

Contexte, positionnement et enjeux

1. Contexte, positionnement et enjeux

L'objectif de ce chapitre est de positionner nos travaux de recherche par rapport à la communauté scientifique du génie industriel en général, plus particulièrement de l'ingénierie de conception et par rapport aux axes de recherche de deux laboratoires qui encadrent cette thèse (LTAFC et LCPI) et des laboratoires nationaux et internationaux. Nous nous concentrerons sur l'identification des verrous scientifiques de notre travail tout au long de ce chapitre.

1.1 Contexte

1.1.1 Génie mécanique

La mécanique constitue une discipline de base du domaine des sciences physiques et couvre plusieurs aspects scientifiques, technologiques et industriels qui concernent de près ou de loin les systèmes mécaniques. En effet, on peut mettre la mécanique fondamentale comme un noyau central autour duquel des aspects théoriques (mécanique analytique, mécanique numérique) et expérimentaux sont regroupés. En outre, ce noyau est entouré par deux grands domaines, à savoir la mécanique des solides et la mécanique des fluides, qui réunissent de nombreux champs du savoir : matériaux, structures, mécanismes, acoustique, thermique, écoulements (Devalan, 2009).

Ce travail de thèse relève du génie mécanique dans la mesure où nous nous intéresserons à la conception des systèmes mécaniques tout en améliorant leurs performances mécaniques.

1.1.2 Génie industriel

La définition communément admise du «génie industriel» (Industrial Engineering) est proposée par l'Institute of Industrial Engineers (IIE) comme étant *«la conception, l'amélioration et l'installation de systèmes intégrés mettant en jeu des hommes, des matériaux, des équipements et de l'énergie. Il s'appuie tant sur les connaissances spécialisées et les aptitudes dans le domaine des mathématiques, de la physique et des sciences sociales que sur les principes et méthodes des sciences de l'ingénieur, ceci pour spécifier, prédire et évaluer les résultats de ce type de système.»*

Cette définition montre la pluridisciplinarité de ce domaine et le considère comme le carrefour

des sciences humaines, économiques et sociales et les sciences exactes et naturelles. Sa préoccupation est de les implémenter dans les systèmes afin d'en extraire des améliorations. Le génie industriel s'intéresse ainsi à trois disciplines : conception de système ; amélioration de système ; installation de système (Lahonde, 2010).

Ce travail de thèse touche le domaine du génie industriel dans la mesure où nous nous intéresserons au champ de la conception. Plus précisément, nous visons l'amélioration de la conception préliminaire d'un produit.

1.1.3 Science de la conception

La conception est une activité cognitive par laquelle une solution à un problème peut être établie (Ullman, 2010). Depuis longtemps, on tente de solutionner des problèmes par la conception sans même connaître ou penser que cela puisse être une science, comme un comportement naturel (Audoux, 2019). Cette activité n'a été jamais considérée comme une science qu'après les années 1960. Selon l'axe chronologique, son évolution connaissait deux étapes majeures (Cross, 2001):

- Dans les années 1920, l'arrivée d'artistes voulant réaliser des produits plus scientifiques.
- Dans les années 1960, l'émergence de ce qu'on connaît aujourd'hui le processus de conception.

Cette évolution est marquée par l'apparition de différents processus de conception. Selon Tomiyama *et al.* (Tomiyama *et al.*, 2009), ces processus sont intégrés dans les programmes académiques et enseignés. L'éducation des sciences de conception contribue à leur popularisation, mais aussi à leur acceptation en tant qu'une science. En ce qui concerne les sciences de conception, la conception est définie par plusieurs chercheurs comme étant un recueil de connaissances théoriques et empiriques autour du processus de conception (Le Moigne and Simon, 1991).

L'ingénierie de la conception est considérée comme une branche du génie industriel. Les auteurs Hubka et Eder (Hubka and Eder, 1996) donnent les contours et proposent un découpage de l'ingénierie de conception, en quatre thématiques :

- La théorie des systèmes techniques ;
- La théorie de la conception et la théorie du processus de conception ;
- La connaissance appliquée issue des sciences humaines et sociales ;
- Les méthodologies de conception.

