
La technologie laser : démarche d'intégration au sein d'un processus de fabrication d'une PME

Nicolas Roulet — Patrice Dubois — Améziane Aoussat

Laboratoire Conception de Produits et Innovation

ENSAM Paris

151, Boulevard de l'Hôpital

75013 Paris

France

nicolas.roulet@paris.ensam.fr

patrice.dubois@paris.ensam.fr

ameziane.aoussat@paris.ensam.fr

RÉSUMÉ. La technologie laser, grâce à des atouts non négligeables (puissance, vitesse et qualité d'exécution), présente aujourd'hui de plus en plus d'applications dans le monde industriel. Elle devient donc, pour certaines sociétés, une technologie de fabrication attractive permettant de réduire les coûts et les délais de fabrication. Cependant il est difficile pour une PME, de l'intégrer à son processus de fabrication existant (technologies classiques). L'étude menée et décrite dans cet article montrera la nécessité de proposer une démarche formalisée d'intégration d'une technologie laser pour que celle-ci soit optimum. La démarche proposée sera déclinée en quatre grandes phases : Analyse de l'existant, Modélisation du processus de fabrication, Elaboration du nouveau processus de fabrication, Préparation à l'implantation.

ABSTRACT. The laser technology, thanks to considerable assets (power, flexibility, speed and quality of execution), presents today more and more applications in the industrial world. It thus becomes, for certain companies, an attractive manufacturing technology making it possible to reduce the costs and the manufacturing lead times. However it is difficult for SME, to integrate it within its existing manufacturing process (traditional technologies). The study undertaken and described in this article will show the need for proposing a formalized step of laser technology integration so that this one is optimum. The step suggested will be declined in four great phases: Analysis of the existing environment, Modelling of the manufacturing process, Development of the new manufacturing process, Preparation with the establishment.

MOTS-CLÉS : Technologie laser, Fabrication, Intégration, Impacts, Cohabitation technologie laser/technologies classiques.

KEYWORDS: Laser technology, Manufacture, Integration, Impacts, Living together laser technology/traditional technologies.

1. Introduction

Aujourd'hui face à une concurrence de plus en plus vive, les petites et moyennes entreprises du domaine de l'emballage se doivent d'optimiser leur triptyque « Coût / Qualité / Délais » si elles désirent garder leur part de marché ou en acquérir de nouvelles. Pour assurer leur pérennité, l'intégration de technologies émergentes peut s'imposer comme l'un des choix stratégiques de ces entreprises. Certaines d'entre elles travaillent donc sur le développement et le transfert de nouvelles technologies pour concevoir et fabriquer leurs outils métalliques à des coûts et des délais réduits et à une qualité au moins égale. Parmi ces technologies en pleine progression, une semble plus attractive par ses applications multiples et pointues : la technologie laser. Cependant, ces PME s'appuient sur un bassin technologique différent de celui de ces nouvelles technologies. Elles n'ont pas le savoir technique (connaissances tirées des matériaux, de l'optique, l'électronique, la mécanique des fluides et la thermodynamique) et les ressources humaines et financières nécessaires pour pouvoir réaliser ces études de faisabilité en interne. Celles-ci sont sous-traitées par des laboratoires ou des organismes publics. Une fois le procédé élaboré les entreprises ont alors deux voies d'actions technologiques possibles (Ribault *et al.*, 1991) :

- soit elles décident d'utiliser au mieux, par la sous-traitance ou le partenariat, cette technologie laser sans l'intégrer en interne à leur processus de fabrication,
- soit elles décident d'intégrer le procédé pour exploiter au maximum ses possibilités et ses diverses applications. Cette appropriation en interne permettra de développer de la connaissance nouvelle et un nouveau savoir faire.

