

1. Contexte scientifique : évolution de l'automatisation

Malgré les efforts fournis par Taylor et Ford, la majorité des observateurs s'accordent pour reconnaître que leur organisation n'est plus viable dans l'industrie [6], et en particulier dans l'industrie automobile [7], [8]. Ainsi, les entreprises ont commencé à instaurer de nouvelles méthodes d'organisation afin de remédier aux problèmes techniques que posent la production industrielle actuelle.

Plusieurs définitions du terme automatisation sont présentées dans la littérature. En 1997, Parasuraman et Riley [9] l'ont défini comme étant l'exécution, par une machine (généralement un ordinateur), d'une fonction précédemment faite par un humain.

En 2005, Claverie [10] fait une différenciation entre automatisation et automation. Il définit l'automatisation comme étant la démarche qui permet de rendre automatique un processus, ou l'état qui résulte du fait de l'automatiser. Par contre, il présente l'automation comme étant l'ensemble des processus automatiques substituant à l'Homme des automates, c'est à dire des systèmes matériels réalisant un comportement automatique. Ainsi d'après Claverie, l'automatisation des processus a changé les conditions de travail et le rôle de l'Homme dans l'industrie. Ce dernier est devenu, au lieu d'un acteur, un concepteur, un agent de maintenance ou un superviseur. Pour cela, deux voies ont été appréhendées. La première, avec une forte dominance en informatique, correspond à l'automatisation des postes de travail et au développement du domaine de l'interface entre l'Homme et la machine. La deuxième est établie en se basant sur le maintien de l'organisation traditionnelle des chaînes de montage, en substituant à l'Homme des automates particuliers qui imitent le mouvement.

La Figure 2 décrit l'évolution de l'industrie et les changements qu'elle a connus. La première révolution a apporté des changements majeurs dans l'industrie en utilisant la vapeur comme source d'énergie. La deuxième révolution industrielle a utilisé l'énergie électrique et la chaîne de montage pour la production de masse. L'intégration de l'électronique, de la technologie et des ordinateurs dans la fabrication a été vue dans la troisième révolution industrielle. Aujourd'hui, c'est la quatrième révolution industrielle qui prend place, et qui conduit au prochain niveau de fabrication où les machines vont se redéfinir dans la manière dont elles communiquent et effectuent des fonctions individuelles. Il s'agit du Smart Manufacturing et de l'internet des objets.

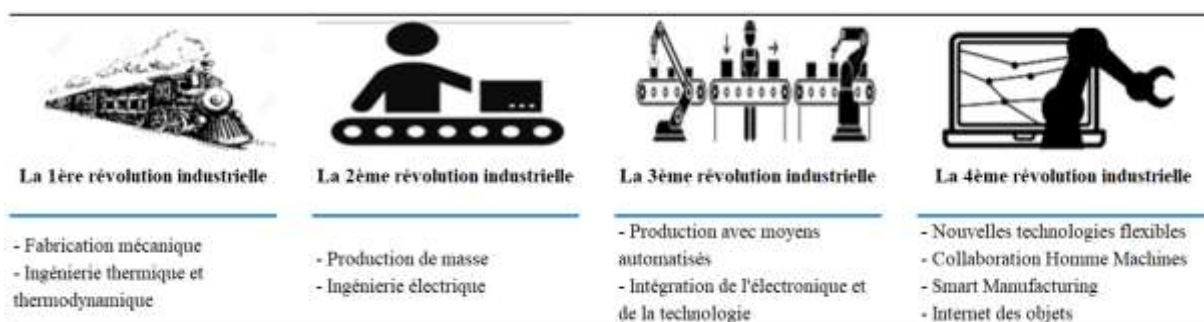


Figure 2 : Evolution de l'industrie (Adaptée des travaux de [11])

Ainsi avec l'automatisation, un nouveau terme a vu le jour : **Industrie 4.0**. Cette notion a été inventée par Henning Kagermann [11], [12] qui fusionne le monde virtuel et le monde réel en mettant l'accent sur des applications techniques telles que la robotique, la cobotique, la numérisation et l'automatisation. Dans l'industrie 4.0, la fabrication et les services sont caractérisés par des processus d'automatisation et de numérisation hautement développés. En effet, elle modifie considérablement les produits et les systèmes de production concernant la conception, les processus, les opérations et les

services [12]. Cependant, l'industrie 4.0 ne concerne pas uniquement l'industrie, il s'agit d'une transformation globale utilisant l'intégration numérique et l'ingénierie intelligente [11].