L'objectif de la présente thèse est d'apporter une approche de conception et d'optimisation pour l'amélioration de la conception préliminaire d'un produit. En ce sens, notre travail de thèse se positionne à l'intersection des méthodologies de conception (approche de conception) et des méthodes de conception (méthodes d'optimisation, les outils de simulation et de calcul) comme l'indique le point noir sur la Figure 1.1. Ce positionnement est justifié par les apports attendus par ce travail et le positionnement des laboratoires encadrant cette thèse.

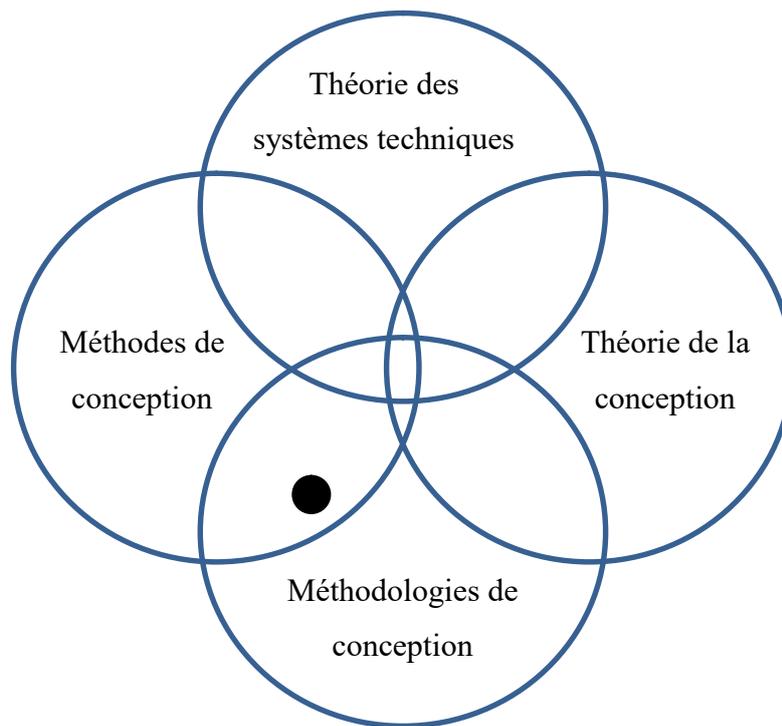


Figure 1.1: Position de la thèse dans les sciences de la conception

1.2 Enjeux de la conception préliminaire

Dans le processus de conception d'un produit, la phase regroupant les étapes de recherche de concepts et de conception architecturale est dite *conception préliminaire* (Figure 1.2). Durant cette phase, un choix d'un principe de solution ou d'un concept de principe (Yannou, 2001) est effectué suivant les exigences du CdCF, suivi par la détermination des choix structuraux et technologiques (composants, matériaux, pré-dimensionnement du produit) de ce concept. A ce stade, les concepteurs manipulent des données et des connaissances hétérogènes provenant de différentes disciplines, de domaines divers dont les relations sont souvent imprécises ou connues de façon partielle (Travé-Massuyès et al., 1997).

Dans la plupart des cas, ces connaissances sont incomplètes ou mal définies et les contraintes liées à la conception optimale du produit sont encore mal déterminées ; ce qui rend le

processus de décision difficile et complexe, comportant des risques qui peuvent impacter les phases de conception subséquentes.