Cette seconde voie semble être très délicate, mais c'est celle qui à long terme sera la plus fructueuse. En effet « le défi de toutes entreprises est à la fois de trouver les technologies du futur, de s'assurer qu'elles sera en phase avec sa stratégie et de s'en rendre suffisamment maître pour garder son avance ou atteindre de plus ambitieux objectifs » (Ribault *et al.*, 1991). Or ce changement ne peut se réaliser que si l'entreprise suit une méthodologie ordonnée et rigoureuse. L'objectif de notre étude est donc d'élaborer une démarche qui prenne en compte les structures internes de l'entreprise pour une intégration et une maîtrise optimale de la technologie. Elle s'articulera autour de trois axes forts : l'analyse de l'existant, la modélisation des processus, l'évaluation des impacts technologies laser/entreprise. Elle visera à contribuer à l'instauration de nouveaux systèmes de fabrication utilisant la technologie laser, de manière à améliorer les coûts et les délais de fabrication des PME.

2. La technologie L.A.S.E.R. (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

C'est en 1917 qu'Albert Einstein émet le principe de l'émission stimulée, la base physique sur laquelle se sont reposés les scientifiques pour élaborer les premiers

systèmes laser dès les années 1960. Depuis cette période, le progrès technologique à conduit deux grands types de lasers à s'introduire en masse dans les industries: les lasers à cavité gazeuse et les lasers à cavité solide.

2.1. L'approche théorique

Comme son nom l'indique le laser est un dispositif permettant de produire et d'amplifier un rayonnement électromagnétique par le phénomène contrôlé d'émission stimulée. Le principe repose sur un phénomène de pompage par excitation. L'énergie primaire est amenée de l'extérieur du système par alimentation haute tension (pompage électronique) ou par lampes ou diodes (pompage optique), jusqu'au matériau actif (liquide, gaz, solide...). Cette énergie va exciter les électrons des atomes du matériau. Ces derniers vont alors passer d'un certain niveau d'énergie à un niveau d'énergie supérieur. En revenant à leur état initial, ils libèreront leur énergie sous forme de photons lumineux.

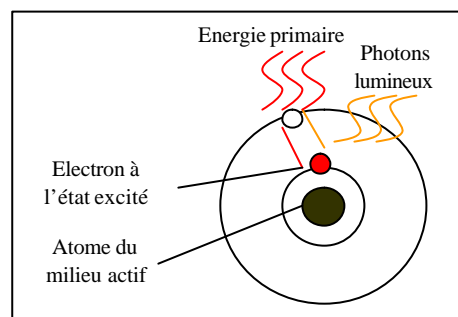


Figure 1. *Processus d'émission du photon lumineux*

Cette excitation permet de déclencher l'émission de photons en cascade. Le matériau actif est enfermé dans une cavité, qui confine le rayonnement. Aux extrémités de la cavité sont placés deux miroirs renvoyant sans cesse le rayonnement à l'intérieur. Ils sont indispensables à la création de l'amplification et ils définissent une direction privilégiée des photons : leur normale. Le miroir arrière est totalement réfléchissant alors que le miroir avant laisse passer une partie du rayonnement, ce qui autorise l'émission laser. Les différents photons sont donc « sélectionnés », et rejetés hors de la cavité, au travers du miroir semi transparent, sous forme de rayon laser (Figure 2). Ce faisceau traverse ensuite un système optique pour pouvoir se focaliser sur le plan de travail.

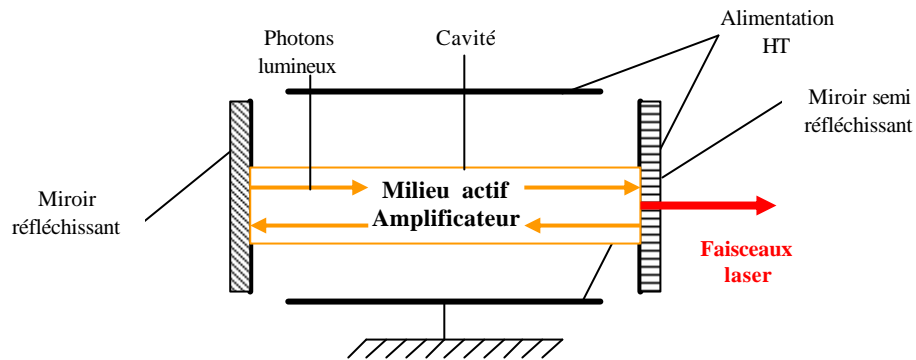


Figure 2. Schéma simplifié d'un laser

Il existe trois grandes familles de générateur laser à fortes implications industrielles, qui se différencient par la nature de leur cavité : les cavités gazeuses comme les laser CO₂ (pureté et finesse du faisceau ; $\lambda=10,6\mu\text{m}$), les cavités solides comme le laser Nd-YAG (puissance du faisceau et possibilité de le fibrer ; $\lambda=532\text{ nm}$) (Pollet, 2003), les lasers à semi conducteur comme les diodes laser (compact, mobile et efficace ; $800\text{nm}<\lambda<980\text{ nm}$) (Steen, 1998).

