n'y a pas d'heure prédéfinie à laquelle les salariés doivent suivre le module de formation.

c) Flexibilité

La formation en ligne peut être suivie avec aisance à n'importe quel rythme, juste à temps [145] et depuis n'importe quel endroit. 59% des entreprises [143] avouent que le salarié peut suivre la formation à son propre rythme personnel. Dans les séminaires et les formations en présentiel, si l'employé est incapable de comprendre un concept, il est difficile de le revoir.

Par contre, avec l'e-learning l'employé peut rejouer n'importe quel aspect de la formation jusqu'à ce qu'il le comprenne absolument.

d) Performance

Les entreprises peuvent créer des modules e-learning et les partager facilement avec des centaines voire milliers de leurs salariés au lieu d'organiser à chaque fois qu'un besoin se manifeste des sessions de formations en présentiel, et par conséquent les salariés auront l'accès au même contenu de la formation. Contrairement à la formation en présentiel qui se change en fonction des apprenants, des formateurs et le lieu.

Outre que les avantages liés au e-learning lui-même, l'étude [145] a présenté également les avantages relatifs aux formateurs et aux entreprises. Les formateurs présenteront leurs modules de n'importe quel endroit [146], ils voyageront moins ce qui réduit les coûts de formation et le contenu deviendra plus dynamique et consistant grâce à la concentration des formateurs à le développer et l'améliorer. Concernant les entreprises, elles seront plus indépendantes, puisque l'e-learning devient une source précieuse de formation et ne craignent pas la démission des salariés expérimentés, ainsi que cette formation sera de haute qualité.

5.5.2.2. Inconvénients

Comme n'importe quelle solution de formation, l'e-learning est une épée à double tranchant. Comme il a des énormes avantages, il a sans doute des inconvénients potentiels qui pourront être facilement dépasser avec un simple ajustement.

a) Manque de motivation

Le premier inconvénient qui vient aux sceptiques du e-learning est le manque de la motivation chez les apprenants parce qu'ils ne sont pas en présentiel, et par conséquent l'abondance de la formation, surtout que la mesure de l'efficacité [147] de la formation n'est pas encore présent avec des outils performants.

La motivation est exprimée par l'envie d'apprendre et ce n'est pas par la présence physique dans la salle de formation. Il est à mentionner que la discipline, l'autonomie et la rigueur sont largement suffisant pour les apprenants afin d'entamer des modules de formation en ligne en pleine motivation.

b) Absence de la dimension sociale

L'e-learning ne permet pas la communication avec les formateurs ce qui enlève la dimension sociale à ce concept. Certains apprenants ont besoin du contact face à face [145] avec les formateurs afin de bien assimiler leurs apprentissages même si la formation est très bien conçue. Grâce au développement des outils informatiques, les formateurs peuvent

consacrer des sessions régulières en ligne avec les apprenants afin de mettre le point sur leurs progrès, leurs évaluations et leurs aides si nécessaire.

c) *Non maîtrise des LMS*

Les systèmes de gestion de l'apprentissage LMS sont des interfaces d'interaction entre l'apprenant et la formation. Parfois, quelques LMS sont développés d'une manière très complexe et certains apprenants avec une modeste connaissance en informatique engendrent à cet égard une peur technologique [145] et par conséquent de ne pas oser les utiliser. L'e-learning nécessite d'être facile à utiliser et requiert un minimum en connaissance des outils informatiques.

Il est à noter que les avantages et les inconvénients cités en dessus concernant l'e-learning ne sont pas exhaustive, mais cela nous a donné une simple idée sur ce concept afin de bien assimiler son principe.

6. Choix du mode d'acquisition de compétence

Ces différents modes d'acquisition de compétences présentent une variété de méthodes d'apprentissage suivant l'évolution de la technologie et les besoins des apprenants. Ces dernières années, le progrès technologique a permis également la proposition de diverses modes en ligne de plus en plus performantes et qui répondent aux exigences du marché tout en assurant un coût de formation le plus convenable possible et avec une durée de formation compatible avec les horaires de chacun.

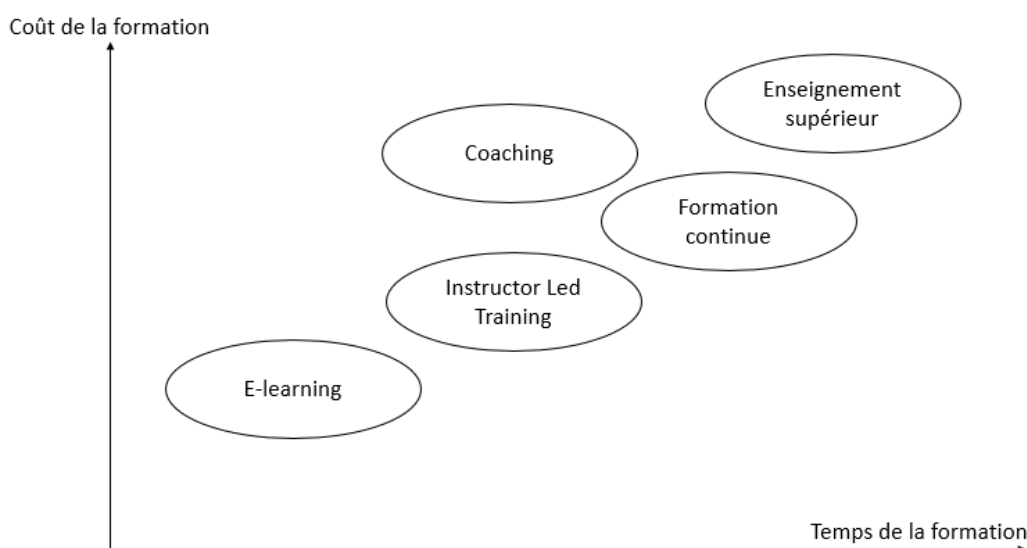


Figure 63: Différents mode d'acquisition de compétences en fonction du coût et le temps de la formation

La figure 63 s'agit d'une représentation, deux dimensions, des modes d'acquisition de compétences pour mieux les situer les uns par rapport aux autres afin de choisir celui qui correspond le plus. Le choix s'effectue principalement en fonction du coût de la formation, le temps de la formation et la rapidité à atteindre des objectifs ciblés.

Il apparaît clairement que le e-learning est le mode le plus convenable pour acquérir des compétences en prenant en considération le ratio coût et temps de formation.

Il est à noter qu'il existe d'autres fonctions, tel que l'interaction technique et sociale [148], qui pourront être pris en compte lors du choix de l'un de ces modes, mais nous choisissons que ces deux fonctions principales qui sont le coût et le temps de formation. Ces deux fonctions sont les plus demandées par les entreprises, puisqu'elles cherchent d'une manière permanente à minimiser les coûts de formation de leurs salariés et à réduire les délais de formation le maximum possible.

Après notre adoption du e-learning comme un mode choisi pour acquérir de nouvelles compétences dans les petites et moyennes entreprises, malgré la résistance idéologique au remplacement de la formation par des machines [149]. Il est donc le temps de modéliser la plateforme de formation en ligne dédiée aux agents des systèmes automatisés.

7. Elaboration de la plateforme e-learning

7.1. Ingénierie de la formation

L'ingénierie de formation est connue comme la conception de formation avec un ensemble de méthodes et approches rationnelles afin de combler le besoin de formation défini au préalable. Elle est plus demandée ces dernières années dans le milieu industriel, par ce qu'elle se concentre sur le développement des compétences des salariés des entreprises.

L'association française de normalisation (abrévée AFNOR) a défini l'ingénierie de formation par l'ensemble de démarches méthodologiques articulées. Elles s'appliquent à la conception de systèmes d'actions et de dispositifs de formation pour atteindre efficacement l'objectif fixé. L'ingénierie de formation comprend l'analyse des besoins de formation, la conception du projet formatif, la coordination et le contrôle de sa mise en œuvre et l'évaluation des effets de la formation [150].

Cette définition a mis le point sur l'importance du processus de formation (l'analyse, la conception, le contrôle et l'évaluation) qui doit être pris en considération notamment par les

entreprises. Ces dernières doivent se positionner sur ce processus pour planifier une stratégie de formation adaptable aux besoins de leurs employés, au développement de l'entreprise et pour répondre aux impératifs du marché.

Il est à noter que l'ingénierie de formation est différente de celle pédagogique qui est un processus mis en œuvre afin de résoudre un problème de formation ou d'apprentissage réalisé par un ou plusieurs acteurs (concepteurs pédagogiques, experts, spécialistes multimédia...) mené de manière explicite ou implicite sur la base de principes issus de différentes théories (théories de l'apprentissage et de l'enseignement, théories didactiques,...), au cours duquel différents instruments (logiciels, gabarits...) sont utilisés pour créer différentes productions intermédiaires et dont le résultat final est un environnement d'apprentissage proposé en tant que solution au problème de formation [148].

C'est clair que l'ingénierie pédagogique fait partie donc de l'ingénierie de formation, la première est consacrée à la mise en œuvre et à l'acquisition de connaissance et compétences d'une manière efficace et attrayante [151] par rapport à la deuxième qui est dédié à la conception. Dans les grandes entreprises, il y'a une dissociation fonctionnelle entre l'ingénierie pédagogique et celle de formation. Par contre, au sein des PME cette distinction est réduite au strict minimum voire nulle et les deux fonctions sont exercées par la même personne qui est souvent le responsable des ressources humaines RH.

Le processus de formation se base sur plusieurs modèles [152] existant (tel que le modèle orienté sur l'individu, celui orienté sur la production et le dernier orienté sur le système) dans l'ingénierie pédagogique qui permettent la mise en place des formations selon les étapes de chaque modèle. Nous nous intéressons que sur deux approches qui sont largement utilisées et connues, l'approche analytique basée sur le modèle ADDIE et l'approche pragmatique basée sur le modèle SAM.

7.2. Modèle ADDIE

L'Analyse, le Design, le Développement, l'Implantation et l'Evaluation se sont les cinq phases classiques et historiques qui constituent le modèle ADDIE dont il est formé par les premières lettres de chacun de ces mots.

Le modèle ADDIE a été créé en 1975 par la Florida State University pour fournir un cadre à la création d'une formation pour l'armée américaine, puis il a été développé en 1990 par Reiser et Mollenda [153]. Ce modèle est une dérive de l'approche analytique qui suit un processus en cascade où chaque phase doit être terminée avant de passer à l'étape suivante.

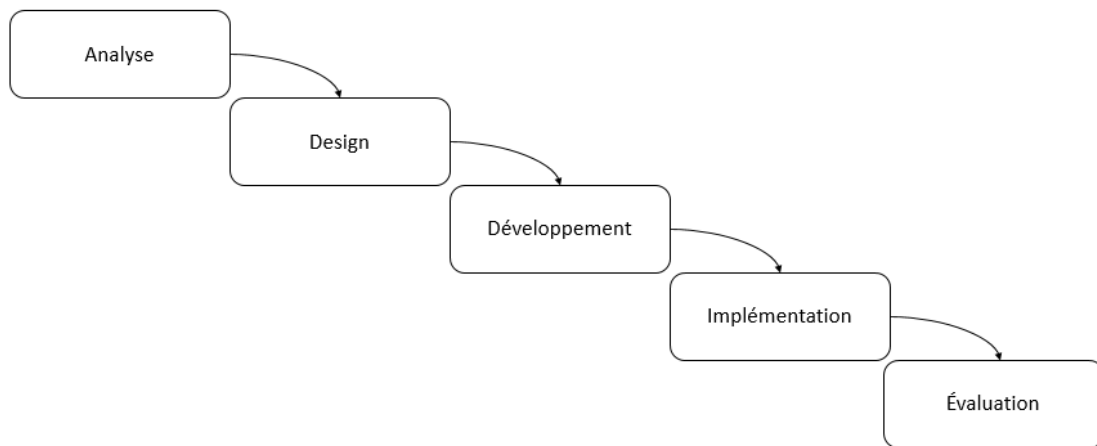


Figure 64: Modèle ADDIE en cascade

Le modèle ADDIE en cascade (figure 64) a été repensé par plusieurs recherches [154] afin de lui enlever la rigidité et la linéarité. Au lieu de laisser l'étape d'évaluation à la fin du cycle, elle doit être présente dans chaque étape du modèle, ce qui a donné une représentation en boucle (figure 65) aidant les concepteurs à faire des révisions au fur et à mesure de l'élaboration des formations.

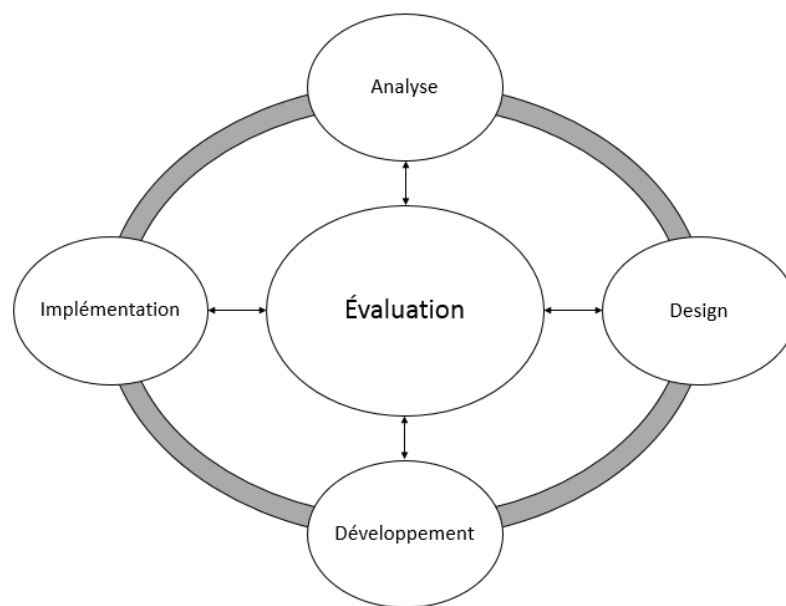


Figure 65: Modèle ADDIE en boucle

Le modèle ADDIE est le modèle le plus utilisé dans la conception dans l'ingénierie de formation que ce soit en cascade ou en boucle. Il peut être intégré dans n'importe quelles stratégies d'apprentissage [153] puisque ces cinq étapes sont des piliers invariables.

7.2.1. Analyse

Selon le modèle ADDIE, la phase d'analyse est la première étape dont elle correspond à l'identification du besoin, la récolte des informations concernant les bénéficiaires potentiels et la définition des tâches de la formation.

L'analyse approfondie du besoin permet de clarifier si la formation attendue est effectivement nécessaire pour combler un besoin dans les compétences en spécifiant ces caractéristiques, ces attentes et ces contraintes. Elle détermine également la nature du public cible, leurs prérequis et les répercussions.

L'analyse des tâches aide les concepteurs de formation à spécifier les tâches professionnelles que les formés doivent acquérir, développer ou renforcer et avec quel moyen. Ce type d'analyse est largement utilisé dans l'acquisition de nouvelles compétences liées à l'emploi.