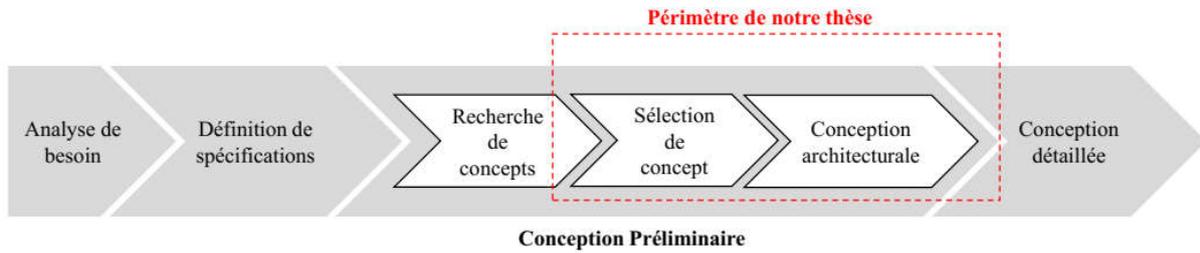


Figure 1.2 : Les phases du processus de conception

Donc, la phase de conception est une phase cruciale du processus de conception durant laquelle la prise de décision impacte évidemment le coût d'un projet industriel. La Figure 1.3 issue des travaux de Berliner et Brimson (Berliner et Brimson, 1988) illustre que la phase de conception préliminaire représente moins de 5% des dépenses de développement, alors qu'elle conditionne à hauteur de 80 % les coûts du cycle de vie.

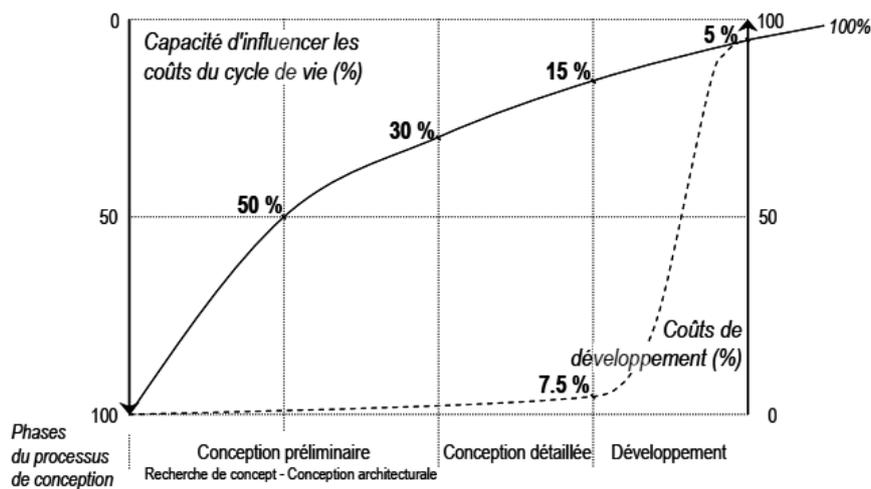


Figure 1.3 : Influence stratégique de la conception préliminaire sur les coûts de développement d'un produit (Zimmer and Zablit, 2001)

1.3 Optimisation : un enjeu de compétitive

Durant la conception, la tâche d'optimisation s'effectue généralement par le biais d'un processus itératif à travers lequel le concepteur compare plusieurs solutions alternatives de conception, en se basant sur un certain nombre de critères afin de choisir la meilleure solution (Roy et al., 2008). La Figure 1.4 présente les différentes approches d'optimisation existantes en ingénierie de conception.

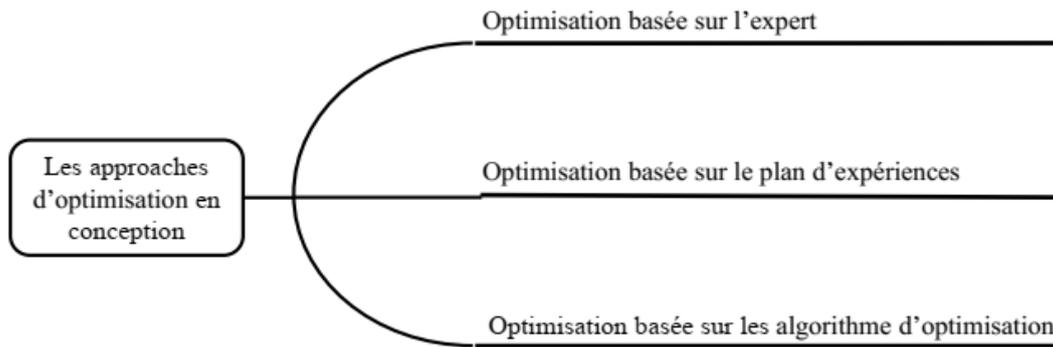


Figure 1.4 : Différentes approches d'optimisation en conception (Roy et al., 2008)