Ce sont aujourd'hui les lasers CO₂ qui sont les plus utilisés dans les industries françaises pour leur précision et leurs fortes puissances.

2.2. Les applications industrielles

Depuis ces vingt dernières années, la technologie laser connaît un développement en recherche appliquée considérable. De plus en plus de laboratoires travaillent sur de nouvelles applications et de plus en plus d'entreprises investissent dans cette technologie qui permet d'améliorer leur productivité et la qualité de leur produit (Scherer *et al.*, 2003). Le rayon laser est un faisceau d'énergie très concentrée, qui permet de délivrer sur des surfaces très petites des quantités d'énergie très importantes. C'est cette principale propriété, en dehors de la puissance, la flexibilité et la précision, qui est mise à profit pour travailler la matière. Voici les cinq domaines d'applications les plus développés :

- l'usinage: le perçage (première application industrielle du laser en 1966), le grainage et la mise en forme tridimensionnelle. Le laser peut usiner des matériaux durs (ex : le diamant, le tungstène, des alliages bases Nickel) mais aussi des matériaux non conducteurs tels que les céramiques, les plastiques et les polymères.

– la découpe des matériaux est à ce jour une des plus importantes applications industrielles. On peut, grâce au système laser, découper tous les types de matériaux (aciers, céramiques, plastiques etc....) présentant des épaisseurs allant jusqu'à 20 millimètres, avec des précisions et une qualité incomparables. (Curinckx *et al.*, 1999).

– les traitements de surface : le durcissement, la refusion et le rechargement laser.

- l'opération de durcissement consiste à échauffer rapidement et localement le matériau à une température légèrement inférieure à sa température de fusion. Le refroidissement de la zone durcie se fait par conduction thermique vers le cœur de la pièce, on observe alors le phénomène de trempe laser.

- l'opération de refusion consiste à échauffer le matériau en son point de fusion et de créer ainsi un bain liquide qui refroidira par conduction thermique. Ce phénomène engendre le changement structural du matériau de base dans une certaine localité de la pièce.

- l'opération de rechargement de matière consiste à venir déposer, sous forme de poudre ou de fil, une autre matière possédant des caractéristiques mécaniques intéressantes. Le faisceau laser fond localement les matériaux d'apport et le substrat. L'objectif de cette opération est d'améliorer les propriétés de la pièce dans certaines localités. Ces opérations se faisaient avant par soudure à l'arc (TIG ou MIG), cependant le taux de dilution du substrat était trop élevé pour avoir un dépôt uniforme de bonne qualité (le taux de dilution altère les propriétés mécaniques du dépôt). Aujourd'hui grâce au laser le taux de dilution et la précision de dépôt est quasi maîtrisée.

	Rechargement à l'arc	Rechargement laser
Taux de dilution	~ 20 %	< à 5 %
Précision de dépôt	± 100 µm	± 50 µm
Vitesse d'exécution	~ 100 mm/min	~ 1m/min

On s'aperçoit, grâce à ce comparatif, que la technologie laser est aujourd'hui la plus performante, en terme de qualité de dépôt (taux de dilution, caractéristiques mécaniques...), de précision et de vitesse d'exécution.

– la soudure laser se fait sans apport de matière. Ses principaux avantages par rapport à des méthodes conventionnelles sont : une vitesse d'exécution beaucoup plus rapide, un retrait mécanique plus faible du fait de l'étroitesse de la zone affectée thermiquement et une grande précision d'exécution.