Du point de vue de la production et de la gestion des services, l'industrie 4.0 se concentre sur la mise en place de systèmes intelligents et communicatifs tels que l'interaction machine-machine et l'interaction Homme-machine [13]. Ainsi, l'industrie 4.0 favorise l'autonomie, l'agilité, la flexibilité, la prise de décision, l'efficacité et la réduction des coûts [14]. Néanmoins, l'automatisation peut engendrer plusieurs changements tant sur l'Homme que sur les systèmes de production.

L'automatisation modifie le rapport des Hommes au processus de production et les différentes installations utilisées [15]. En 2009, Lee et Seppelt [16] ont présenté une nouvelle vision des concepteurs vis-à-vis de l'automatisation. Ils la considèrent comme un moyen d'accroître l'efficacité et la sécurité du système tout en réduisant la participation de l'Homme. Toutefois, pour que l'automatisation tienne ses promesses, les concepteurs doivent éviter l'approche centrée sur la technologie et adopter une approche prenant en compte l'Homme et l'automatisation.

Cette thèse se positionne dans un contexte d'automatisation des lignes de montage en proposant une méthode d'aide à la décision qui analyse plusieurs données d'entrée (produits, environnement/usine, gammes de montage ...) et qui prend en compte plusieurs critères d'évaluation (coût, ergonomie, flexibilité ...) afin de proposer le meilleur scénario d'automatisation.

2. Contexte industriel : atelier montage automobile

Le processus de production d'une voiture suit plusieurs étapes allant de la fabrication de la carrosserie jusqu'au montage et assemblage final des divers composants. Cette partie présente le processus de production, les enjeux des lignes de montage, ensuite les besoins industriels qui sont à l'origine de ce travail de thèse.

2.1. Processus de production d'une voiture

Le produit automobile est composé de deux sous-ensembles. Le premier est la carrosserie qui répond à trois fonctions majeures : la fonction structure, la fonction abri et la fonction aérodynamique. Le second est l'ensemble des organes mécaniques : la chaîne de transmission (embrayage, boîte de vitesse, arbres et différentiel), les organes de liaison à la route (suspension, direction, circuit de freinage), la source et la distribution d'énergie (moteur, batterie, câblage...) et les équipements et accessoires (glaces, sièges...) [17]. Cette diversité de composants impacte le processus de production d'une voiture, ce dernier suit les quatre étapes suivantes : l'emboutissage, le ferrage, la peinture et le montage comme le décrit la Figure 3.