- **Optimisation basée sur l'expert** : en utilisant le jugement de l'expert qui se base sur ses connaissances ou les résultats de simulation obtenus par des outils CAD - CAE. Le principal avantage de cette approche réside dans le fait que les concepteurs ne requièrent aucune compétence supplémentaire, la procédure prend moins de temps pour aboutir à une solution optimale en apportant une amélioration progressive. Les principaux problèmes sont liés à l'interdépendance d'experts pour évaluer les alternatives de conceptions et trouver une meilleure solution.
- **Optimisation basée sur les plans d'expériences** : c'est une méthode structurée et organisée qui permet de déterminer les relations entre les facteurs affectant les performances de produit.
- **Optimisation basée sur les algorithmes d'optimisation** : ils sont devenus matures et populaires et permettent d'automatiser le processus de recherche des solutions optimales. En effet, ils sont capables d'explorer efficacement l'espace de conception en présence de multiples contraintes. Maintenant, on peut dire qu'ils sont bien adaptés par rapport aux deux approches présentées auparavant car dans les cas réels, les problèmes d'optimisation en conception sont souvent non linéaires, contraints, multi-objectifs et souvent multidisciplinaires. Ces algorithmes d'optimisation sont considérés comme un moyen de compétitivité pour les entreprises, non seulement pour réduire le temps de développement et améliorer la qualité du produit à concevoir mais aussi pour mettre l'accent sur la conservation des ressources naturelles et la réduction de la consommation d'énergie (Vanderplaats, 2002).

1.4 Utilisation de l'optimisation en pratique

Un sondage effectué par Tiwari et al. (Tiwari et al., 2015) sur l'utilisation de l'optimisation dans le secteur industriel, pour lequel, 51 documents ont été analysés pour neuf entreprises

dans différents domaines industriels au Royaume-Uni. Ce sondage a montré que 60% des entreprises utilisent l'optimisation depuis plus de 10 ans (Figure 1.5a). Cependant, 40% n'utilisent l'optimisation que dans moins de 50% dans leurs départements. En outre, 17% des entreprises utilisent l'optimisation en conception au niveau composant (Figure 1.5b), 33% au niveau composant et sous-système et 50% au niveau produit, sous-système et composant. Ce sondage relève qu'il y a des limitations entravant cette utilisation. Certaines d'entre elles sont : le recours souvent au processus manuel (itératif), le manque de formation et de support d'utilisation, ainsi d'autres problèmes qui sont liés à la culture des entreprises, à la certification et au processus de conception lui-même.

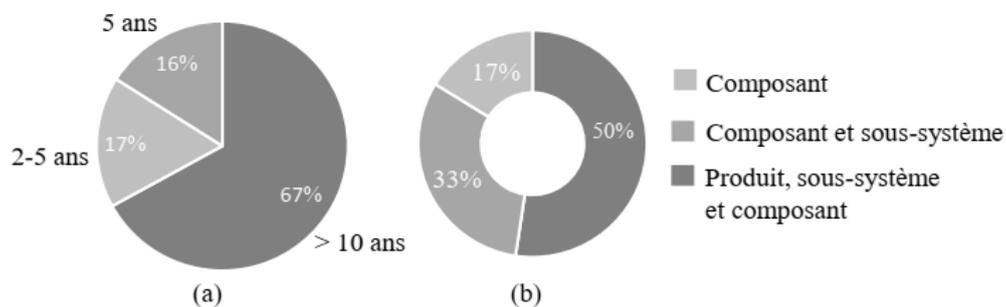


Figure 1.5 : situation de l'optimisation dans l'industrie : (a) Expérience d'utilisation, (b) : différents niveaux d'utilisation (Tiwari et al., 2015)

1.5 Amélioration de la conception préliminaire

La littérature indique que la phase de conception préliminaire est un facteur clé de la réussite et du succès de l'entreprise. De nombreux auteurs ont contribué à l'amélioration de cette phase. Dans ce qui suit, nous présentons quelques travaux sur lesquels nous sommes basés pour mener à bien nos travaux de recherche.

Scaravetti (Scaravetti, 2004) a par exemple proposé dans sa thèse un système d'aide à la décision en conception préliminaire. Ce système permet de parvenir à une architecture du produit validée et pré-dimensionnée à partir de plusieurs concepts de solution pertinents, avec objectivation des choix de conception pour chaque étape de prise de décision. La démarche de sélection d'une architecture de solution est constituée de trois principales étapes qui sont :

- La formulation du problème de conception préliminaire sous forme d'un Problème par Satisfaction de Contraintes (PSC),
- La recherche exhaustive des architectures candidates,
- La réduction de l'espace des solutions pour aider à la prise de décision.