7.2.2. Design

Pendant cette phase qui signifie la conception, les pédagogues visent à spécifier les objectifs et l'ordre du contenu pour atteindre l'objectif global de la formation, d'une autre manière c'est l'élaboration du plan détaillé de la formation. Elle consiste à la conception générale de la formation et au design de chaque composant du mode de diffusion.

7.2.3. Développement

C'est lors de cette étape que le contenu de formation sera produit, elle se base sur les ressources nécessaires et complémentaires relevées lors de l'étape précédente. La phase de développement transforme le contenu de formation en module interactif et viable, et cela grâce à :

- L'ajout des composants multimédias.
- La mise en page du contenu.
- La création de l'interactivité dans les modules.
- La simplicité de navigation.

A la fin de cette étape, il est nécessaire d'effectuer une révision générale du contenu principalement dans les axes suivants :

- L'adéquation du contenu avec les objectifs.
- La relecture pour corriger les erreurs de grammaire et orthographe.

- La qualité des vidéos, audios et la navigation.

7.2.4. Implémentation

Cette étape permet la diffusion de la formation créée et la rendre accessible aux apprenants via une infrastructure technologique qui est le plus souvent le LMS permettant le suivi de chaque apprenant. Elle permet également de clarifier les consignes et les messages relatifs à la formation aux apprenants, comme elle détaille aux apprenants le planning de la formation.

7.2.5. Evaluation

L'étape la plus cruciale est l'évaluation surtout si elle est laissée à la fin du cycle (ADDIE en cascade, figure 64), elle prendra un temps énorme dans ce stade. Par contre si elle est effectuée au fur et à mesure (ADDIE en boucle, figure 65), elle aura que quelques modifications à faire.

L'évaluation consiste à juger la formation dispensée en termes de qualité, d'efficacité et les compétences acquises durant cette formation. En plus, elle permet de mesurer le degré d'atteinte des objectifs fixés à l'aide de la collecte des données relatives aux apprenants.

Le but de l'évaluation est d'apporter des améliorations au processus de formation avant l'approbation de la diffuser à grand échelle.

7.3. Modèle SAM

Le modèle SAM, de l'anglais Successive Approximation Model qui signifie en français modèle d'itérations successives, est une approche cyclique du développement de produits de conception pédagogique qui répond aux besoins de performance par des itérations, en se basant sur de petites étapes répétées, plutôt que par des étapes géantes et longues. Il a été créé par Allen Interactions comme une alternative au modèle ADDIE spécifiquement pour l'élaboration des projets e-learning axés sur l'amélioration des performances et basés sur la notion de prototype.

Le modèle d'itérations successives est connu comme une approche pragmatique [40] et une méthode de développement agile. La signification de "agile" dans ce cas est que plusieurs étapes se produisent en même temps puisque ce modèle est itératif. Chaque étape de développement est cyclée au moins trois fois, et chaque cycle devrait être plus proche de l'idéal que le dernier.

La nature collaborative de SAM permet aux équipes d'être flexibles, et les étapes de révision répétitives laissent de nombreuses opportunités de communiquer tout changement ou

retour d'information. Les itérations de SAM durant tout le processus permettent des évaluations et des modifications au projet e-learning dans chaque étape du SAM selon les besoins demandés et en étroite collaboration avec les concepteurs pédagogiques et les clients.

Avec l'utilisation fréquente de SAM, les concepteurs ont décomposé ce modèle en deux parties : SAM₁ et SAM₂ [155].

- Le modèle SAM₁ (figure 66) est conçu pour les projets e-learning de petite envergure. Il se base que sur trois étapes et itérations de la conception pédagogique (l'analyse, la conception et le développement).

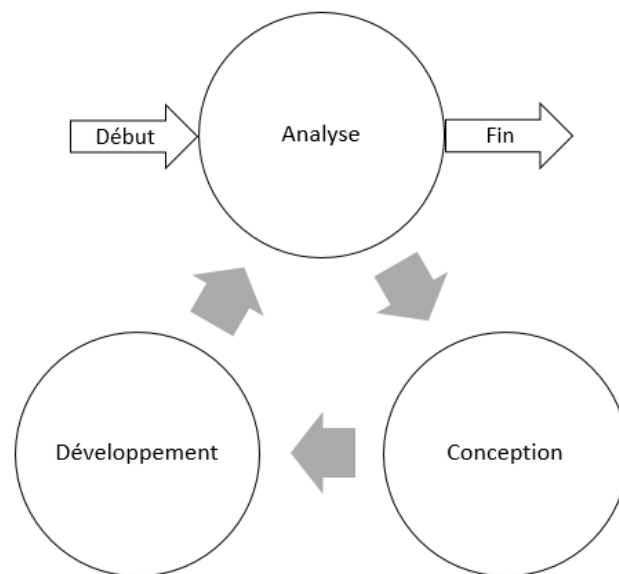


Figure 66: Modèle SAM₁

- Le modèle SAM₂ (figure 67) est une extension du modèle SAM. Il comporte huit étapes itératives réparties dans les trois phases (la phase de préparation, la phase de conception itérative et la phase de développement itératif).

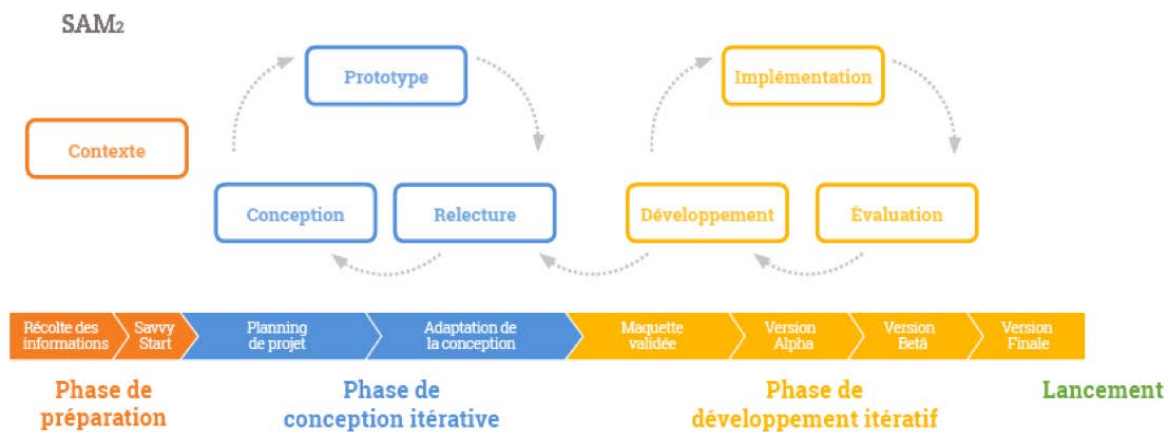


Figure 67: Modèle SAM₂ [38]

7.3.1. Préparation

La phase de préparation commence par la collecte d'informations et ensuite une conversation avec l'équipe sur les données rassemblées, sur les buts et les objectifs ce qui rend cette phase très rapide et courte. Cette conversation est connue par « Savvy Start ».

7.3.2. Conception itérative

La conception itérative comporte trois étapes :

- Relecture.
- Conception.
- Prototype.

Ce cycle est répété trois fois et intègre les feedbacks du prototype dans les prochaines phases d'évaluation, de conception et de prototype.

7.3.3. Développement itératif

Cette phase consiste en trois étapes :

- Développement.
- Implémentation.
- Evaluation.

Le cycle est répété trois fois et intègre les feedbacks de l'implémentation dans le prochain cycle de développement. Ce processus itératif est conçu pour détecter les erreurs, apporter des améliorations et permettre une certaine flexibilité avant de passer à l'étape suivante.

Pour les deux modèles SAM, l'accent est mis sur l'utilisation d'une approche itérative pour créer le produit final dès le début, tout en continuant l'analyse et la conformité du travail au fur et à mesure de sa production.

7.4. Choix du modèle

L'ingénierie de formation repose sur deux approches : analytique et pragmatique. L'approche analytique ADDIE est basée sur un processus linéaire, l'approches pragmatique SAM est connue comme une approche agile.

Plusieurs concepteurs pédagogiques considère qu'il y'a une bataille entre les deux approches, notamment après l'apparition du livre « Leaving ADDIE for SAM⁴ » qui signifie quitter ADDIE pour SAM du fondateur de cette approche Michel Allen, qui favorisent SAM par rapport à ADDIE. Par contre, d'autres concepteurs ne voient aucune différence entre les deux approches surtout après plusieurs améliorations de la version 1975 d'ADDIE et puisque le livrable est bon, l'approche utilisée n'est pas assez importante.

L'agilité de SAM permet de développer du contenu de formation qui tient en compte des erreurs possibles et des changements externes à chaque étape qui sont souvent rectifiées avec la collaboration.

Pour cette raison, l'approche pragmatique SAM, essentiellement SAM₁, sera adoptée pour la conception du e-learning dans ce qui suit. En plus, la phase d'analyse a été déjà faite dans la discussion des résultats (le chapitre 3), et ce qui suit l'analyse est la phase de conception qui va nous permettre de concevoir l'architecture de la plateforme de formation.

8. Conception de la plateforme e-learning

8.1. Accès à la plateforme

Le e-learning permet de gérer la partie en ligne d'un dispositif de formation. Le LMS repose sur trois profils principaux : formateur, apprenant et administrateur (figure 68).

Pour accéder à la formation l'utilisateur doit se connecter en choisissant son statut et en saisissant leurs données personnelles récupérées auprès de son département des ressources humaines ou de son supérieur hiérarchique.

⁴ <https://www.alleninteractions.com/leaving-addie-for-sam-book>

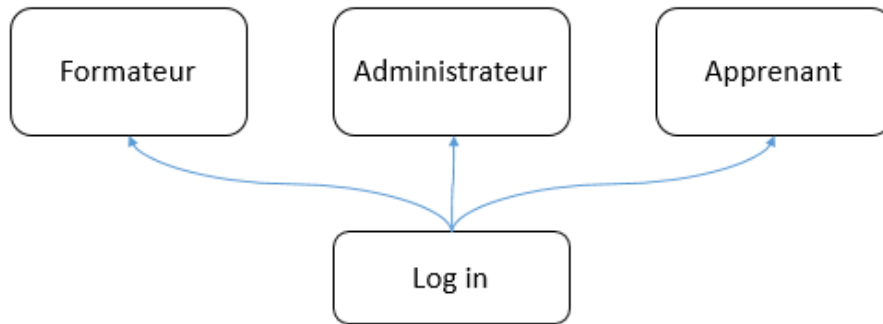


Figure 68: Accès à la plateforme

8.2. Choix de types de compétences

L'apprenant, qui est dans ce cas l'employé, peut consulter en ligne les contenus qui lui seront recommandés par son supérieur hiérarchique selon le type de compétences à développer. Ces compétences sont organisées d'une façon qui lui permet l'évolution dans son travail, comme elles permettent également d'effectuer des exercices et auto-évaluation via des séries de questions et de tests (figure 69).

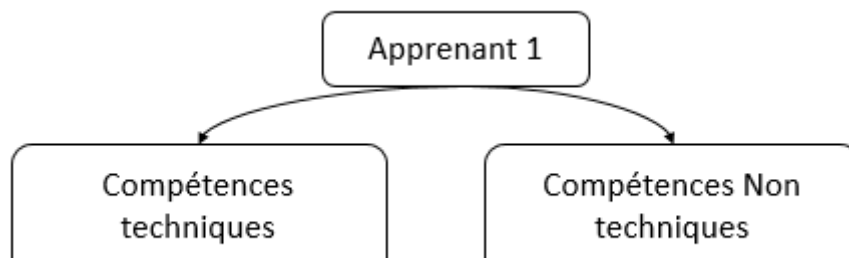


Figure 69: Choix de compétences dans la plateforme

Le contenu se décompose en deux parties qui sont : les compétences techniques et non techniques.

- Les compétences techniques (figure 70) comportent des matières relatives aux systèmes automatisés industriels tel que : l'automatisme, la pneumatique, l'instrumentation, l'électricité, la mécanique, la régulation, etc.

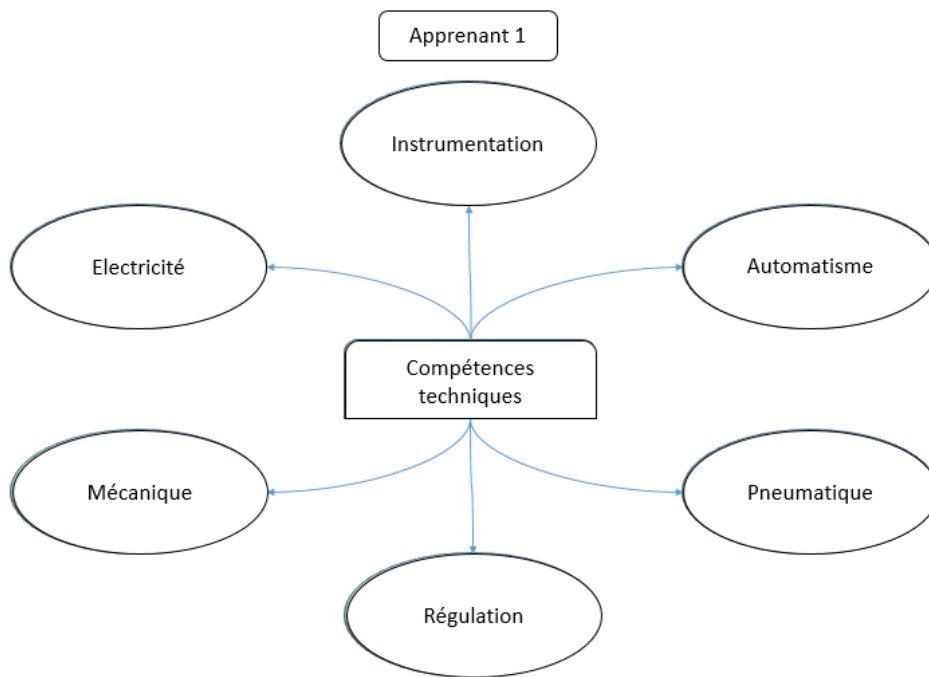


Figure 70: Contenus techniques

- Les compétences non techniques (figure 71) contiennent des modules de formation liés au domaine du développement personnel et interpersonnel tel que : la communication, la gestion des conflits, l'innovation, la négociation, l'anglais technique, l'esprit de travail en équipe, etc.