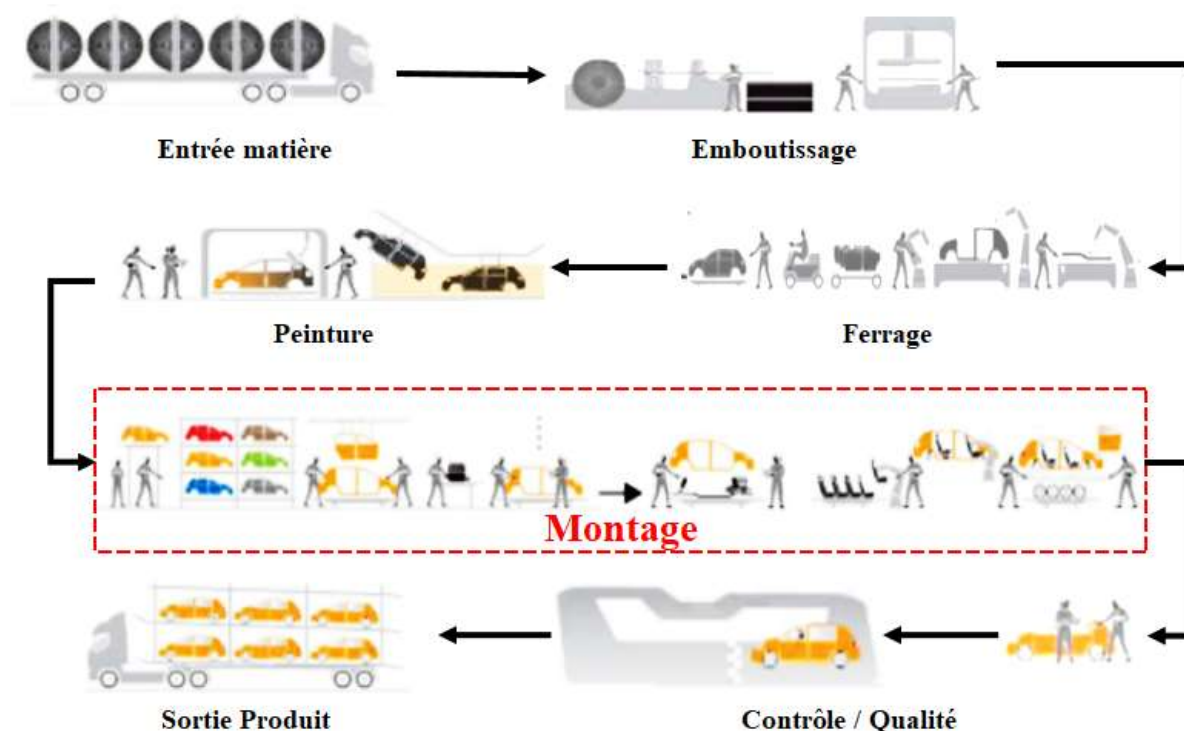


Figure 3 : Synoptique des différentes étapes de production d'une voiture (Schéma adapté des travaux de Feno [18])

Emboutissage : la préparation des pièces métalliques pour construire l'armature du véhicule, sa carrosserie et son châssis se fait dans cet atelier en transformant des bobines d'acier en pièces embouties consommées, par la suite, par l'atelier ferrage.

Ferrage : à partir des pièces embouties et en utilisant des outils de soudure automatisés, l'armature est fabriquée puis les éléments de la carrosserie (portes, capots...) sont assemblés.

Peinture : dans cet atelier, plusieurs traitements sont effectués sur le véhicule ; traitement de surfaces (anti-gravillons, anticorrosion, étanchéité), apprêts, laques et vernis.

Montage : cet atelier est le plus complexe et le moins automatisé ; l'Homme y est omniprésent. En effet, c'est dans cet atelier, que le véhicule prend sa forme finale ; différents composants y sont assemblés (vitres, tableau de bord, moteur, sièges, roues, calculateurs) et plusieurs contrôles qualité y sont effectués.

Chez les constructeurs automobiles, le montage est l'étape du processus de production des véhicules le moins automatisé. Les réflexions continuent pour définir la forme d'automatisation à mettre en place. Cet atelier est donc l'objet de ce travail de thèse.

2.2. Synoptique cible de l'atelier montage

L'atelier montage dispose d'une ligne principale qui est découpée en deux grands secteurs. Le premier est l'Habillage Caisse (HC) où sont installés les éléments structurels comme les faisceaux, la miroiterie ou encore le tableau de bord. Le deuxième secteur est le Montage Véhicule (MV) où sont installés les éléments fonctionnels comme : le moteur, les sièges ou encore les roues. Autour de cette ligne principale, se trouvent des zones de préparation comme la préparation des portes, du groupe

motopropulseur, ou encore la préparation des organes mécaniques. La Figure 4 illustre l'architecture de l'atelier montage et les différentes zones de préparation.