Doufene (Doufene, 2013) a proposé une approche de conception qui se repose sur un cadre d'architecture de systèmes complexes, combiné avec des modèles d'optimisation multi-objectifs et d'équilibre (théorie des jeux). Il a montré l'importance d'utilisation du cadre d'architecture pour organiser et structurer tous les points de vue (organisationnelle, fonctionnelle et architecturale) permettant l'étude et la conception d'un système industriel complexe. De même, l'importance de prendre en considération l'ensemble du cycle de vie du système et son environnement dans la modélisation des problèmes d'optimisation.

Par ailleurs, dans ses travaux sur la conception des produits complexes particulièrement en phase de conception conceptuelle, Safari (Safavi, 2016), a développé une méthodologie nommée CMDO (Collaborative Multidisciplinary Design Optimisation) dans laquelle il a défini un ensemble de rôles et de tâches pour différents acteurs permettant la collaboration efficace entre eux durant la conception. Cette méthodologie fait appel à l'implémentation des métamodèles à haute-fidélité et l'optimisation multidisciplinaire. L'idée défendue dans ses travaux est l'intégration des connaissances des experts métiers dans la phase de conception conceptuelle.

Ríos-Zapata (Zapata, 2018) a proposé une méthodologie de conception interactive en conception préliminaire qui permet d'obtenir un compromis entre la désirabilité des objectifs de conception. Le processus de compromis a pour objectif de traiter les problèmes de conception convexes et non convexes, dans un environnement de conception multidisciplinaire. Ce processus de compromis est basé sur deux concepts :

- L'élaboration d'un modèle de traçabilité, qui permet de gérer les informations à partir des exigences d'entrée (domaine des variables linguistiques) jusqu'à la définition des variables de conception (dans le domaine des nombres réels).
- Un cadre d'amélioration de la conception, fondé sur la définition des fonctions de désirabilité des objectifs de conception ; la propagation de ces fonctions jusqu'à ce que les variables de conception permettent de calculer les combinaisons des valeurs qui maximisent l'index global de désirabilité de la solution.

1.6 Positionnement scientifique

Dans cette section, on présente les laboratoires qui encadrent ce travail de thèse à savoir le LTAFC et le LCPI. Après cela, on présentera les autres structures scientifiques travaillant sur la même problématique et relevant du génie industriel.

1.6.1 Le laboratoire LTAFC/EMP

Ces travaux de thèse sont réalisés au sein du Laboratoire des Techniques Avancées de Fabrication et Contrôle (LTAFC). Ce laboratoire est une entité de recherche et de développement de l'Ecole Militaire Polytechnique. Les activités du laboratoire s'orientent principalement vers le développement et la maîtrise des nouvelles techniques avancées de fabrication afin de mieux couvrir tous les besoins industriels, et d'optimiser les processus de conception et de réalisation des systèmes techniques.

Ainsi, ce laboratoire intègre un ensemble de méthodes et d'outils tels que le Reverse Engineering (RE), la Conception et la Fabrication Assistées par Ordinateur (CFAO), les méthodes d'optimisation et les moyens de contrôle pour concevoir des produits de qualité et améliorer leurs performances et leurs processus. La particularité de la mission du laboratoire, en plus de sa mission pédagogique principale, apporte une plus-value technique de haut niveau en termes d'expertises et de solutions technologiques innovantes.

1.6.2 Le laboratoire LCPI/ENSAM

Ces travaux de thèse sont réalisés au Laboratoire de Conception de Produits et Innovation, il se situe au sein de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers ParisTech. Actuellement, il est sous la direction du Professeur Améziane AOUSSAT qui dirige cette thèse. Depuis, sa création en 1978 il conduit une recherche en génie industriel sur l'optimisation du processus de conception et d'innovation. Cette recherche s'oriente principalement sur l'amélioration de la phase de **conception amont** du produit.