– le prototypage rapide où les méthodes de fabrication par ajout de matière (l'objet est constitué par un empilement séquentiel de couche de matière les unes sur les autres). La technologie laser permet, ici, d'amener l'énergie nécessaire à la polymérisation d'une résine ou au frittage d'une poudre métallique et de solidifier

ainsi une section correspondant à l'objet final. Les lasers utilisés sont principalement des lasers de faibles puissances, les matériaux n'étant pas des matériaux à hautes caractéristiques mécaniques (Bernard *et al.*, 1998).

3. Les difficultés d'intégration de la technologie laser dans une PME

La technologie laser semble avoir trouvé aujourd'hui, une panoplie d'applications industrielles qui lui permette de mettre ses nombreux avantages en valeur. Cependant il reste difficile pour la plupart des PME de s'investir scientifiquement et humainement sur des applications propres et sur l'intégration de tels procédés. De plus le laser fait partie des technologies de haute précision à fortes connaissances techniques. Pour une PME, intégrer un tel procédé c'est se créer un nouveau bassin technologique.

3.1. Le contexte industriel

La société dans laquelle nous intervenons, PME de 200 salariés, voit ses parts de marché diminuées. Cette perte est due en majeure partie à des délais de production trop longs par rapport à une concurrence internationale qui a su les réduire. Cette PME s'est alors attachée, dans un premier temps, à optimiser son processus de fabrication d'outils métalliques. Aujourd'hui cette optimisation passe par l'introduction d'une nouvelle technologie en son sein : la technologie laser. Effectivement, « se sont les pressions de la concurrence sur les marchés qui poussent les entreprises à innover en trouvant des applications nouvelles à des technologies déjà exploitées ou nouvelles » (Ribault *et al.*, 1991).

Les outils de précision réalisés par cette société doivent présenter de hautes caractéristiques mécaniques en certains points. Jusqu'à présent la seule possibilité de fabrication fût de réaliser l'outil, dans sa totalité, dans un matériau noble. Cela engendre d'importantes contraintes techniques dans la fabrication de ces pièces.

Un des procédés de technologie laser, déjà exploité par d'autres industriels, dans des domaines variés et sur des matériaux différents, a été identifié comme pouvant être bénéfique à la libération de ces contraintes. Il permettrait de réduire le nombre d'opérations de fabrication (~40% sur les délais de production) et de réduire fortement les coûts de production (~30%). Cependant ils ne permettent pas à eux seuls d'atteindre des précisions assez fines pour répondre aux cahiers des charges des outils de précision, les technologies classiques restent donc incontournables (Roulet *et al.*, 2002).

L'absence de compétences sur la technologie laser au sein de l'entreprise, a donc obligé les décideurs à sous-traiter l'étude de faisabilité du futur procédé : une matière spécifique, des formes déposées spéciales. Cependant le développement du procédé par une source extérieure, n'est pas une fin en soi pour la société. En effet, il faut ensuite pouvoir l'intégrer dans son processus de fabrication et maîtriser, à

terme, cette nouvelle technologie (développement de connaissances et de compétences).

3.2. Problématiques d'intégration de la technologie laser :

Les PME-PMI présentent généralement des organisations rigides qui leur permettent une réactivité plus forte. Cependant elles manquent de moyens financiers et humains, de méthodologies et d'outils, pour mener à bien des projets innovants comparables à celui que nous vous avons exposé. Les ingénieurs des bureaux d'études, sont souvent seul sur ces projets qui leur ont été attribué en plus de leur tâches quotidiennes. Très vite la gestion du quotidien prend le pas sur la stratégie globale de l'entreprise et ces projets, pourtant important pour son devenir, sont alors quelque peu délaissés. Les projets mettent donc plus de temps à aboutir que dans les grands groupes et lorsqu'ils voient le jour sont parfois sous exploités parce que mal intégrés. En effet, l'intégration d'une nouvelle technologie au sein d'un processus de fabrication existant est loin d'être évident. Selon Abdennebi Talbi, « intégrer c'est établir et renforcer les liens qui peuvent exister entre deux ou plusieurs entités de base afin d'en déduire une et une seule entité qui agrège les entités précédentes et préserve dans son comportement la cohérence intra et inter entités » (Talbi 1997).