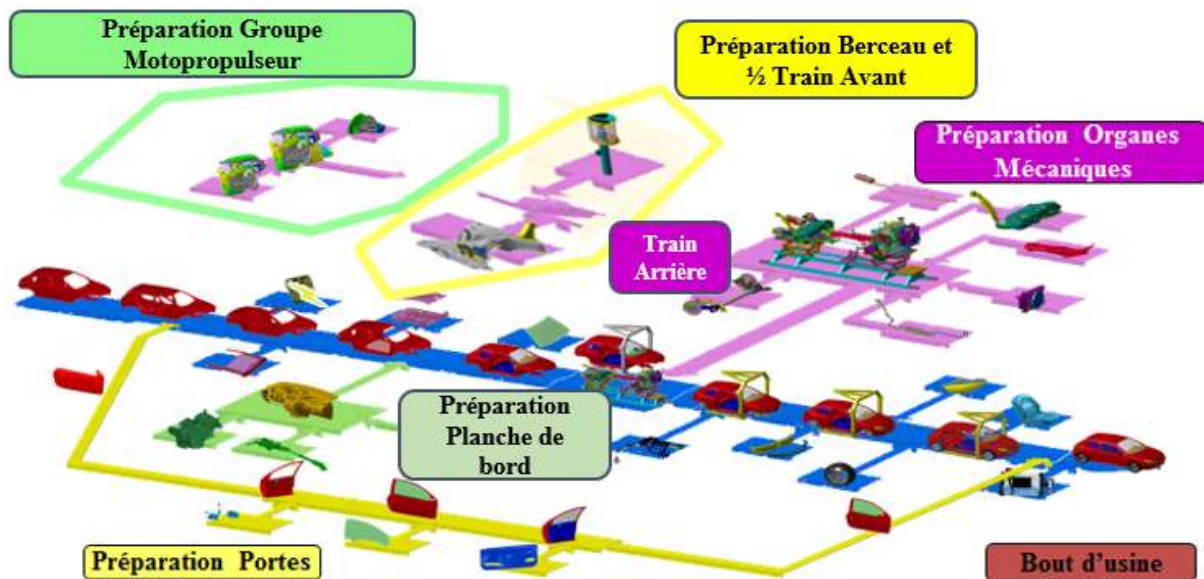


Figure 4 : Synoptique cible de l'atelier montage [19]

Le synoptique cible est un document qui décrit le fonctionnement considéré optimal de l'atelier montage allant de son architecture jusqu'à l'enchaînement des opérations. En effet, vu la complexité de cet atelier, il faut qu'il soit dimensionné au mieux, dans un esprit de gain de coûts de main d'œuvre et d'infrastructure.

2.3. Enjeux des lignes de montage multi-modèles

Le processus de montage est caractérisé par l'ensemble des relations de précédence qui induisent l'ordre d'exécution des tâches ainsi que par les temps opératoires. Selon le dictionnaire de la gestion de la production et des stocks [20], la ligne de montage est : « ... un système de production caractérisé par une implantation linéaire des postes de travail. Cette chaîne peut être constituée par une série de machines-outils reliées entre elles par des canalisations ou des convoyeurs. »

Aujourd'hui, la production de voitures connaît un accroissement et une diversité de modèles et d'options. Etant donné le coût des installations, le montage de ces différents modèles se fait sur la même ligne. Ces lignes de production sont appelées lignes d'assemblage multi-modèles [21]. Ceci pousse les entreprises à repenser l'organisation des flux et des moyens de production pour faire face à la diversité produit, mais aussi pour avoir des flux tendus qui permettent de réduire les délais clients [22]. Dans ces lignes, moyennant un convoyage automatisé, les produits passent par différents postes de travail. Le temps entre deux produits consécutifs est constant ; ce temps est appelé « Temps de cycle ».

Les opérateurs, quant à eux, suivent les produits durant leur passage dans les convoyeurs et doivent réaliser leurs tâches dans la limite du temps de cycle et en respectant leur zone de déplacement comme le montre la Figure 5.

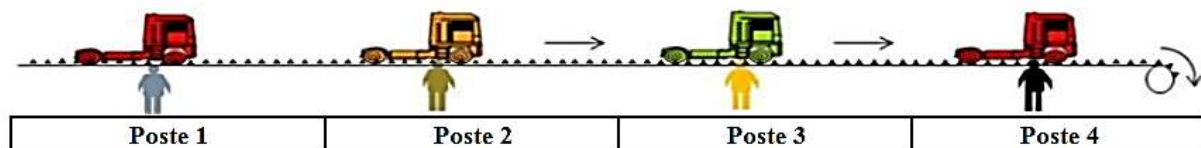


Figure 5 : Schéma représentant les zones de déplacement des opérateurs sur une ligne de montage [22]

Une ligne d'assemblage est découpée en plusieurs pas de travail ayant des longueurs identiques qui représentent l'écart entre l'avant de deux véhicules consécutifs [23]. Des zones de stockage d'outils et de pièces nécessaires à la réalisation des opérations sont présentes de chaque côté de la ligne. La Figure 6 schématise un poste de travail situé sur le côté gauche de la voiture. L'opérateur évolue dans un espace de travail délimité (rectangle avec traits discontinus). Il utilise des outillages fixes ou mobiles et consomme des pièces qui sont présents dans des zones de stockage. Le pas de travail est présenté par des traits discontinus.