Selon Segonds et al. (Segonds et al., 2009), la phase de **conception amont** regroupe des « phases de définition et planification du projet, de recherche et de validation du concept » ainsi que « des premières étapes de la conception architecturale, jusqu'à la génération d'un tracé préliminaire », c'est-à-dire le passage d'un état immatériel (idée, besoin) à un état matériel (maquette, prototype). La Figure 1.6 illustre l'intersection entre la phase de conception amont et la phase de conception préliminaire à laquelle nous nous sommes intéressés :

Afin d'atteindre cet objectif, le laboratoire LCPI a identifié deux champs d'investigation complémentaires qui sont en forte interaction :

- Le pôle **métier** : vise à enrichir le processus de conception par l'intégration de nouvelles connaissances, règles et outils métiers (design, ergonomie, ingénierie...);
- Le pôle **processus** : ambitionne la formalisation globale du processus de conception pour mieux le comprendre et l'optimiser.

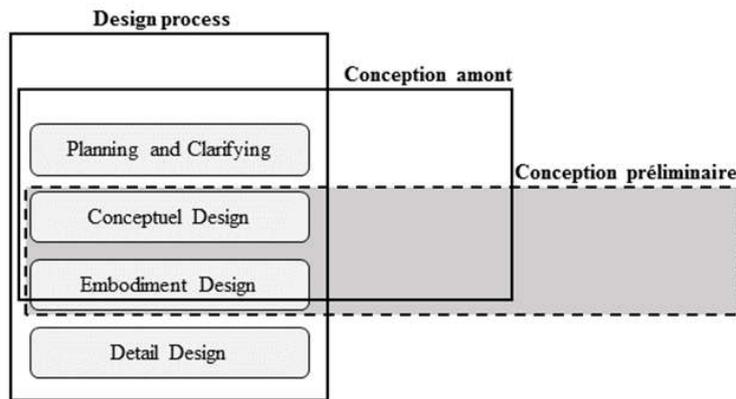


Figure 1.6 : Position de la conception préliminaire et la conception amont dans le processus de conception

Dans le **pôle métier**, les recherches ont pour but d’extraire, de formaliser et de modéliser les spécificités des différents métiers. Elles ont pour vocation de développer des méthodes et outils à l’usage des concepteurs de métiers divers. Dans le **pôle processus**, les recherches ont pour but de formaliser les divers processus individuels et collectifs qui interagissent au sein des projets de conception. Elles ont pour vocation de développer des méthodologie et méthodes à destination des chefs d’équipe de conception (Lahonde, 2010).

Dans cette thèse, nous défendons l’idée de pouvoir améliorer la phase de conception préliminaire par l’implémentation des approches et techniques d’optimisation en aidant les concepteurs à choisir une (ou des) solution(s) optimale(s) de leur produit. Ainsi, ce travail de recherche s’ancre dans le pôle processus, parce que l’optimisation est considérée dans nos travaux de thèse comme un vecteur de communication et collaboration entre les concepteurs et également les échanges des connaissances et les pratiques métiers.

Cette collaboration entre les deux laboratoires permet de mutualiser les connaissances dans divers domaines. Le laboratoire LTAFC apporte des connaissances de divers métiers à savoir l’optimisation en conception, les procédés de fabrication et le reverse engineering. Le laboratoire LCPI apporte des connaissances sur le processus de conception et d’innovation, et les méthodes et les méthodologies de conception notamment dans la phase de conception amont. Dans cette thèse, les deux connaissances peuvent être réunies afin d’améliorer la phase de conception préliminaire d’un produit.

1.7 Enjeux de cette recherche

1.7.1 Enjeux économiques

La conception préliminaire est une phase cruciale et déterminante pour le succès d'un projet de conception. Dans ce sens, Louis Schweitzer, alors PDG de Renault a énoncé dans une interview parue dans « les Echos » du 13 février 2002 (Ministère de l'Economie des Finances et de l'Industrie, 2003), qu'il y a un lien direct entre le temps de développement, le temps de mise sur le marché et le chiffre d'affaires du constructeur automobile (Lahonde, 2010). La réduction du temps dans la conception, agit directement sur le chiffre d'affaires de l'entreprise. En effet, proposer une approche de conception basée sur l'optimisation, dans la phase de conception préliminaire permettra aux concepteurs d'explorer au mieux l'espace de conception dans un temps réduit afin d'aboutir à une solution optimale et performante du produit.