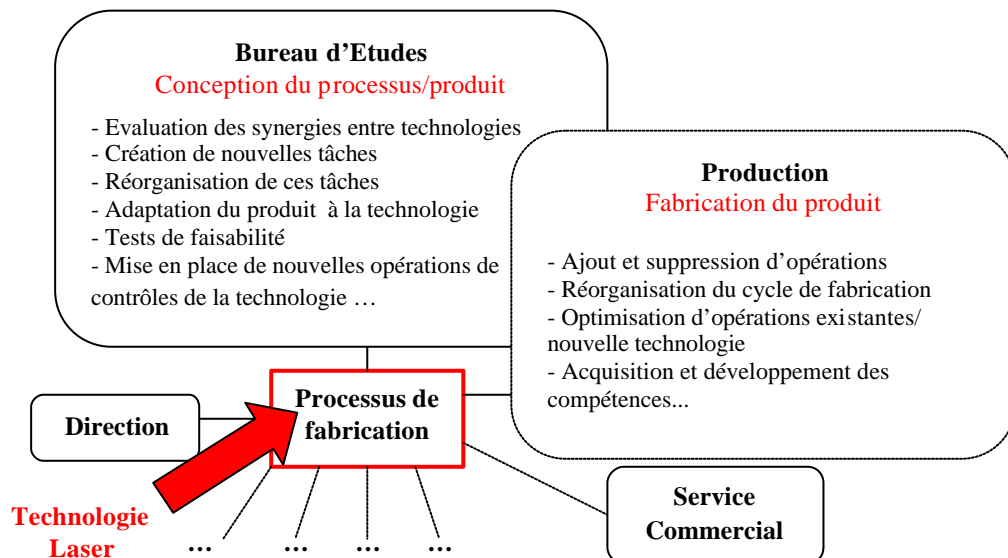


Figure 3. Exemples de conséquences de l'intégration d'une nouvelle technologie de fabrication à travers les différents services d'une PME

Dans notre cas, il faut pouvoir créer une cohérence entre une technologie émergente et un processus de fabrication existant.

Pour élaborer ce processus cohérent, les conséquences de l'intégration doivent être anticipées et résolues avant l'implantation du procédé. Malheureusement, celles-ci sont généralement observées lorsque le projet voit le jour. Il est alors parfois trop tard pour pallier aux diverses incompatibilités, et le retour en arrière est très coûteux. Les problèmes liés à l'intégration de nouvelles technologies proviennent généralement de mise en place de ressources inattendues, d'interactions imprévues entre des détails cachés (Iansiti, 1998). On comprend alors aisément que les procédés développés par des centres de recherche, pour des PME, soient ensuite mis en sous-traitance par des entreprises expertes. Cela évite à l'entreprise d'avoir à gérer une partie du changement technologique. Cependant, dans ce cas, le degré d'appropriation de la technologie reste nul.

La PME désireuse d'élever le degré d'appropriation de cette nouvelle technologie, a pour objectif final de l'intégrer au sein de ses structures. Ceci lui permettant ensuite de développer de nouvelles applications internes et de créer ainsi un autre bassin technologique. Selon Alain Cadix, « la plupart des échecs rencontrés dans l'introduction des nouvelles technologies de l'information vient du fait que les décideurs et les concepteurs des nouveaux systèmes n'ont pas pris en compte les paramètres structurels et sociaux comme les cultures, les croyances et les comportements, les compétences existantes, se limitant le plus souvent à la dimension économique... » (Cadix *et al.*, 2002). Cette phrase peut être adaptée à toutes nouvelles technologies de fabrication. En effet, un procédé innovant ne peut s'incorporer dans un processus existant que si l'entreprise et le produit à réaliser s'y adaptent. L'entreprise et ses structures doivent donc être en cohérence avec cette nouvelle technologie de fabrication pour que les bénéfices de son intégration soient totaux.

La démarche d'intégration mise en place devra être élaborée en cohérence avec les quatre fondements propres à notre étude :

- une technologie de haute précision à fortes connaissances techniques, qui ne sont pas maîtrisées par l'entreprise (bassin technologique différent).
- l'implantation d'un procédé non conventionnel (technologie laser) dans un processus de fabrication existant composé de procédés conventionnels (usinage, électroérosion, forgeage...).
- des enjeux économiques forts : nécessité d'une rentabilité immédiate du procédé (investissement très lourds).
- des enjeux stratégiques important : mise en place du management d'une nouvelle technologie (développement de nouvelles applications), ouverture à de nouvelles parts de marché.