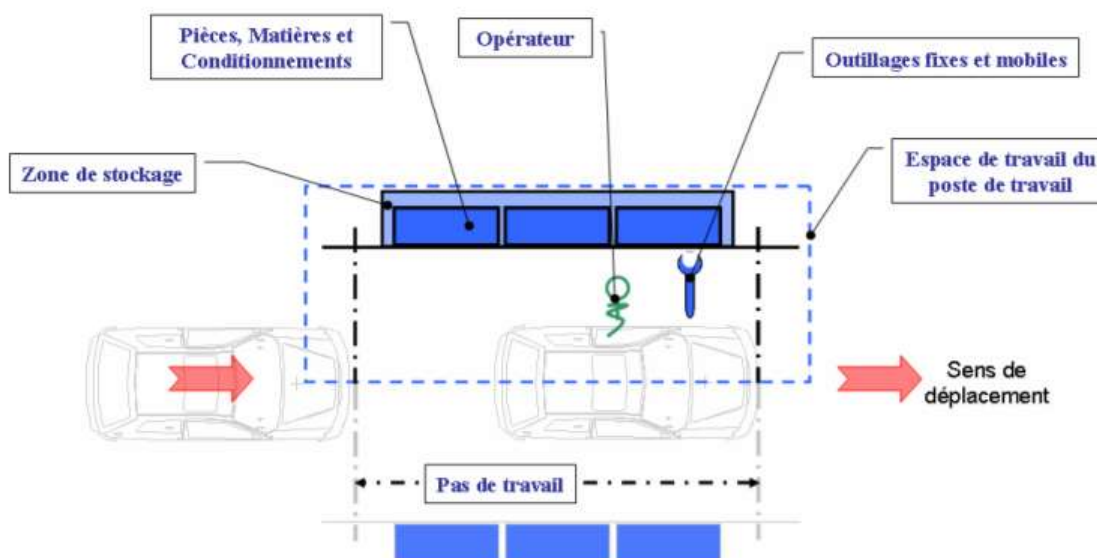


Figure 6 : Schéma d'un poste de travail positionné à gauche de la voiture sur une ligne de montage [23]

L'optimisation des postes de travail est l'un des objectifs primordiaux pour l'industrie. Cet enjeu peut être motivé par des problèmes de santé, d'ergonomie et de sécurité pour les opérateurs et/ou par la volonté d'améliorer les performances du poste (vitesse, cadence, précision, répétabilité, qualité, fiabilité ...) [24], [25]. Dans ce contexte de production, l'équilibrage des charges entre les différents postes de travail représente une contrainte qu'il faut prendre en compte. En effet, un mauvais équilibrage conduit à une mauvaise utilisation des ressources et compromet la rentabilité de la chaîne [22]. Il est donc important de bien élaborer ses gammes de montage.

2.4. Besoins industriels

Aujourd'hui, le défi technologique pour les industriels est d'avoir une ligne de production flexible au produit et au volume. Une ligne qui permet de fabriquer une grande diversité de produits avec des volumes de production différents tout en restant rentable. Cependant, le plus grand challenge est de

pouvoir intégrer de nouveaux produits qui n'existaient pas au moment de la conception et la mise en place de la ligne. Ainsi, la conception d'une ligne automatisée, flexible et reconfigurable s'inscrit dans la démarche « Usine du Futur » du constructeur automobile Stellantis.

A partir des études menées sur le terrain et les différentes réunions avec les industriels, il a été possible d'identifier l'ensemble des besoins industriels concernant l'automatisation de l'atelier montage automobile :

- Définir un indicateur pour mesurer le niveau d'automatisation des postes de travail et de l'atelier montage automobile
- Faire un état des lieux
- Définir une méthodologie pour évaluer et améliorer le niveau d'automatisation
- Comparer différents scénarios d'automatisation et choisir celui qui permet d'obtenir le meilleur compromis coût/qualité/ergonomie ...
- Prendre en compte les évolutions possibles des produits

3. Problématique et objectifs de la thèse

Pour faire face aux contraintes liées aux évolutions des produits, et aux exigences croissantes de la clientèle tout en restant compétitif sur le marché, les industriels automatisent de plus en plus leurs chaînes de production tout en analysant la portée de cette automatisation. Cette nouvelle direction permet également d'intégrer de nouvelles approches afin de remédier à des problèmes d'ergonomie et de qualité.