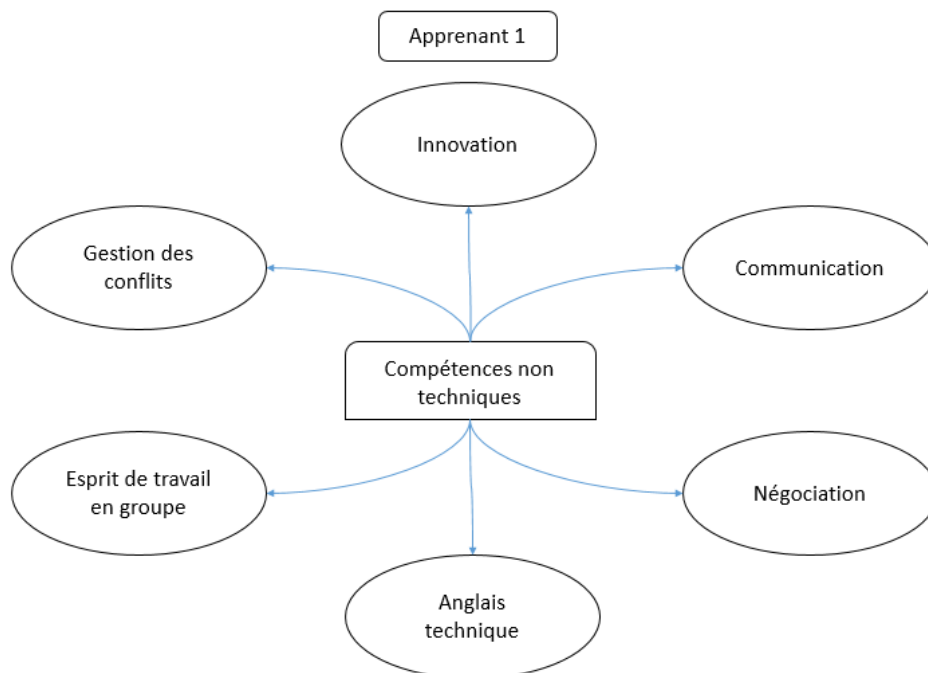


Figure 71: Contenus non techniques

L'apprenant et les formateurs peuvent communiquer individuellement ou en groupe via les outils de communication collaboratifs.

8.3. Droits de l'administrateur

L'administrateur, qui peut être par exemple le chef d'équipe ou le responsable RH, va surveiller sur le LMS le déroulement de la formation des apprenants et le contenu proposés par les formateurs, il peut également accéder à la synthèse des apprenants pour voir le statut de chaque apprenant et de son développement dans la formation (formation complète, ou encours ou non démarrée).

L'administrateur est en charge de tout ce qui est en relation avec la maintenance du système, la gestion des accès et des droits des utilisateurs et la création des liens avec les systèmes d'information externes (figure 72).

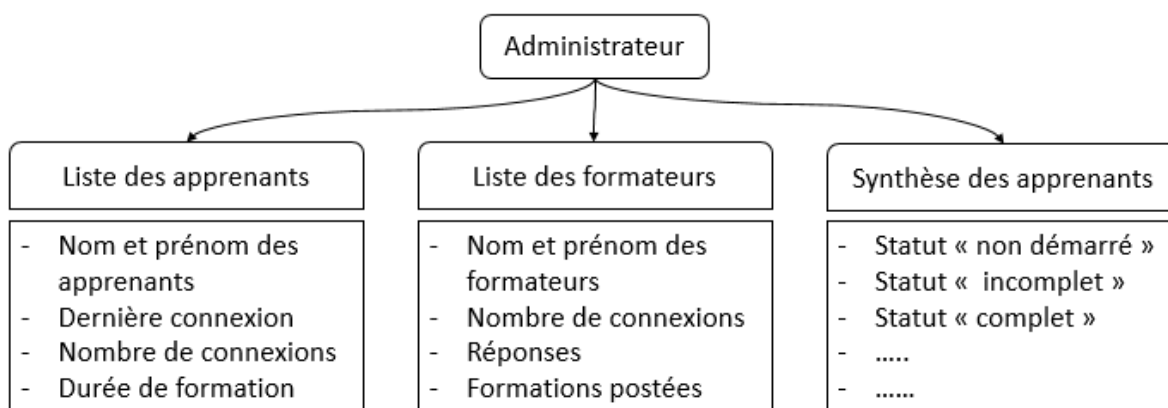
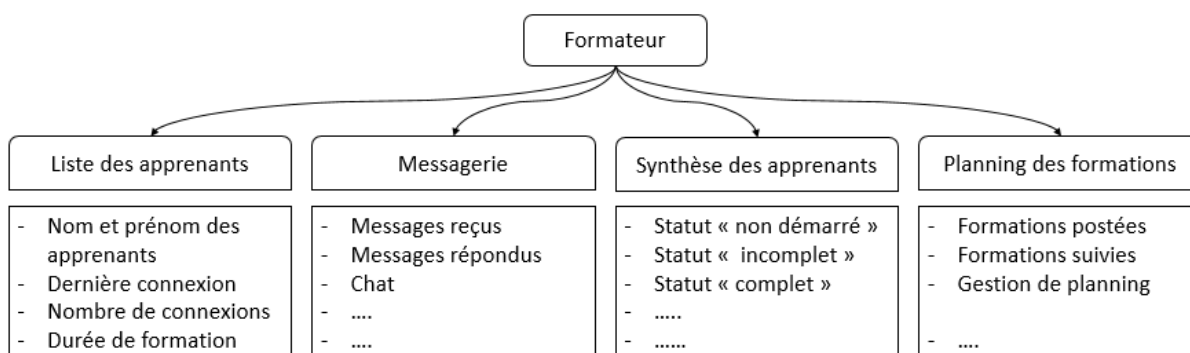


Figure 72: Droits de l'administrateur

8.4. Droits du formateur

Le formateur, peut être interne ou externe, prépare des contenus pédagogiques adaptés au besoin de l'entreprise qui sont de types multimédia et interactifs destinés à des groupes d'apprenants (figure 73).



Il peut avoir aussi une vue sur le suivi pédagogique individuel des apprenants (temps de connexion, validation de la formation, etc.) ce qui lui permet d'agir pour l'accompagner d'une manière synchrone (discussion instantanée via le LMS) ou asynchrone (envoi des messages) et il peut également accéder à des statistiques consolidées des apprenants et leurs progressions.

9. Modélisation avec UML

La conception d'un modèle quelconque et l'abstraction de ce modèle de n'importe quel système définissent le concept de la modélisation, d'une manière plus simple la modélisation est une sorte de simplification de la réalité souvent d'une manière graphique. Cette représentation simplifiée de la réalité a pour objectif la visualisation des systèmes complexes dont il est difficile de les comprendre dans ces états normaux.

UML « Unified Modeling Language » est un langage de modélisation unifié c'est-à-dire qu'il s'agit d'un langage de modélisation graphique normalisé qui permet la représentation de divers aspects de la conception d'un système. Il a pu unifier les meilleures pratiques d'ingénierie des systèmes d'information et de l'industrie technologique.

L'approche UML permet la simplification de la représentation visuelle des systèmes et la génération automatique du code informatique dans plusieurs langages informatique avec une seule contrainte qu'ils soient orientés objets. Puisqu'il n'est pas un langage fermé, son application est très large [156] dans différents types de systèmes, de domaines voire de l'industrie.

UML comporte plusieurs diagrammes qui permettent la représentation de toute la fonctionnalité des systèmes, nous allons nous intéresser par deux diagrammes : diagramme de classe et diagramme de cas d'utilisation. Ces deux diagrammes sont les plus importants dans la modélisation avec UML.

9.1. Diagramme de classe

Le diagramme de classe, dans la programmation orientée objet, est le seul diagramme obligatoire dans la modélisation parce qu'il représente la structure interne du système et spécifie les interactions entre ces classes. Il permet également la décomposition des tâches plus complexes en petites très simples et compréhensibles.

Les trois classes de notre plateforme *Apprenant* (employé), *Formateur* et *Administrateur* héritent tous les attributs protégés de la classe *Utilisateur* et les propriétés additionnelles de chaque classe (figure 74).

L'*Apprenant* peut être engagé dans une ou plusieurs formations, comme il peut passer un ou plusieurs tests à la fois à l'aide d'une classe-association appelé *test apprenant*.

La discussion entre l'*Apprenant* et le *Formateur* peut être établie entre un ou plusieurs. Une classe-association nommée *Communication* possédant les caractéristiques des associations et des classes *Apprenant* et *Formateur* va faciliter la discussion entre ces deux classes.

La classe *Formation* peut être consultée par personne ou plusieurs apprenants. La classe *Test* peut avoir au moins une ou plusieurs réponses.

La *Formation* peut se composer d'un ou plusieurs thèmes, chaque *Thème* peut se composer lui-même d'un ou plusieurs modules et chaque *Module* se compose d'un ou plusieurs *Chapitres*.

Dans le diagramme de classe en dessous, chaque classe contient des attributs qui leurs caractérisent. Les attributs utilisés dans ce diagramme sont de type : les chaînes de caractères, les entiers, les booléens et la date.

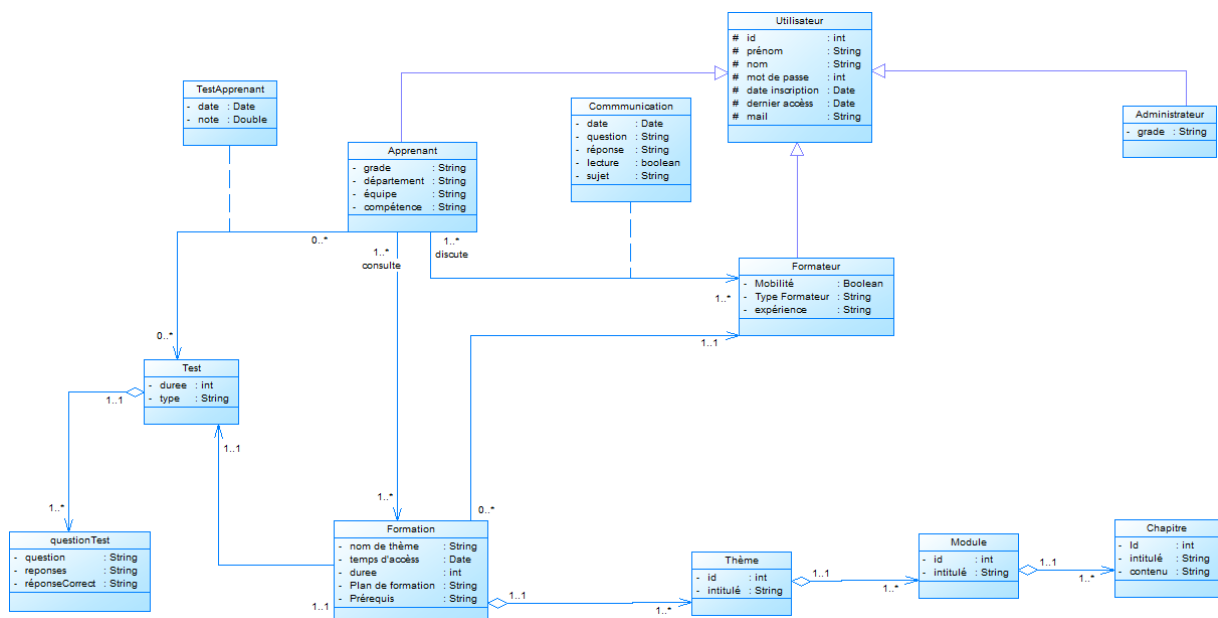


Figure 74 : Diagramme de classe de la plateforme

9.2. Diagramme de cas d'utilisation

Un diagramme de cas d'utilisation permet de recenser et représenter les fonctionnalités que doit présenter un système quelconque, d'une manière plus simple c'est d'exprimer les besoins des utilisateurs. Le diagramme de cas d'utilisation (figure 75) sert également à décrire précisément le comportement et les interactions possibles entre tous les acteurs (les intervenants externes) et le système.

L'accès à la plateforme est lié essentiellement à l'authentification des acteurs (*apprenant, formateur et administrateur*) avant de continuer à utiliser les autres fonctionnalités de la plateforme, ce qui la rend une première étape.

Le formateur possède deux fonctionnalités principales : la communication avec les formés et la proposition des formations. La gestion des formations permet au formateur soit l'ajout, la modification ou la suppression des formations. La consultation des formations donne au formateur une idée sur les statistiques et le suivi des formés. La gestion des tests lui permet également d'ajouter, de modifier ou de supprimer les tests.

La plateforme assure à l'apprenant le suivi de la formation souhaitée, l'autoévaluation et le passage du test final qui lui permettra de passer à une autre formation s'il est nécessaire. Comme il peut communiquer avec le formateur en lui demandant une nouvelle information et consulter les réponses provenant du formateur.

Le rôle de l'administrateur de la plateforme réside dans la gestion des formateurs et des apprenants. Il va contrôler et suivre les formateurs c'est-à-dire le type et la durée de la formation et la nature du formateur etc. la gestion des apprenants consiste à leurs inscrire dans les formations adéquate et faire leurs suivis ainsi que la suppression de leurs comptes quand ils termineront la formation.

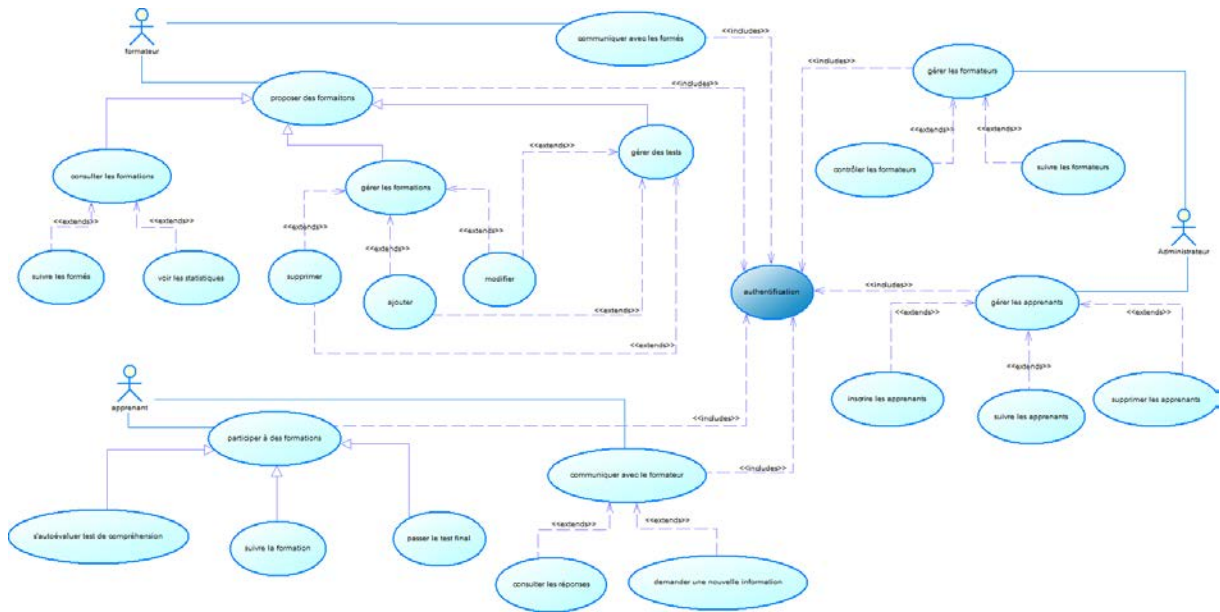


Figure 75: Diagramme de cas d'utilisation⁵

La modélisation visuelle et graphique avec le langage UML illustre la simplicité de la plateforme et permet la modification sans se disperser dans les lignes de codes des différents langages de programmation orientée objet. Pourtant, l’UML intègre des outils internes qui génèrent le code source selon le langage choisi. Dans la plupart des cas, le langage programmation orientée objet java reste parmi les plus utiliser pour la création des applications et plateformes. La figure 76 représente un extrait du langage de la programmation orientée objet avec java généré par le logiciel de modélisation UML, il s’agit du code de la classe formation.