Dans le même sens, Corbel (Aidi, 2007) a étudié les résultats de l'étude des dysfonctionnements dans un projet de développement véhicule chez RENAULT (Figure 1.7). Il affirme que *"la cause principale des erreurs est le manque de savoir-faire des acteurs spécificateurs, bien que l'entreprise dans sa globalité maîtrise ces savoir-faire. En effet, suite à chaque problème avéré, il suffit de quelques semaines pour résoudre les difficultés grâce à des réunions d'experts. [...] La mise en œuvre d'une expertise a un coût variable en fonction de la phase du projet. Pour un coût préventif unitaire en amont, il faudra multiplier ce coût par 10 s'il faut refaire des dessins, par 100 s'il faut modifier les outillages, par 300 si les problèmes à résoudre nécessitent de retarder le projet d'un mois. Les actions curatives coûtent 30 fois plus que les actions préventives"*.

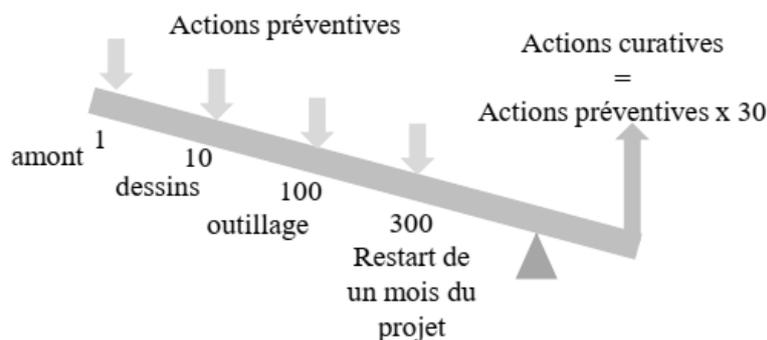


Figure 1.7 : La prévention est moins coûteuse que la correction (Aidi, 2007)

C'est dans ce cadre que l'intégration du métier de la simulation numérique au sein des phases de conception devient indispensable pour améliorer les processus de développement des véhicules. En outre, proposer une approche de conception et d'optimisation s'appuyant sur l'utilisation de modèles analytiques et/ou modèles numériques du produit, permet davantage

d'optimiser les itérations dues à la démarche classique « essai-erreur », et d'améliorer la conception d'un produit et ses performances.

1.7.2 Enjeux scientifiques

La recherche en conception est relativement récente, ce n'est qu'à partir des années 1990, qu'elle est devenue un domaine de recherche à part entière. D'une façon générale, l'objectif de la recherche en conception est d'améliorer le processus de conception au sens large du mot. En effet, selon les références (Blessing et al., 1998) et (Bylund et al., 2003), l'objectif de la recherche en ingénierie de la conception est de doter l'industrie par de nouvelles : connaissances, méthodologies et méthodes pour augmenter les chances de succès d'un produit. Ainsi, l'enjeu scientifique de nos travaux de recherche qui visent à améliorer la phase de conception préliminaire par l'introduction judicieuse des techniques d'optimisation, concerne l'enrichissement du champ disciplinaire des sciences de la conception.

1.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons discuté du contexte de nos travaux de thèse. Après avoir cerné les périmètres industriel et académique, nous avons défini le cadre de nos travaux de recherche afin de contribuer effectivement à l'amélioration de la conception préliminaire. Ce cadre couvre trois champs à savoir : les méthodologies et méthodes de conception ; les techniques mathématiques d'optimisation ; la modélisation et simulation des performances de produit.

Enfin, l'idée éloquente derrière ce travail est la suivante : L'aide à la sélection d'une solution optimale de produit en phase de conception préliminaire par l'implémentation de techniques mathématiques d'optimisation, de modèles analytique et numérique de produit. Cela se traduit par proposition d'une approche permettant aux entreprises de trouver un compromis entre les exigences techniques, en termes de paramètres de conception, et la viabilité économique en termes de performances (temps, qualité de produit). Cette approche trouve son intérêt particulièrement au niveau des entreprises qui développent des systèmes techniques.