Pour l'atelier montage automobile, les automatisations existantes sont mises en place pour des opérations spécifiques qui sont concentrées sur des zones d'atelier dédiées et sécurisées sans interaction avec les opérateurs. Ces travaux de recherche ont pour but de proposer des évolutions des automatisations de l'atelier montage dans le cadre de l'industrie 4.0. Néanmoins, la diversité des modèles, des pièces ainsi que l'intégration de nouveaux véhicules (hybrides, électriques ...) sont des contraintes à prendre en considération pour atteindre une automatisation qui réponde aux critères de rentabilité, d'agilité et de flexibilité.

Chez Stellantis, la chronologie des opérations de montage est définie macroscopiquement par un synoptique générique qui structure l'architecture de l'atelier. Ceci permet de conserver le même ordre de montage des opérations structurantes vis-à-vis de la conception des véhicules et entre les différentes usines. Un autre axe de recherche consiste à améliorer ce synoptique générique en se basant sur les propositions d'automatisation qui vont être identifiées. Ainsi, le premier objectif sera de définir les principes et critères permettant d'identifier et de sélectionner les opérations à automatiser afin d'aboutir à une méthode d'aide à la décision. Par la suite, en appliquant cette méthodologie, des automatisations techniquement et économiquement faisables seront proposées.

Afin d'identifier les améliorations possibles et faire ainsi évoluer le synoptique cible, il sera nécessaire de répondre à la problématique de recherche suivante :

Comment identifier les zones d'assemblage à potentiel d'automatisation dans le cadre d'une production multi-modèles ?

A partir de cette question clé, un ensemble d'objectifs est dérivé. Ces objectifs permettent de guider et de structurer les travaux de recherche. Ils sont présentés sous forme de quatre questions qui traitent différents aspects de l'automatisation des systèmes de production.

- **Question 1 :** Comment qualifier le degré d'automatisation d'un poste de travail ? Voir d'un atelier de montage ?

Le travail de recherche a pour objectif de développer une méthodologie pour augmenter le niveau d'automatisation des chaînes de montage. Ainsi, la **Question 1** aborde la nécessité de définir une échelle d'évaluation et les paramètres clef de ce niveau. Cette échelle est utilisée, dans la suite des travaux, pour évaluer les postes de travail identifiés comme étant à potentiel d'automatisation.
- **Question 2 :** Quels sont les critères de regroupement d'opérations en vue d'équilibrer la charge opérateur et la charge moyens automatisés ?

A travers le regroupement, l'industriel cherche à équilibrer la charge des opérateurs et la charge des installations automatisées. Ainsi, la **Question 2** met l'accent sur les différents critères à prendre en compte pour pouvoir chercher des regroupements d'opérations.
- **Question 3 :** Quelle est l'approche la plus adaptée pour chercher des regroupements d'opérations pour les automatiser ?

L'objectif de l'industriel est, avant tout, de mettre en place des automatisations rentables. Etant donné que les opérations de montage sont très courtes en durée, la recherche de regroupements d'opérations reste la meilleure solution pour garantir le critère de rentabilité. La **Question 3** aborde cette problématique. L'objectif est de conduire les travaux de recherche vers le développement d'une approche qui permet de rechercher des regroupements d'opérations.
- **Question 4 :** Quels sont les critères de sélection et la méthode permettant d'identifier le scénario d'automatisation optimal ?

Une fois, les regroupements d'opérations effectués, plusieurs scénarios d'automatisation sont proposés. Ainsi, afin de déterminer celui qui respecte le plus la vision de l'industriel, plusieurs critères de sélection sont à définir et à quantifier. La **Question 4** a donc pour objectif de mettre en lumière cet aspect de décision multicritère.

La Figure 7 donne un aperçu des objectifs de la recherche. Elle présente les liens qui existent entre eux et les modèles développés pour répondre à chacune des quatre questions formulées. Premièrement, il faut analyser toutes les données d'entrée : l'architecture de l'usine, les gammes de production ou encore la conception des produits actuels et futurs. A partir de ces informations, il faut étudier les contraintes de précedence entre les opérations de montage, et les critères qui permettent de les regrouper. A l'issu de cette analyse, plusieurs scénarios avec un niveau d'automatisation sont proposés. La décision se fait sur la base d'une analyse multicritère pour déterminer le scénario « optimal ».