⁵ Voir l’annexe D pour plus de clarté (figures 80, 81 et 82)

```

1  | 1 | .....
2  | 2 | * Module: Formation.java
3  | 3 | * Author: Mohammed bakkari
4  | 4 | * Purpose: Defines the Class Formation
5  | 5 | ...../
6  | 6 |
7  | 7 | import java.util.*;
8  | 8 |
9  | 9 | /** @pdGenerated default getter */
10 |10 | public java.util.Collection<Theme> getTheme() {
11 |11 |     if (theme == null)
12 |12 |         theme = new java.util.HashSet<Theme>();
13 |13 |     return theme;
14 |14 | }
15 |15 |
16 |16 | /** @pdGenerated default iterator getter */
17 |17 | public java.util.Iterator getIteratorTheme() {
18 |18 |     if (theme == null)
19 |19 |         theme = new java.util.HashSet<Theme>();
20 |20 |     return theme.iterator();
21 |21 | }
22 |22 |
23 |23 | /** @pdGenerated default setter
24 |24 |     * @param newTheme */
25 |25 | public void setTheme(java.util.Collection<Theme> newTheme) {
26 |26 |     removeAllTheme();
27 |27 |     for (java.util.Iterator iter = newTheme.iterator(); iter.hasNext();)
28 |28 |         addTheme((Theme)iter.next());
29 |29 | }
30 |30 |
31 |31 | /** @pdGenerated default add
32 |32 |     * @param newTheme */
33 |33 | public void addTheme(Theme newTheme) {
34 |34 |     if (newTheme == null)
35 |35 |         return;
36 |36 |     if (this.theme == null)
37 |37 |         this.theme = new java.util.HashSet<Theme>();
38 |38 |     if (!this.theme.contains(newTheme))

```

Figure 76: Extrait du code java de la classe formation

10. Modèle d'acceptation de la technologie

La migration des PME marocaines vers une nouvelle méthode de formation, qui a pris un grand essor dans le milieu académique, sera très difficile voire rejetée. Le refus de tout changement est appelé par les sociologues la résistance au changement, pour expliquer la résistance technologique chez l'utilisateur Fres Davis a proposé le modèle d'acceptation de la technologie TAM (pour Technology Acceptance Model) [157], [158], [159] dont il est basé sur la théorie de l'action raisonnée. Le TAM est généralement jugé comme le modèle le plus connu dans les systèmes d'information et le plus influent pour des études empiriques [160].

Le TAM permet d'expliquer l'adoption ou le refus d'une application informatique que ce soit destinée au grand public ou bien aux établissements. Il tente de prédire le comportement de l'individu (acceptation ou refus) dont il est caractérisé par une intention d'agir, notamment avec un accroissement incontestable de l'utilisation des outils informatiques.

Le modèle d'acceptation technologique repose sur deux concepts principaux sur lesquels l'individu peut juger cette application technologique est acceptable ou non. Les deux concepts [157], [158], [159] sont illustré dans la figure 77 et qui sont :

- La facilité d'utilisation perçue généralement connu par PEOU (Perceived Ease of Use) : « le degré auquel une personne pense que l'utilisation d'un système ne nécessite pas d'efforts ».
- L'utilité perçue généralement dénommée PU (Perceived Usefulness) : « le degré avec lequel une personne pense que l'utilisation d'un système améliore sa performance au travail ».

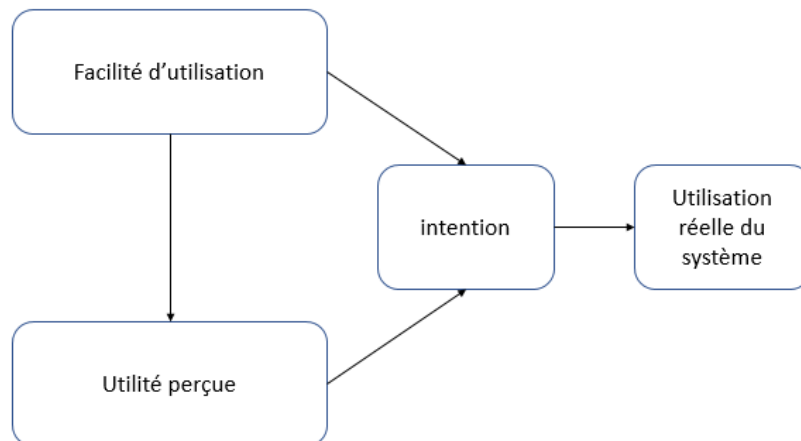


Figure 77: Concept du modèle TAM

Dans ce modèle, la facilité d'utilisation perçue d'une application technologique influence son utilité perçue. Si deux applications apportent la même utilité à l'utilisateur, son choix sera lié par celle qui est facile à utiliser.

En effet, il arrive certainement que certains agents des systèmes automatisés refusent et n'utilisent pas la formation e-learning pour développer leurs compétences puisqu'elle sera considérée comme une nouvelle technologie. Selon le modèle d'acceptation de la technologie TAM les deux principes doivent être pris en considération lors du développement de la plateforme e-learning, en plus elle doit présenter des caractères attracteurs qui favorise l'approbation et éviter les caractères répulsifs qui sont la base de la non-approbation [157].

11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté premièrement les compétences techniques et non techniques respectivement Hard and Soft Skills, ainsi que les modes d'acquisition de compétences (enseignement supérieur, formation continue, coaching, ILT et e-learning). Deuxièmement, nous avons élaboré la plateforme e-learning en déterminant les droits de chaque utilisateur (apprenant, formateur et administrateur) et modélisé les diagrammes de classe et de cas d'utilisation de cette plateforme à l'aide de l'UML.

Conclusion Générale

Au terme de ce travail, nous récapitulons brièvement l'itinéraire de recherche parcouru dans notre thèse. Nous nous sommes donc assignés comme objectif général d'étudier la relation qui existe entre les systèmes automatisés industriels de production et leurs impacts sur l'économie, l'environnement et le social dans les PME marocaine.

Nous avons commencé, dans le premier chapitre, par donner un lot de définitions sur les PME dans le contexte marocain ce qui nous a permis de choisir celle qui la caractérise par le nombre de salariés (ne dépassant pas 200 salariés) et par le chiffre d'affaire (75 millions de Dh) en adéquation avec la définition des institutions et des établissements marocains et qui a été sélectionnée pour être la définition référence sur laquelle nous avons choisi les PME sujet de notre étude (notre choix n'est fait que sur le nombre de salariés dont il est facile à vérifier). Ensuite, nous avons mentionné la place du développement durable et la nouvelle technologie de l'information et de la communication dans le progrès des PME. Enfin, nous avons présenté les caractéristiques des PME participantes à notre étude.

Dans le deuxième chapitre, nous avons détaillé les systèmes automatisés industriels de production à partir de la mécanisation jusqu'à l'apparition de l'électronique qui a bouleversé le domaine industriel par l'introduction des automates programmables industriels et ensuite par l'utilisation des réseaux locaux industriels dans le contrôle et la commande des processus. Nous avons également présenté l'automatisation fixe, programmable et flexible, ainsi que le cas d'utilisation de chaque type selon les besoins en production des PME. Comme nous avons expliqué les niveaux de la pyramide de l'automatisation (niveau terrain, niveau de contrôle, niveau de supervision et niveau supérieur) et les trois étapes de l'exécution d'un cycle automatisé (acquisition de données, analyse des données et contrôle de l'exécution), ainsi que la description de la partie commande, de la partie opérative et la supervision.

Nous avons centré notre intérêt, dans le même chapitre, sur la modernisation des systèmes automatisés grâce à l'industrie 4.0 d'où la communication continue et instantanée entre les différents systèmes industriels et outils intégrés dans la chaîne de production à l'aide des capteurs connectés ou bien des puces RFID. Quant à la forte volonté d'investissement, tant en équipements qu'en personnel qualifié, tous les pays du monde visent une stratégie industrielle à l'horizon 2030 qui gravite autour d'un pivot central basé sur l'acquisition de la haute gamme des systèmes automatisés industriels afin de maintenir leurs places dans la course économique.

Nous avons élaboré dans le troisième chapitre notre questionnaire qui a été divisé en cinq parties : la première partie du questionnaire consiste à avoir des informations générales sur les PME et nous les avons présentées au premier chapitre, la deuxième partie a contenu la grandeur économique des PME, la troisième partie a été dédiée à l'aspect environnemental, la quatrième partie a été réservée à l'approche sociale dans les PME et la cinquième partie a contenu le niveau d'acquisition des systèmes automatisés industriels par ces PME. Ce questionnaire a servi de toile de fond à notre discussion de résultats, nous avons veillé à faire une contribution adéquate avec les besoins des PME et des salariés.

Une fois notre piste de contribution est fixée, nous avons attaqué la partie de la conception et de la modélisation de la plateforme, en partant d'abord par expliquer l'intérêt des compétences chez le salarié et leurs types (techniques ou non techniques). Ensuite, nous avons montré les avantages et les inconvénients de chaque mode d'acquisition des compétences (Enseignement supérieur, formation continue, coaching, ILT et e-learning). Puis nous avons choisi le mode le plus convenable pour les PME et les salariés. Le compromis entre ces deux parties est délicat, c'est pour cela nous avons proposé de faire de la formation à leurs salariés de type e-learning qui leurs permette d'approfondir leurs compétences n'importe où et selon leurs disponibilités et leurs rythmes d'une part. D'autre part, le e-learning va permettre aux PME de se libérer des entraves de démission des compétences puisque la formation sera toujours disponible aux autres salariés. Concernant le modèle d'ingénierie de formation, nous avons choisi le modèle pragmatique SAM sur lequel nous avons posé les piliers de notre plateforme. Nous avons mentionné également les droits d'utilisation de chaque utilisateur (formateur, apprenant et administrateur) du e-learning. Enfin, nous avons modélisé les deux diagrammes de la plateforme sur l'UML celle de cas d'utilisation et de classe qui sont les plus importants dans la modélisation et nous avons explicité les facteurs encourageant d'accepter la nouvelle technologie dans le modèle d'acceptance de la technologie.

Nous pouvons mentionner que l'impact de l'automatisation dans les PME marocaines n'a pas, jusqu'à maintenant, de graves conséquences ni sur l'environnement ni sur l'emploi puisque le licenciement n'a pas eu lieu à cause de l'automatisation selon notre étude. Par contre, son impact sur l'économie peut créer de véritables opportunités pour les PME surtout celles qui exportent leurs produits. Cependant, la vague de l'industrie commence à s'agrandir grâce à la transformation numérique et tous les pays s'apprentent à se doter des systèmes automatisés industriels de production modernes, et cela pourra créer, dans les dix années qui suivent, un impact très puissant que les PME ne peuvent pas le gérer immédiatement, il ne

suffit pas de réagir à ce moment, il faut donc anticiper ces changements par la préparation et la formation de l'ensemble des personnes ayant contact avec les systèmes automatisés tel que les ingénieurs, les techniciens et les opérateurs, vu que la quatrième révolution industrielle va se maturer durant ces dix années prochaines.

Limites de la recherche

Nous ne manquerons pas de souligner que la présente étude se veut une modeste contribution à la compréhension de l'impact réel des systèmes automatisés dans les PME marocaines, et un témoignage de plus pour saisir l'occasion de souligner l'importance de l'adaptation de la formation des salariés avec les besoins des PME et le progrès technologique.

Cette étude malgré qu'elle ait essayé de toucher que les secteurs porteurs dans l'économie marocaine, elle n'arrive pas à être une étude exhaustive parce que d'autres secteurs l'ont échappée. En outre, le nombre des PME contacté apparaît très intéressant et donne une signification à l'étude, mais les PME répondantes effectivement à notre questionnaire est faible par rapport à ce que nous avons souhaité. En plus du choix des villes industrielles qui n'a pas couvert toutes les villes marocaines mais il s'est limité que sur trois villes.

Nous avons eu un grand espoir, au début de notre étude, d'interroger quelques salariés de ces PME participantes afin d'avoir une idée claire sur ce que représente l'automatisation pour eux mais en vain. Puisque l'accès aux PME était très difficile pour remplir le questionnaire, l'entretien avec leurs salariés était très difficile aussi. Et celles qui ont voulu nous répondre, leur durée de réponse était très longue malgré plusieurs tentatives de sollicitation de notre part.

Perspectives

A la fin de ce travail, l'ouverture sur d'autres voies de recherches sous plusieurs angles différents devient une nécessité afin de mieux cerner l'intégration de ce nouveau type de formation, e-learning, dans les PME en tant que mode incontournable de la formation et en relation avec le développement des compétences des salariés.

- Il serait souhaitable de continuer la concrétisation de la plateforme de formation e-learning en continuant son développement en concertation avec une PME. L'accord de la PME de faire partie dans l'implémentation de cette plateforme permettra de tester facilement l'acquisition des compétences via l'e-learning chez leurs salariés. Une telle plateforme doit être évaluée en amont et en aval afin de juger son utilité,

et par conséquent la conception d'un système d'évaluation doit être posé en adéquation avec la PME.

- Nous espérons également élargir le champ de notre étude sur d'autres secteurs d'activités et d'autres villes afin de concevoir une étude exhaustive de l'impact des systèmes automatisés afin de servir comme base de données aux décideurs et les parties prenantes.
- Par ailleurs, la nouvelle révolution industrielle est un domaine ne dépassant pas les dix années. Tous les domaines en relation tel que le Bigdata, le cloud computing et les systèmes cyber-physiques sont donc récents et par conséquent la demande des personnes hautement qualifié sera une nécessité dans le pays pour encourager les investisseurs à y débarquer, d'où la nécessité de faire des recherches sur les compétences afin de savoir celles vulnérables et celles qui seront plus demandées dans le contexte marocain afin de commencer, dès maintenant, à former les jeunes étudiants pour qu'ils apprêtent à ce changement.