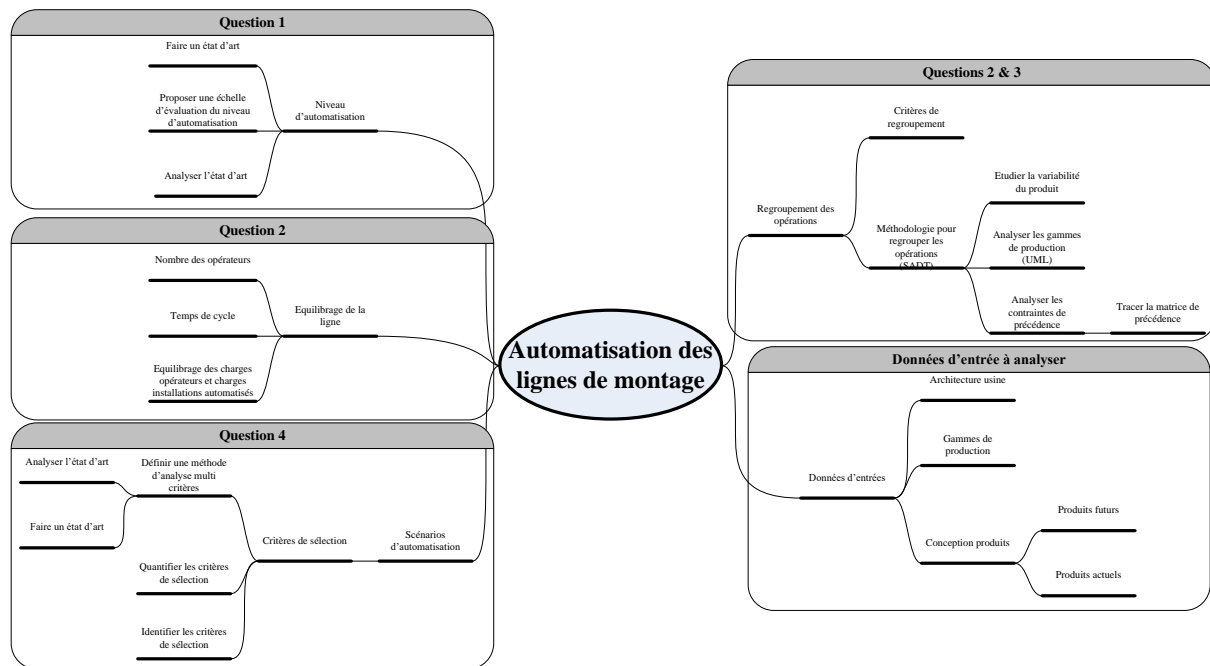


Figure 7 : Synthèse des objectifs des travaux de recherche et des modèles développés

La structure de ce document suit également la logique des objectifs de recherche. Ce manuscrit comprend donc cinq chapitres :

Chapitre 1 détaille le contexte des travaux ainsi que les besoins industriels et scientifiques. La problématique globale de recherche est définie. A partir de cette problématique, quatre questions sont dérivées et présentées.

Chapitre 2 analyse l'état de l'art réalisé sur chacun des aspects abordés par les questions de recherche. Les travaux issus de la littérature sont discutés et leurs lacunes sont expliquées. Le besoin de nouveaux modèles et méthodes est souligné.

Chapitre 3 répond aux différentes questions en détaillant les modèles et méthodes développés. Ce chapitre propose ainsi une définition du niveau d'automatisation adéquate aux travaux de thèses (*Question 1*). Par la suite, il définit les différents critères permettant le regroupement d'opérations (*Question 2*). Ce chapitre présente la méthodologie développée pour augmenter le niveau d'automatisation des lignes de montage (*Question 3*) ainsi que les modèles de calcul pour le choix d'un scénario d'automatisation (*Question 4*).

Chapitre 4 présente trois cas d'études industriels. Les différents modèles et méthodes développés sont appliqués pour analyser différentes zones de la ligne montage automobile.

Chapitre 5 conclut le travail de recherche effectué. Il résume les différentes contributions et souligne leurs limites. Ceci permet de proposer de nouveaux axes de recherche.