Annexes

Annexe A : Architecture du protocole ZigBee

Couche physique

La couche physique (PHY) est la couche la plus basse définie dans le standard IEEE 802.15.4 [161]. Elle permet de transformer un signal en un signal compatible avec le support choisi (cuivre, fibre optique, y compris l'émetteur/récepteur radio etc.). Cette couche fournit des outils de transmission de bits à la couche supérieure qui les utilisera sans se préoccuper de la nature de medium utilisé. La couche physique du ZigBee est en fait constituée de deux couches physiques, supportant trois plages de fréquences (tableau 13) 2450 MHz, 915 MHz et 868 MHz, les trois bandes utilisant le mode d'accès DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum). Avec les trois plages de fréquences, la couche physique offre 27 canaux de transmission différents.

Tableau 13: Débit en fonction de la fréquence et de la modulation de la couche physique

Fréquence (MHz)	Modulation	Débit (kb/s)
868/868.6	BPSK	20
	ASK	250
	O-QPSK	100
902/928	BPSK	40
	ASK	250
	O-QPSK	250
2400/2483.5	O-QPSK	250

L'usage de ces canaux dépend de la législation des pays dans lesquels des solutions conformes à ce standard sont utilisées. Parmi les fonctionnalités de contrôle de cette couche, nous pouvons disposer de celles qui permettent de :

- Activer et désactiver le module radio.
- Remonter l'état d'un lien à la couche supérieure.
- Tester l'occupation du canal en faisant un CCA (Clear Channel Assessment).
- Choisir le canal de transmission.

Couche MAC (Media Access Control)

Le rôle de la couche MAC est de contrôler l'accès au canal radio via le mécanisme CSMA/CA. Cela comprend la coordination d'accès à la liaison radio commune et la programmation et l'acheminement des trames de données. La sous-couche MAC fournit deux services : le service de données et le service gestion de l'interfaçage de la sous-couche MAC.

Le service des données du MAC permet la transmission et la réception des unités de données du protocole MAC (MPDU), à travers le service de données de la couche physique (PHY) [162].

La couche MAC effectue des tâches principales qui sont décrites ci-dessous :

- Définition de trames de données (tableau 14) : Avant la transmission la couche MAC encapsule les données dans une trame MAC et l'envoie au nœud. Le nœud accepte uniquement les trames adressées à lui. Puis, les trames reçues sont désencapsulées et vérifiées s'il y'a des erreurs provenant lors de la transmission.
- Adressage des périphériques : Chaque périphérique dispose de 64 bits d'adresse de la couche MAC qui est utilisé pour identifier les périphériques. L'expéditeur envoie l'adresse comme destination pour les paquets envoyés sur la couche MAC.
- Emploi du mécanisme CSMA/CA (CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) : C'est une méthode d'accès utilisée sur les topologies bus. Elle a pour but d'éviter les collisions et de les détecter si elles se produisent, elle se base sur le principe « écoute avant l'envoi ».
- Association et dissociation de périphériques : À la demande des couches supérieures la couche MAC effectue l'association et la dissociation du dispositif entrant ou quittant le réseau.
- Accusé de réception : Utilisé pour confirmer la réception de trame avec succès. [163]

Tableau 14: Trame de la couche MAC

2 octets	1 octet	De 4 à 20 octets				Variable	2 octets
Trame de contrôle	Numéro de séquence	Destination de PAN	Destination	ID source PAN	Adresse source	Charge de trame	FCS *
	MAC					Charge de MAC	MAC footer

*FCS : Frame Check Sequence est le code de détection d'erreurs

Couche de réseau (Network -NWK)

La couche réseau de ZigBee est restée compatible avec la couche MAC IEEE 802.15.4 en assurant des fonctionnalités complémentaires et compatibles avec celles de la couche MAC. Il s'agit soit de fonctionnalités liées à la transmission de données, comme l'encapsulation des

données applicatives et le choix du prochain saut du cheminement du paquet, soit de fonctionnalités liées à la gestion, comme la gestion des tables de routage, la configuration de la topologie et l'allocation des adresses logiques [164].

Les fonctionnalités de gestion essentielles de la couche réseau de la pile IEEE 802.15.4/ZigBee :

- Création de la topologie.
- Allocation des adresses.
- Routage.

Couche d'application

Le but de la couche d'application (APL) est de fournir une plate-forme de développement (l'Application Framework) pour des applications distribuées. Le ZigBee identifie les ZDOs (ZigBee Device Object) qui sont responsables de la gestion de l'ensemble périphérique et de la sécurité. Le ZDO est comme un objet d'application particulier qui réside sur tous les nœuds ZigBee.

Le protocole ZigBee prévoit deux types d'entités réseau :

- Les FFD (Full Function Device) est un dispositif ayant toutes les fonctions possibles. Ils ont trois rôles possibles : coordinateurs PAN (Personal Area Network), routeur ou dispositif terminal (End-Device).
- Les RFD (Reduce Function Device) sont des entités allégées dans un objectif de moindre consommation énergétique et de moindre utilisation mémoire pour le microcontrôleur. Ils sont généralement des nœuds terminaux du réseau (End-Device).

Pour communiquer sur un même réseau, un FFD (au moins) et des RFD doivent utiliser le même canal physique parmi ceux définis selon la bande de fréquence choisie. Le FFD peut dialoguer avec des RFD et des FFD, tandis que le RFD dialogue avec un FFD uniquement.

Le coordinateur

Il y en a un, et un seul, coordinateur ZigBee dans chaque réseau à agir comme le routeur à d'autres réseaux, et peut être comparé à la racine d'un (réseau) arborescence. Il est conçu pour stocker des informations sur le réseau. Ce coordinateur doit d'être présent tout au long de la vie du réseau. Il est donc fortement conseillé d'alimenter en permanence ce module (pas de

pile). Il est aussi possible de mettre le coordinateur sur onduleur (batterie de grande capacité avec recharge automatique).

Les routeurs

En plus de l'exécution d'une fonction d'application, un routeur dispose de toutes les fonctions d'un module End-Device (dispositif terminal du réseau), il peut agir comme un routeur intermédiaire, en passant sur des données provenant d'autres appareils. Il a besoin de mémoire moindre que le nœud coordinateur.

Les End-Devices

Ce sont tous des modules terminaux dont ils ne sont actifs que sur changement de leurs états ou sur réponse à une trame, ils ne peuvent pas transmettre des données avec d'autres appareils. La consommation énergétique des End-Devices est donc faible et ils peuvent tout à fait être alimenté par des piles ou des batteries.

Topologies du ZigBee

Le réseau ZigBee est un réseau maillé sans fil. Chaque nœud (module) doit s'identifier avant de rejoindre le réseau. La norme IEEE 802.15.4 met en place deux topologies : étoile et point à point.

Etoile

Dans cette configuration, le coordinateur (PAN coordinator), appelé parfois la pièce maîtresse, joue un rôle de passerelle d'où toutes les informations passent par lui. Il contrôle les entités qui ne communiquent qu'avec lui (figure 78). Par exemple, Si une entité A veut dialoguer avec une entité B, la communication doit forcément passer par le coordinateur.

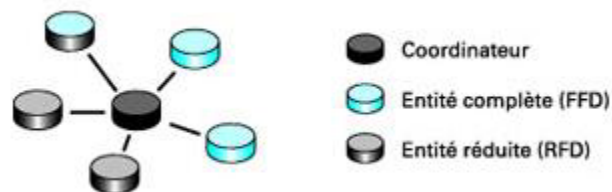


Figure 78: Topologie étoile ⁶

Les entités sont très simples et la saturation du protocole n'est faite que sur une couche simplifiée. Le fonctionnement de la topologie étoile est garanti par l'alimentation du coordinateur qui est généralement fixe.

⁶ <https://blog.domadoo.fr/guides/principe-du-protocole-zigbee/>

Point à Point

Les dispositifs sont capables de dialoguer directement entre eux s'ils sont à proximité ou bien d'utiliser le coordinateur pour contacter un dispositif à plus longue distance (figure 79). Dans cette topologie, les entités sont plus compliquées et incorporent complètement le protocole Zigbee. La génération de la table de liaison permet à chaque dispositif d'être le coordinateur qui permet à deux dispositifs éloignés de dialoguer par l'intermédiaire d'un élément à portée.

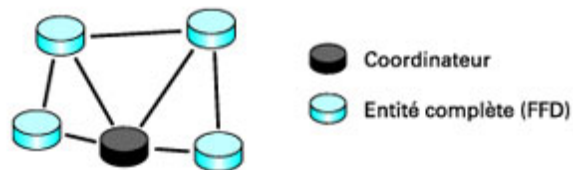


Figure 79: Topologie point à point⁷

⁷ Idem.

Annexe B : Questionnaire



Université Sidi Mohamed Ben Abdellah
Ecole Supérieure de Technologie de Fès
Laboratoire Productique Energétique Développement Durable



Cette enquête a pour objectifs académique, **vos réponses vont rester confidentielles.**
Et, d'ores et déjà, merci d'avoir bien voulu répondre à cette enquête.

I-Entreprise

1. Secteur d'activité :

Textile

Agroalimentaire

Automobile

2. Taille de l'entreprise (employés) :

10 à 49

50 à 99

100 à 200

3. Le genre et le grade professionnel :

	Hommes	Femmes
Cadres
Techniciens
Employés
Ouvriers qualifiés
Ouvriers non qualifiés

4. La tranche d'âge :

	18-24 ans	25-44 ans	45-54ans	Plus de 55 ans
Cadres
Techniciens
Employés
Ouvriers qualifiés
Ouvriers non qualifiés

5. Depuis combien d'années l'entreprise s'est créée :

Entre 4 et 6

Entre 7 et 10

Plus de 10

II-Aspect Economique

1- Disposez-vous de :

- Une équipe (shift) 2 équipes 3 équipes

2- Quantité de biens fabriqués par jour (une seule équipe) :

- Moins de 200 De 200 à 400 De 400 à 600
 Plus de 600 Autres :

3- Cette quantité dépend de :

- La sous-traitante La concurrence
 La production normale Autres :.....

4- Le temps nécessaire pour fabriquer un seul produit

- Moins d'une minute entre 1 à 2 minutes
 entre 3 à 5 minutes plus de 5 minutes

5- La qualité des produits est-elle :

- Moyenne Bonne
 Excellente Autres :

6- Faites-vous un test de qualité:

- Chaque produit Un échantillon
 Pas de contrôle Autres :

7- Le contrôle qualité est effectué par :

- Les salariés Les systèmes automatisés

8- Jugez-vous le prix des produits est :

- Moins cher Convenable
 Cher Plus cher

9- Pourquoi ce choix :

- Qualité du produit Concurrence Coût de la production

10- Votre production est destinée au marché:

- National International (export)

III-Aspect Environnemental

1- La source énergétique utilisée dans l'entreprise :

- Electrique Solaire Fuel

2- La consommation énergétique mensuelle en (KVA) :

- Moins de 4000 De 4000 à 7000
 De 7000 à 1000 Plus de 10000

3- Cette consommation est :

- Réduite Raisonnable
 Elevée Autres :

4- Pensez-vous à réduire cette consommation par le biais de :

- Panneaux solaires Arrêt des machines inutiles
 Délégué à un bureau d'étude Autres :

5- La consommation majeure est due aux :

- Systèmes de production Ordinateurs Eclairage

6- Les systèmes de production fonctionnent sans arrêt pendant :

- 8 heures 16 heures 24 heures

7- Coupez-vous de l'électricité chaque :

- Fin de la journée Pause déjeuner Jamais

8- Types de vos déchets industriels :

- Solide Liquide Gaz

9- Le processus de traitement des déchets industriels :

- Recyclage Décharge
 Collecté par une autre entreprise Autres :

IV- Aspect Social

1- Avez-vous déjà organisé des formations :

- Oui Non

2- Les salariés ayant fait la formation :

	Homme		Femmes	
	Moins de 5 fois	Plus de 5 fois	Moins de 5 fois	Plus de 5 fois
Ingénieurs				
Techniciens				
Employés				

3- Est-il nécessaire de faire une formation pour les nouveaux recrues :

- Oui Non

4- Pensez-vous que leurs cursus s'adaptent avec les besoins de l'entreprise :

- 0% (pas du tout) 20% (rarement)
- 50% (des fois) 70% (souvent)
- 100% (toujours)

5- La formation est organisée autour des thèmes suivants :

- Informatiques, nouvelles technologies
- Formation structurée sur des compétences de base
- Formations techniques industrielles
- Commerce, ventes, marketing
- Hygiène et sécurité, conditions de travail
- Formation structurée spécifique à une fonction
- Formation structurée associée à des changements dans l'organisation
- Autres :

6- Modes de formation :

- Interne Externe Alterné

7- L'impact de la formation sure :

➤ La personnalité :

- Ponctualité
- Aptitude à communiquer, à être sociable
- Motivation, intérêt pour les activités confiées
- Capacité à travailler en équipe
- Niveau des connaissances
- Gestion des conflits

➤ L'emploi

- Capacité à organiser le travail
- Capacité à s'adapter aux objectifs, besoins, exigences, contraintes de la mission
- Capacité à travailler de façon autonome
- Efficacité et qualité du travail réalisé
- Niveau des compétences, savoir-faire

➤ L'entreprise

- Adaptation dans l'entreprise
- La compétitivité de l'entreprise
- Augmentation de la productivité

8- Degré d'atteinte des objectifs de formation :

De 0 à 20 %

De 20 à 50 %

De 50 à 70 %

De 70 à 100 %

V-Automatisation

1- Combien d'équipements automatisés disposez-vous dans l'entreprise :

- Moins de 10 Entre 10 et 20 Plus 20

2- Les systèmes automatisés sont-ils installés:

- Le jour de la création de l'entreprise Lors du lancement d'un nouveau produit

3- L'utilisation des systèmes automatisés par :

- Les ingénieurs Les techniciens Les opérateurs

4- Pensez-vous que les employés aient les compétences nécessaires pour l'utilisation des équipements :

- De 0 à 20% De 20 à 50% De 50 à 70% Plus de 70%

5- Le réseau local industriel (RLI) que vous disposez :

- Profibus Modbus Interbus Ethernet/IP
 AS-Interface Pas de RLI Autres :.....

6- Quel est l'obstacle majeur à ne pas avoir un RLI :

- L'opportunité ne s'est pas présentée Risque de perte d'argent
 N'est pas nécessaire Autres :

7- Disposez-vous d'un système de supervision :

- Oui Non

8- Qui prend en charge de la supervision :

- Opérateur Technicien Ingénieur

9- Quelle est l'influence de l'automatisation en effectif sur l'entreprise :

- Stable Recrutement Licenciement

Suggestions :

.....
.....
.....

Cachet de l'entreprise :

Votre cachet donne la crédibilité à cette étude.

Remarque : les résultats vont rester confidentiels.

Vos remarques, vos suggestions nous intéressent, n'hésitez pas à nous en faire part avec le retour de ce questionnaire.

Merci à vous d'avoir pris le temps de répondre à ce questionnaire.

Annexe C : Travaux scientifiques

Articles scientifiques publiés dans des journaux

- M Bakkari, A Khatory « Agents of Automated Systems and Training: What Impacts in SMEs? », *Research Journal of Applied Sciences* 13 (5), 313-321, 2018.
- M Bakkari, A Khatory «Level of Automation in the Small and Medium-sized Enterprises and its Impact (Case Study) », *Journal of Engineering and Applied Sciences* 13 (7), 1701-1706, 2018

Communications publiées dans des conférences avec comité de lecture

- Mohammed Bakkari, Abdellah Khatory «*Industry 4.0: Strategy for more sustainable industrial development in SMEs*», 2017 IEOM 7th International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Proceedings 1693-1700
- Mohammed Bakkari, Abdellah Khatory « *E-Learning pour les agents des systèmes automatisés : vers de nouvelles compétences à acquérir* », Le Colloque International sur le Monitoring des Systèmes Industriels (CIMSI 2016), le 19-20 Octobre 2016, l'Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Fès.
- Mohammed Bakkari, Abdellah Khatory « *Exigences des PME pour migrer durablement vers l'Industrie 4.0* », Le Colloque International sur le Monitoring des Systèmes Industriels (CIMSI 2016), le 19-20 Octobre 2016, l'Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Fès.
- Mohammed Bakkari, Abdellah Khatory « *Evolution of automated production systems in SMEs: what are the consequences for the employees?* » Xth International Conference on Integrated Design and Production, CPI 2015, December 2-4, 2015, Tangier -Morocco.
- Mohammed Bakkari, Abdellah Khatory « *Amélioration de la performance industrielle par l'intégration de nouvelles technologies* » Congrès International de Génie Industriel & Management des Systèmes "CIGIMS 2015" -EST de Fès, les 21, 22 et 23 mai 2015
- Mohammed Bakkari, Abdellah Khatory «*Industrial Supervision based on wireless networks* »The International Conference on Wireless Technologies, embedded and intelligent Systems WITS-2015, 29-30 April 2015, at ENSA Fez, Morocco.
- Mohammed Bakkari, Abdellah Khatory « *Implémentation du Wireless Personal Area Network (WPAN) dans les PME marocaines : cas du protocole ZigBee* » Dans le colloque international sur le monitoring des systèmes industriels 2014 (CIMSI'2014), le 25, 26 décembre 2014, Marrakech, Maroc.
- Mohammed Bakkari, Abdellah Khatory « *Contribution de l'assurance qualité de l'enseignement supérieur et de la formation professionnelle continue au développement des entreprises* » Le colloque, international à l'Université libre de Bruxelles du 16 au 18 octobre 2014, sous le thème « la Qualité dans l'enseignement supérieur », Bruxelles, Belgique.

- Mohammed Bakkari, Abdellah Khatory « *Le rôle de la bonne gouvernance de l'enseignement supérieur et la qualité de la formation continue pour le développement durable des PME/PMI* » Workshop International IUE'3 –2014 Fès ,3ème édition, sous le thème : La qualité de l'enseignement supérieur, une question de bonne gouvernance ? » Fès, Maroc

Participation aux événements doctoraux

- Projet « E-Compétences Bin Bin » est primé le troisième prix lors du Hack & Pitch Hackathon 2017, cité de l'innovation de Fès, le 14 et 15 octobre 2017.
- Projet « E-Skills Progress » est choisi parmi les cinq premiers projets aux Doctoriales 2016, cité de l'innovation de Fès, les 18, 19 et 20 mai 2016.

Annexe D : Diagramme de cas d'utilisation

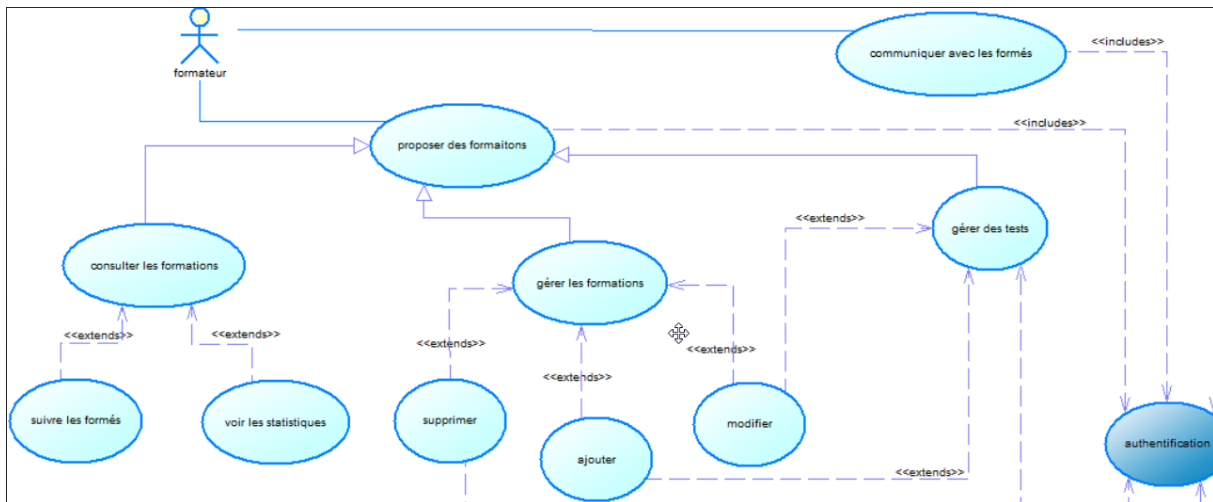


Figure 80: Cas d'utilisation du formateur

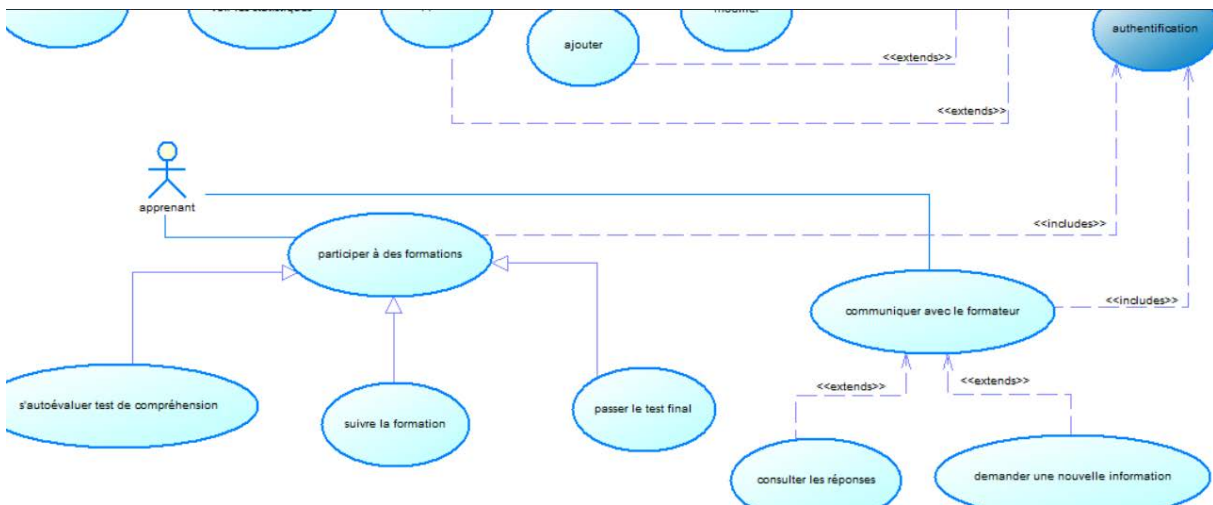


Figure 81: Cas d'utilisation de l'apprenant

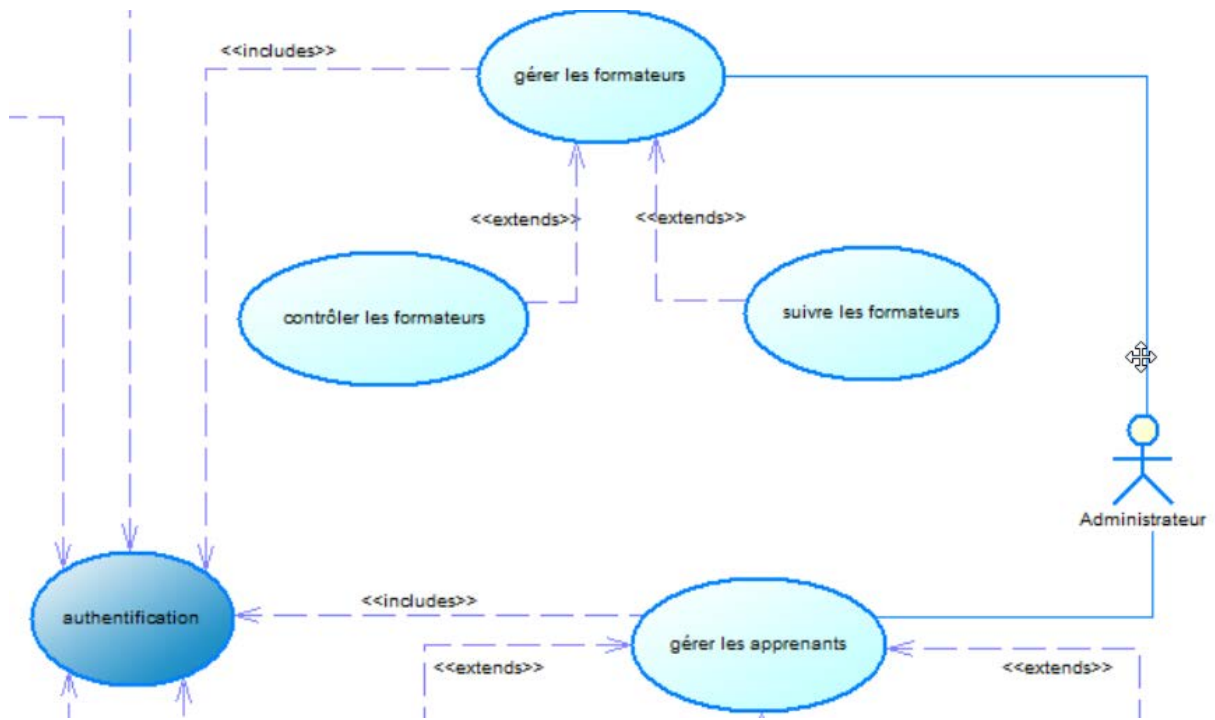


Figure 82: Cas d'utilisation pour l'administrateur

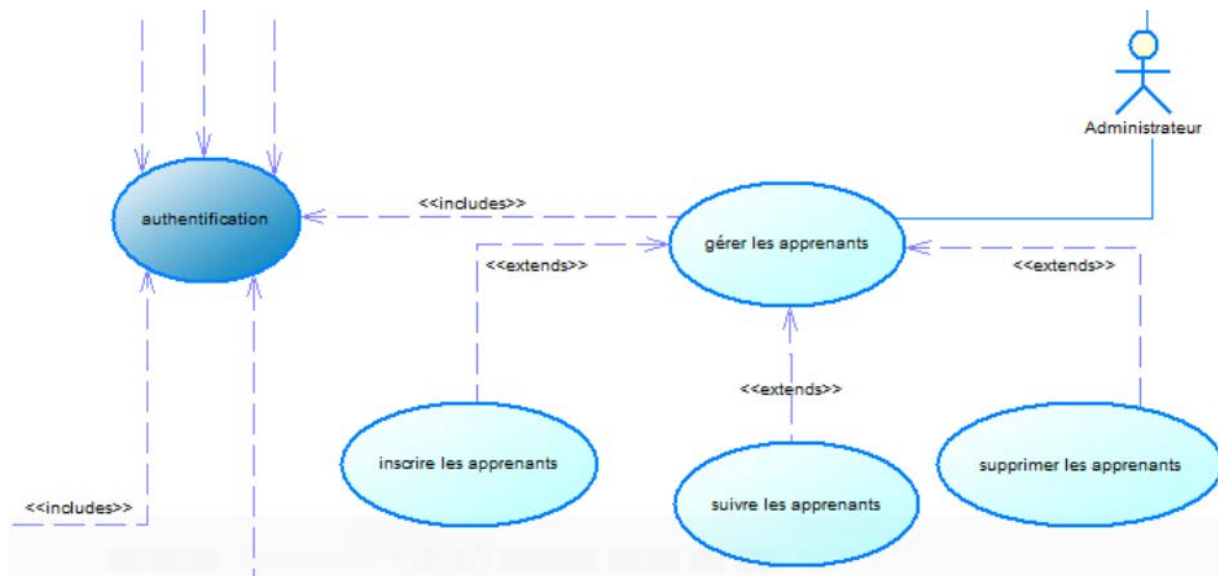


Figure 83: Cas d'utilisation pour l'administrateur suite

Références

- [1] S. F. William, Webster, et Leila M, « How small enterprises in Ghana have responded to adjustment », *World Bank Econ. Rev.*, vol. 6, n° 3, p. 423-438, sept. 1992.
- [2] N. DINE-DINE et M. A. MAACHE, « Financement externe des PME-PMI marocaines », *Doss. Rech. En Econ. Gest.*, vol. 2, n° 4, p. 139-159, sept. 2015.
- [3] Direction de la politique économique générale, « Les PME au Maroc: éclairage et propositions ». Ministère de l'Economie et de Finance, mars-2000.
- [4] Direction des Études et des Prévisions Financières, « Etude comparative de la Petite et Moyenne Industrie et de la Grande Industrie au Maroc », Ministère de finance et de privatisation, mars 2007.
- [5] OQLF -Office Québécois de la Langue Française-, « technologies de l'information et de la communication ». [En ligne]. Disponible sur: http://www.granddictionnaire.com/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8349341. [Consulté le: 08-janv-2014].
- [6] M. Doucet, « Développement durable dans les petites et moyennes entreprises au Québec : outil de diagnostic de facteurs d'influence et des pratiques mises en œuvre », Thèse, Université de Sherbrooke, 2012.
- [7] Bureau de normalisation du Québec (BNQ), « Le développement durable au profit de la performance : les bénéfices d'une démarche de développement durable pour les entreprises québécoises », 2017.
- [8] I. Sieben, A. De Grip, J. Longen, et O. Sørensen, « Technology, Selection, and Training in Call Centers », *Ind. Labor Relat. Rev.*, vol. 62, n° 4, p. 553-572, 2009.
- [9] F. Chiron, « Contribution à la flexibilité et à la rapidité de conception des systèmes automatisés avec l'utilisation d'UML », Thèse, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand I, 2008.
- [10] B. Rohée, « Contribution à la conception d'applications de pilotage des systèmes manufacturiers », Thèse, Université de Reims - Champagne Ardenne, 2008.
- [11] Simon, Frédéric, « Les conséquences économiques et sociales de l'automatisation », *Rev. Économique Soc. Bull. Société Etudes Econ. Soc.*, vol. 14, 1956.
- [12] H. Derbel, « Diagnostic à base de modèles des systèmes temporisés et d'une sous-classe de systèmes dynamiques hybrides », Thèse, Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2009.
- [13] N. Dangoumau, « CONTRIBUTION À LA GESTION DES MODES DES SYSTÈMES AUTOMATISÉS DE PRODUCTION », Thèse, 2000.
- [14] O. Fournier, « Conception de la commande d'un système automatisé de production : apport des graphes et de l'ordonnancement cyclique », Thèse, Université de la Réunion, 2002.
- [15] R. J. Bibbero, « Automation? A survey », *Electr. Eng.*, vol. 74, n° 9, p. 775-780, sept. 1955.
- [16] C. Ligeret, « Réduction de la Consommation Electrique du Contrôle-Commande des Machines Automatisées », Thèse, Université Rennes 1, 2010.
- [17] J. Clarhaut, « Prise en compte des séquences de défaillances pour la conception de systèmes d'automatisation Application au ferroutage », Thèse, Université des Sciences et des Technologies de Lille (USTL), 2009.
- [18] N. Balfe, S. Sharples, et J. R. Wilson, « Impact of automation: Measurement of performance, workload and behaviour in a complex control environment », *Appl. Ergon.*, vol. 47, p. 52-64, mars 2015.
- [19] M. BAKKARI, A. RACHIDI, et A. KHATORY, « Evolution of automated production systems in SMEs: what are the consequences for the employees? », in *Xème Conférence Internationale: Conception et Production Intégrées*, Tanger, Morocco, 2015.
- [20] M. Staroswiecki et M. Bayart, *Actionneurs intelligents*. Paris : Hermès, 1994.
- [21] C. Verlinde, « Contribution à l'étude des architectures de systèmes automatisés », Thèse, Institut Polytechnique de Lorraine, INPL. Université de Nancy I, 1989.

- [22] M. Bayart, « Instrumentation intelligente – Systèmes automatisés de production à Intelligence distribuée », Thèse, Université des sciences et technologies de Lille, 1994.
- [23] L. Cauffriez, « Méthodes et modèles pour l'évaluation de la sûreté de fonctionnement de systèmes automatisés complexes : Application à l'exploitation de lignes de production - Application à la conception de systèmes intelligents distribués », thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2005.
- [24] G. Friedmann, « L'Automation. Quelques aspects et effets psycho-sociologiques », *Ann. Hist. Sci. Soc.*, vol. 13, n° 4, p. 625-638, 1958.
- [25] D. Buhr, *Social innovation policy for Industry 4.0*. Friedrich-Ebert-Stiftung, Division for Social and Economic Policies, 2015.
- [26] J. Frohm, V. Lindström, M. Winroth, et J. Stahre, « Levels of Automation in Manufacturing », *Ergonomia*, 2008.
- [27] M. Vagia, A. A. Transeth, et S. A. Fjerdings, « A literature review on the levels of automation during the years. What are the different taxonomies that have been proposed? », *Appl. Ergon.*, vol. 53, Part A, p. 190-202, mars 2016.
- [28] B. Sjøbakk, M. K. Thomassen, et E. Alfnes, « Implications of automation in engineer-to-order production: a case study », *Adv. Manuf.*, vol. 2, n° 2, p. 141-149, juin 2014.
- [29] M. R. Endsley et E. O. Kiris, « The Out-of-the-Loop Performance Problem and Level of Control in Automation », *Hum. Factors*, vol. 37, n° 2, p. 381-394, juin 1995.
- [30] M. R. Endsley et D. B. Kaber, « Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task », *Ergonomics*, vol. 42, n° 3, p. 462-492, mars 1999.
- [31] T. B. Sheridan, « Adaptive Automation, Level of Automation, Allocation Authority, Supervisory Control, and Adaptive Control: Distinctions and Modes of Adaptation », *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. - Part Syst. Hum.*, vol. 41, n° 4, p. 662-667, juill. 2011.
- [32] R. Parasuraman, T. B. Sheridan, et C. D. Wickens, « A model for types and levels of human interaction with automation », *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. - Part Syst. Hum.*, vol. 30, n° 3, p. 286-297, mai 2000.
- [33] J. Frohm, V. Lindström, M. Winroth, et J. Stahre, « THE INDUSTRY'S VIEW ON AUTOMATION IN MANUFACTURING », *IFAC Proc. Vol.*, vol. 39, n° 4, p. 453-458, 2006.
- [34] D. B. Kaber et M. R. Endsley, « The effects of level of automation and adaptive automation on human performance, situation awareness and workload in a dynamic control task », *Theor. Issues Ergon. Sci.*, vol. 5, n° 2, p. 113-153, mars 2004.
- [35] J. J. Marquez et M. Ramirez, « Level of automation and failure frequency effects on simulated lunar lander performance », in *2014 IEEE Aerospace Conference*, 2014, p. 1-10.
- [36] M. R. Endsley, « Level of Automation: Integrating Humans and Automated Systems », *Proc. Hum. Factors Ergon. Soc. Annu. Meet.*, vol. 41, n° 1, p. 200-204, oct. 1997.
- [37] K. T. Erickson, « Programmable logic controllers », *IEEE Potentials*, vol. 15, n° 1, p. 14-17, févr. 1996.
- [38] R. Bayindir et Y. Cetinceviz, « A water pumping control system with a programmable logic controller (PLC) and industrial wireless modules for industrial plants—An experimental setup », *ISA Trans.*, vol. 50, n° 2, p. 321-328, avr. 2011.
- [39] A. S.B, « Industrial Automation in Ghanaian Industries (The Case of Kumasi Metropolis) », *J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 1, n° 4, p. 383-393, 2006.
- [40] R. Parthasarthy et S. P. Sethi, « The Impact of Flexible Automation on Business Strategy and Organizational Structure », *Acad. Manage. Rev.*, vol. 17, n° 1, p. 86-111, janv. 1992.
- [41] C. W. De Silva, « Automation intelligence », *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 7, n° 5, p. 471-477, oct. 1994.
- [42] M. P. Groover, *Automation, Production Systems, and Computer-integrated Manufacturing*. Prentice Hall, 2001.

- [43] F. Jovane, Y. Koren, et C. R. Boër, « Present and Future of Flexible Automation: Towards New Paradigms », *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 52, n° 2, p. 543-560, janv. 2003.
- [44] H. E. Haouzi, « Approche méthodologique pour l'intégration des systèmes contrôlés par le produit dans un environnement de juste-à-temps : Application à l'entreprise TRANE », phdthesis, Université Henri Poincaré - Nancy I, 2008.
- [45] K. Sharma, « 2 - Automation System Structure », in *Overview of Industrial Process Automation*, London: Elsevier, 2011, p. 15-23.
- [46] Y. Chinniah et M. Champoux, « La sécurité des machines automatisées Analyse des risques et des moyens de protection sur une presse à injection de plastique », Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST), R-557, avr. 2008.
- [47] M. Fabian et A. Hellgren, « PLC-based implementation of supervisory control for discrete event systems », in *Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control*, 1998, vol. 3, p. 3305-3310 vol.3.
- [48] V. Sadegh et V. Amir, « PLC and its Applications », *Int. J. Multidiscip. Sci. Eng.*, vol. VOL. 2, n° NO. 8, nov. 2011.
- [49] S. Cabaret, « Algorithmes de Contrôles Avancés pour les Installations à Gaz du LHC au CERN suivant le Framework et l'approche dirigée par les modèles du projet GCS », Thèse, Université de Picardie Jules Vernes, 2008.
- [50] M. Adamski, « RECONFIGURABLE LOGIC CONTROLLER FOR EMBEDDED APPLICATIONS », *IFAC Proc. Vol.*, vol. 39, n° 17, p. 147-152, janv. 2006.
- [51] D. Du, Y. Liu, X. Guo, K. Yamazaki, et M. Fujishima, « Study on LD-VHDL conversion for FPGA-based PLC implementation », *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 40, n° 11-12, p. 1181-1190, févr. 2009.
- [52] M. K. Allouche, « Une société d'agents temporels pour la supervision de systèmes industriels », phdthesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 1998.
- [53] D. Andreu, J.-C. Pascal, et R. Valette, « Supervision des systèmes de production discontinus », *J. Eur. Systèmes Autom. APII-JESA*, p. 365-386, 1998.
- [54] T. Bangemann *et al.*, « State of the Art in Industrial Automation », in *Industrial Cloud-Based Cyber-Physical Systems*, Éd. Springer International Publishing, 2014, p. 23-47.
- [55] N. Jerbi, « Apports et intégration de la robustesse pour la supervision de systèmes manufacturiers », Thèse, Université Lille1 - Sciences et Technologies, 2006.
- [56] W. H. F. Aly, M Haytham Aboulabbas, M. H. Aly, et Hossam Eldin Moustafa, « Scalable ZigBee-Based Smart Authentication and Access Control System Design Using XMOs Programmable Chips », *Int. J. Sci. Eng. Res.*, vol. 2, n° 9, p. 9, sept. 2011.
- [57] A. V. D. Bossche, T. Val, et E. Campo, « Métrologie pour l'analyse comparative des performances temporelles des liens Bluetooth », juin-2008.
- [58] T. Khoutaif et F. Peyrard, « Performances evaluation of the asynchronous bluetooth links in a real time environment », in *Personal Wireless Communications*, Colmar, France, 25 – 27, 2005, p. 235-243.
- [59] A. BOUDJAADAR, « Plateforme Basée Agents Pour l'Aide à la Conception et la Simulation des Réseaux de Capteurs Sans Fil », Mémoire, Université 20 août 1955 Skikda, 2010.
- [60] Committee IEEE Computer Society LAN MAN Standards, « Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs)-Part 15.1 », *IEEE Stand. 80211-1997*, 1997.
- [61] A. V. D. Bossche, « Proposition d'une nouvelle méthode d'accès déterministe pour un réseau personnel sans fil à fortes contraintes temporelles », Thèse, Université Toulouse le Mirail - Toulouse II, 2007.
- [62] K. L. S. Sharma, « 20 - Information Technology-Operation Technology Convergence », in *Overview of Industrial Process Automation (Second edition)*, Elsevier, 2017, p. 359-375.

- [63] M. K. Adeyeri, K. Mpfu, et T. A. Olukorede, « Integration of agent technology into manufacturing enterprise: A review and platform for industry 4.0 », in *2015 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM)*, 2015, p. 1-10.
- [64] J. Lee, B. Bagheri, et H.-A. Kao, « Recent advances and trends of cyber-physical systems and big data analytics in industrial informatics », in *International Proceeding of Int Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2014, p. 1–6.
- [65] Y. Lu, « Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues », *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 6, p. 1-10, juin 2017.
- [66] E. A. Lee, « Cyber Physical Systems: Design Challenges », in *2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*, 2008, p. 363-369.
- [67] K. Zhou, T. Liu, et L. Zhou, « Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges », in *2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*, 2015, p. 2147-2152.
- [68] M. Brettel, N. Friederichsen, M. Keller, et M. Rosenberg, « How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An industry 4.0 perspective », *Int. J. Mech. Ind. Sci. Eng.*, vol. 8, n° 1, p. 37–44, 2014.
- [69] R. Drath et A. Horch, « Industrie 4.0: Hit or hype? [industry forum] », *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 8, n° 2, p. 56–58, 2014.
- [70] A. A. F. Saldivar, Y. Li, W. n Chen, Z. h Zhan, J. Zhang, et L. Y. Chen, « Industry 4.0 with cyber-physical integration: A design and manufacture perspective », in *21st International Conference on Automation and Computing (ICAC)*, 2015, p. 1-6.
- [71] O. Cardin, « Contribution à la conception, l'évaluation et l'implémentation de systèmes de production cyber-physiques », Thèse, 2016.
- [72] L. Kromann, N. Malchow-Møller, J. R. Skaksen, et A. Sorensen, « Automation and Productivity – A Cross-Country, Cross-Industry Comparison », Social Science Research Network, Rochester, NY, SSRN Scholarly Paper ID 3096432, mars 2016.
- [73] The Knowledge Transfer Network, « RAS 2020 Robotics and Autonomous Systems », juill. 2014.
- [74] Ministère de l'Economie des Finances et de l'Industrie, « L'automatisation et l'informatisation dans l'industrie ». Le 4 pages des statistiques industrielles, juill-1997.
- [75] « Direction Générale des Entreprises (DGE) ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.entreprises.gouv.fr/>. [Consulté le : 10-août-2015].
- [76] G. Plassat, « Quelle société en 2030 : un exercice de prospective à l'allemande », *Transports du futur*, 25-nov-2014.
- [77] PricewaterhouseCoopers, « Economie mondiale en 2050 : 6 des sept premières puissances mondiales seront des économies émergentes », *PwC*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.pwc.fr/fr/espace-presse/communiqués-de-presse/2017/fevrier/economie-mondiale-en-2050.html>. [Consulté le : 10-août-2015].
- [78] A. Thibaut, « Chine : 5 objectifs pour 2030 », *Contrepoints.org*, 2015.
- [79] J. BONNET, « La Chine veut disposer de son propre lanceur spatial », *usinenouvelle.com*, déc. 2014.
- [80] Centre de recherche PWC, « Future of India: The Winning LEAP », New Delhi, nov. 2014.
- [81] KPMG International, « Future State 2030: The global megatrends shaping governments », 2014.
- [82] Centre de recherche PWC, « The road ahead Gaining momentum from energy transformation », 2015.
- [83] K. Rapoza, « Can Mexico Overtake Brazil By 2022? », *Forbes*. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.forbes.com/sites/kenrapoza/2012/08/11/can-mexico-overtake-brazil-by-2022/>. [Consulté le : 10-août-2017].
- [84] National Intelligence Council, « GLOBAL TRENDS 2030: ALTERNATIVE WORLDS », déc. 2012.

- [85] National Planning Commission, « National Development Plan 2030 : Our future make it work », mars 2012.
- [86] S. Khan, « The most-promising emerging and frontier markets, ranked », *BizNews.com*, 13-févr-2015.
- [87] P.-O. ROUAUD, « Maroc : dans le cadre d'un nouveau "Plan d'accélération industrielle" », *usinenouvelle.com*, 02-avr-2014.
- [88] Ministère de l'Industrie, du Commerce, de l'Investissement et de l'Economie Numérique, « Plan d'Accélération Industrielle : le textile s'enrichit de 3 nouveaux écosystèmes », <http://www.mcinet.gov.ma>.
- [89] Ministère de l'Industrie, du Commerce, de l'Investissement et de l'Economie Numérique, « Investir au Maroc - Industrie », *mcinet.gov.ma*. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.invest.gov.ma/?Id=23&lang=fr&RefCat=1&Ref=144>. [Consulté le : 30-avr-2018].
- [90] J.-C. Combessie, « La méthode en sociologie », *Repères*, vol. 5e éd., p. 33-44, janv. 2011.
- [91] J.-C. Combessie, « III. Le questionnaire », vol. 5e éd., Paris : La Découverte, 2007, p. 33-44.
- [92] R. Salman, « L'Impact des programmes de formation continue sur les compétences professionnelles des enseignants dans le contexte éducatif syrien (cas de l'enseignement de base : de la première à la sixième classe) », phdthesis, Université de Bourgogne, 2014.
- [93] Le Sphinx Développement, « Manuel Sphinx plus2 V5 ». 25-janv-2006.
- [94] M. Liouaeddine, « the Dynamics of Job Training in the Moroccan SME », University Library of Munich, Germany, 2009.
- [95] Centre régional d'investissement, « Bilan d'activité du CRI-RSZZ ». 2014.
- [96] L. Gerville-Réache et V. Couallier, « ÉCHANTILLON REPRÉSENTATIF (D'UNE POPULATION FINIE) : DÉFINITION STATISTIQUE ET PROPRIÉTÉS ». 29-déc-2011.
- [97] S. A. Hart, M. Gamache, et M. Lejeune, « La formalisation des pratiques de formation dans les PME manufacturières québécoises », janv. 2005.
- [98] OPTIGEDE, « M2-Modes d'administration d'un questionnaire ». Sept-2012.
- [99] G. Suci, A. Pasat, R. Coanca, et S. Secu, « The adoption of photovoltaic solutions for increasing energy efficiency within SMEs », in *14th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)*, 2017, p. 236-239.
- [100] S. Nazir, L. J. Sorensen, K. I. Øvergård, et D. Manca, « Impact of training methods on Distributed Situation Awareness of industrial operators », *Saf. Sci.*, vol. 73, p. 136-145, mars 2015.
- [101] E. Salas et J. A. Cannon-Bowers, « The science of training: a decade of progress », *Annu. Rev. Psychol.*, vol. 52, p. 471-499, 2001.
- [102] M. Bakkari et A. Khatory, « Agents of Automated Systems and Training: What Impacts in SMEs? », *Res. J. Appl. Sci.*, vol. 13, n° 5, p. 313-321, 2018.
- [103] S. Slaoui, « La culture d'entreprise : un levier de la compétitivité de l'entreprise marocaine », Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Faculté des Sciences juridiques, économiques et sociales, Fès, 2006.
- [104] M. Oschinski et R. Wyonch, « Le choc du futur ? Les répercussions de l'automatisation sur le marché du travail au Canada », Institut C.D. HOWE Institute, 472, mars 2017.
- [105] S. Nazir, A. Kluge, et D. Manca, « Automation in Process Industry: Cure or Curse? How can Training Improve Operator's Performance », in *Computer Aided Chemical Engineering*, vol. 33, Elsevier, 2014, p. 889-894.
- [106] J. Frayssinhes, « LE ROLE DE L'EXPERIENCE ET LA FORMATION DES ADULTES », *Implic. Philos.*, p. 9, mai 2015.
- [107] C. LETOR, « L'évaluation des compétences depuis la diversité des définitions et des procédures d'évaluation a leur standardisation : quelques pistes de réflexions sur la mise en place d'une évaluation centralisée et ses implications », présenté à 3ème congrès des chercheurs en éducation, 2012, p. 7.

- [108] E. Bonjour et M. Dulmet., « Articulation Entre Pilotage des Systèmes de Compétences et Gestion des Connaissances », présenté à 1er Colloque de Gestion des Compétences et des Connaissances en Génie Industriel, Nantes, 2002, p. 43-50.
- [109] MEDEF - Mouvement des Entreprises de France, C. Flück, FONDS SOCIAL EUROPEEN Bruxelles, P. Méhaut, et P. Leclerc, *Des pratiques européennes innovantes. Objectifs compétences. Tome 1 : L'influence des contextes nationaux sur le management par les compétences*. Paris: MEDEF, 2002.
- [110] N. Sefiani, A. Boumane, J. P. Campagne, et D. Bouami, « Démarche d'identification des compétences requises basée sur une approche fonctionnelle », in *9ème congrès international de Génie Industriel, CIGI'2011*, Saint Sauveur, Canada, 2011, p. 8p.
- [111] C. Brailovsky, F. Miller, et P. Grand'Maison, « L'évaluation de la compétence dans le contexte professionnel », *Serv. Soc.*, vol. 47, n° 1-2, p. 171-189, 1998.
- [112] S. Loufrani-Fedida, « Management des compétences et organisation par projets : une mise en valeur de leur articulation. Analyse qualitative de quatre cas multi-sectoriels », phdthesis, Université Nice Sophia Antipolis, 2006.
- [113] B. DAKKAK, A. RACHIDI, et A. Talbi, « Les compétences humaines : Facteurs clés pour la réussite du Système de Management Intégré QSE », in *Xème Conférence Internationale : Conception et Production Intégrées*, Tanger, Morocco, 2015.
- [114] E. Oiry, « Qualification et compétence : deux sœurs jumelles ? », *Rev. Fr. Gest.*, vol. 31, n° 158, p. 13-34, sept. 2005.
- [115] M. Abdulwahed, W. Balid, M. O. Hasna, et S. Pokharel, « Skills of engineers in knowledge-based economies: A comprehensive literature review, and model development », in *Proceedings of IEEE International Conference on Teaching, Assessment and Learning for Engineering (TALE)*, 2013, p. 759-765.
- [116] Laker Dennis R. et Powell Jimmy L., « The differences between hard and soft skills and their relative impact on training transfer », *Hum. Resour. Dev. Q.*, vol. 22, n° 1, p. 111-122, mars 2011.
- [117] B. DAKKAK, « Contribution à l'amélioration de la performance industrielle par le déploiement des systèmes de management intégrés », Thèse, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Ecole Supérieure de Technologie, 2013.
- [118] M. M. Robles, « Executive Perceptions of the Top 10 Soft Skills Needed in Today's Workplace », *Bus. Commun. Q.*, vol. 75, n° 4, p. 453-465, déc. 2012.
- [119] F. Mauléon, J. Hoarau, et J. Bouret, *Le Réflexe Soft Skills: Les compétences des leaders de demain*. 2014.
- [120] A. Zhang, « Peer Assessment of Soft Skills and Hard Skills », *J. Inf. Technol. Educ. Res.*, vol. 11, p. 155-168, 2012.
- [121] C. Batal, CNPF, et B. Masingue, *Acquérir et développer ses compétences professionnelles : journées internationales de la formation 1998, objectif compétences ; T. 5*. Paris : CNPF, 1998.
- [122] B. D. Denman, « Comment définir l'université du XXIe siècle ? », *Polit. Gest. Enseign. Supér.*, vol. no 17, n° 2, p. 9-28, 2005.
- [123] M. BAKKARI et A. KHATORY, « Contribution de la qualité de l'enseignement supérieur et de la formation professionnelle continue au développement des entreprises marocaines », présenté à Conférence G3 « La qualité dans tous ses états », Bruxelles, BELGIQUE, 2014.
- [124] Secrétariat d'Etat Chargé de l'Enseignement Supérieur, « MAROC UNIVERSITAIRE 2015-2016 ». 01-nov-2017.
- [125] T. Bidet-Mayer et L. Toubal, « Formation professionnelle et industrie : le regard des acteurs de terrain », La Fabrique de l'industrie, oct. 2014.
- [126] F. MESSAOUDI, « DISPOSITIFS DE E-LEARNING : QUELS USAGES POUR AMELIORER LA FORMATION AU MAROC ? Du premier baromètre national du e-Learning à l'étude de cas de la formation continue. », Université Hassan II Mohammedia de Casablanca, 2013.
- [127] N. MacLennan, *Coaching and Mentoring*. Taylor & Francis, 2017.

- [128] S. Fletcher et C. A. Mullen, *SAGE Handbook of Mentoring and Coaching in Education*. SAGE Publishing, 2012.
- [129] M. J. Tews et R. A. Noe, « Does training have to be fun? A review and conceptual model of the role of fun in workplace training », *Hum. Resour. Manag. Rev.*, nov. 2017.
- [130] C. B. T. While, « Instructor-led or computer-based: which will work best for you? », *Train. Dev. J.*, 1988.
- [131] W. de Vries, N. M. Turner, K. G. Monsieurs, J. J. L. M. Bierens, et R. W. Koster, « Comparison of instructor-led automated external defibrillation training and three alternative DVD-based training methods », *Resuscitation*, vol. 81, n° 8, p. 1004-1009, août 2010.
- [132] D. H. Belányi, « U.S Steel Kosice- Employees' training and development », in *2011 9th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA)*, 2011, p. 21-24.
- [133] P. D. H. Nguyen et V. T. Phan, « THE ROLE OF E-LEARNING IN SUSTAINABLE BUSINESS: A CASE STUDY IN VIETNAMESE SMEs », *Perspectives (Montclair)*, vol. 2, n° 2, p. 99-105.
- [134] M. Marie-Sainte, « Les enjeux économiques et territoriaux du e-learning dans l'enseignement supérieur entre logique de marché et politique éducative », phdthesis, Université Toulouse le Mirail - Toulouse II, 2014.
- [135] A. I. Mahmood, S. A. M. Yusof, et M. I. Jambak, « The impact of online social games on E-learning usage among female students », in *1st International Conference on Game, Game Art, and Gamification (ICGGAG)*, 2016, p. 1-5.
- [136] D. B. Setyohadi, M. Aristian, B. L. Sinaga, et N. A. A. Hamid, « Social Critical Factors Affecting Intentions and Behaviours to Use E-Learning: An Empirical Investigation Using Technology Acceptance Model », *Asian J. Sci. Res.*, vol. 10, n° 4, p. 271-280, sept. 2017.
- [137] R. E. Clark, « Evaluer l'enseignement à distance. Stratégies et avertissements », *Distances Savoirs*, vol. 7, n° 1, p. 93-112, mars 2009.
- [138] M. Montebello, « e-Learning so Far », in *AI Injected e-Learning*, Springer, Cham, 2018, p. 5-14.
- [139] A. B. Youssef et A. Rallet, « Présentation », *Réseaux*, n° 155, p. 9-20, juin 2009.
- [140] M. F. Lamago, « Réingénierie des fonctions des plateformes LMS par l'analyse et la modélisation des activités d'apprentissage : application à des contextes éducatifs avec fracture numérique », phdthesis, Université de Bordeaux, 2017.
- [141] FAO, Éd., « Gérer et évaluer les activités d'apprentissage », in *Méthodologies pour le développement de cours e-learning - Un guide pour concevoir et élaborer des cours d'apprentissage numérique*, Rome, 2012.
- [142] P. A. Khodke, M. G. Tingane, A. P. Bhagat, S. P. Chaudhari, et M. S. Ali, « Neuro Fuzzy intelligent e-Learning systems », in *Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET)*, 2016, p. 1-7.
- [143] M. Ramachandran, « Best Practice Guidelines for Technology Enhanced E-Learning », in *9th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE)*, 2016, p. 191-196.
- [144] J. B. Strother, « An Assessment of the Effectiveness of e-learning in Corporate Training Programs », *Int. Rev. Res. Open Distrib. Learn.*, vol. 3, n° 1, avr. 2002.
- [145] V. Chang, « Review and discussion: E-learning for academia and industry », *Int. J. Inf. Manag.*, vol. 36, n° 3, p. 476-485, juin 2016.
- [146] M. Jović, M. K. Stankovic, et E. Neskovic, « Factors Affecting Students' Attitudes towards E-Learning », *Manag. Sustain. Bus. Manag. Solut. Emerg. Econ.*, vol. 22, n° 2, p. 73-80, sept. 2017.
- [147] M. Montebello, « MOOCs, Crowdsourcing and Social Networks », in *AI Injected e-Learning*, Springer, Cham, 2018, p. 15-25.
- [148] Haute Autorité de santé HAS, « E-learning : Guide de conception de formation ouverte et à distance (FOAD) dans le monde de la santé », avr. 2015.
- [149] M. Montebello, « AI Injected e-Learning - The Future of Online Education », in *Customised e-Learning – A Proposed Model*, Springer.

- [150] AFNOR, « Norme AFNOR X50-750 Terminologie de la formation professionnelle ». Août-2015.
- [151] M. D. Merrill, L. Drake, M. J. Lacy, J. Pratt, et I. R. Group, « Reclaiming instructional design », *Educ. Technol.*, p. 5–7, 1996.
- [152] K. L. Gustafson et R. M. Branch, *Survey of Instructional Development Models. Fourth Edition*. ERIC Clearinghouse on Information & Technology, Syracuse University, Syracuse, 2002.
- [153] D. R. Hidayanto, Munir, E. F. Rahman, et J. Kusnendar, « The application of ADDIE model in developing adventure game-based multimedia learning to improve students' understanding of basic programming », in *3rd International Conference on Science in Information Technology (ICSITech)*, 2017, p. 307-312.
- [154] J. Basque, « Introduction à l'ingénierie pédagogique (4e éd.) ». Ingénierie pédagogique et technologies éducatives, Montréal, Canada : Université TÉLUQ, 2017.
- [155] A. LaMotte, « SAM : une approche de conception e-learning plus agile », *Les essentiels du e-learning*, 23-févr-2017. [En ligne]. Disponible sur: <http://blogs.articulate.com/les-essentiels-du-elearning/sam-une-approche-de-conception-e-learning-plus-agile-que-le-modele-addie/>. [Consulté le : 12-mars-2018].
- [156] A. Amirat et M. Oussalah, « Towards an UML Profile for the Description of Software Architecture », in *International Conference on Applied Informatics (ICAI'09)*, Bou Arréridj, Algeria, 2009, p. 226-232.
- [157] F. Boudokhane, « Comprendre le non-usage technique : réflexions théoriques », *Enjeux Inf. Commun.*, vol. me 2006, n° 1, p. 13-22, 2006.
- [158] F. Février, « Vers un modèle intégrateur " expérience-acceptation " : rôle des affects et de caractéristiques personnelles et contextuelles dans la détermination des intentions d'usage d'un environnement numérique de travail », phdthesis, Université Rennes 2 ; Université Européenne de Bretagne, 2011.
- [159] M.-E. Bobillier-Chaumon, « Conditions d'usage et facteurs d'acceptation des technologies de l'activité : Questions et perspectives pour la psychologie du travail », thesis, Ecole doctorale Sciences de l'Homme, du Politique, et du Territoire, 2013.
- [160] N. Huu Binh, « Fiabilité et validité du Modèle d'acceptation de la technologie (TAM) dans le contexte d'apprenants vietnamiens du français comme langue étrangère face aux TIC », *Rev. Int. Technol. En Pédagogie Univ. Int. J. Technol. High. Educ.*, vol. 11, n° 3, p. 38-50, 2014.
- [161] Committee IEEE Computer Society LAN MAN Standards, « Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks-Part 15.4 », *IEEE Stand. 80211-1997*, 1997.
- [162] S. C. Ergen, « ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary », *UC Berkeley Sept.*, vol. 10, p. 17, 2004.
- [163] S. VADYM, « BLUETOOTH LOW ENERGY COMPARED TO ZIGBEE AND BLUETOOTH CLASSIC », Mikkeli University of Applied Sciences, 2010.
- [164] G. Chalhoub, « MaCARI: une méthode d'accès déterministe et économe en énergie pour les réseaux de capteurs sans fil », PhD Thesis, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 2009.