4. Proposition d'une démarche d'intégration

Nous avons montré précédemment la nécessité, pour une PME voulant acquérir une technologie de pointe telle que le laser, de formaliser une démarche

d'intégration afin de limiter les risques d'échecs du projet. L'objectif est donc maintenant de positionner cette démarche dans un projet global d'appropriation d'une nouvelle technologie.

4.1. Positionnement

Comme le dit Pascal Mabire dans sa thèse de doctorat, il est important de prendre son temps dans les phases de lancement d'un projet technologique, pour comprendre la technologie initiale, comprendre son application dans le nouveau secteur d'activité, et enfin comprendre la relation de passage entre les deux (Mabire, 1995). Nous rajouterons qu'il est important de prendre son temps pour visionner et imaginer cette technologie, ce procédé, dans son futur milieu environnant. D'après Marco Iansiti, un processus d'intégration de technologies peut contribuer au management du changement technologique et à la résolution des problèmes associés à l'inertie organisationnelle (Iansiti 1998).

Dans notre contexte, le projet d'appropriation de la technologie sera scindé en deux niveaux parallèles : le niveau projet technique (de la technologie brute à l'application industrielle) et le niveau projet d'intégration (du processus de fabrication existant au futur processus de fabrication). C'est au sein du niveau projet d'intégration que pourra être déclinée notre démarche.

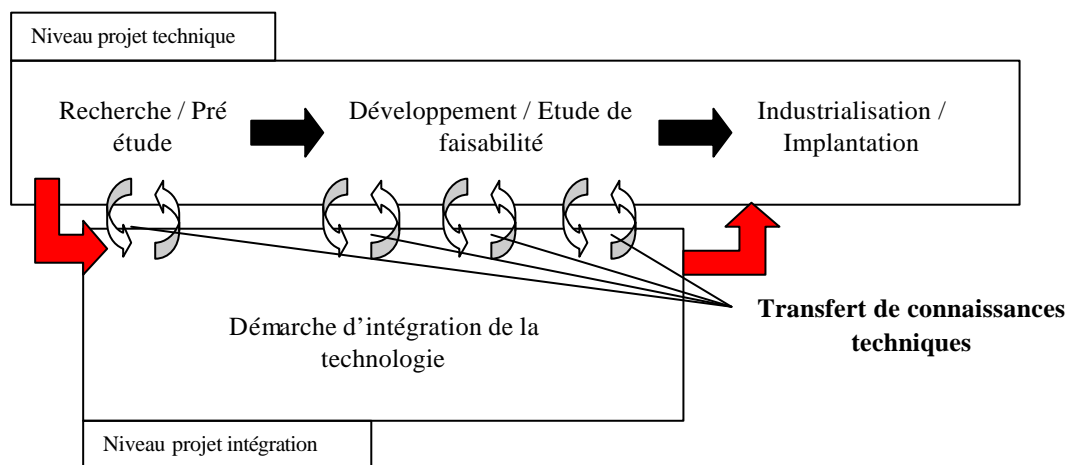


Figure 4. Les deux niveaux du projet d'appropriation de la technologie laser

Ces deux processus sont réalisés en parallèle mais restent toutefois en interaction tout au long du projet. Le niveau projet technique est généralement sous traité par un centre de recherche expert. Or l'intégration est fortement dépendante de la connaissance technique du processus. Un travail collaboratif, entre le centre de

recherche expert et la PME, devra être mis en place pour que la démarche d'intégration puisse être efficace.

4.2. Démarche globale d'intégration :

L'objectif principal de cette démarche est de confronter, le plus tôt possible, les acteurs aux conséquences que pourrait entraîner l'introduction d'une nouvelle technologie de fabrication sur les structures internes de l'entreprise. Elle se scindera en quatre phases principales : Analyse de l'existant, Modélisation du processus de fabrication, Elaboration du nouveau processus de fabrication et Préparation à l'implantation.

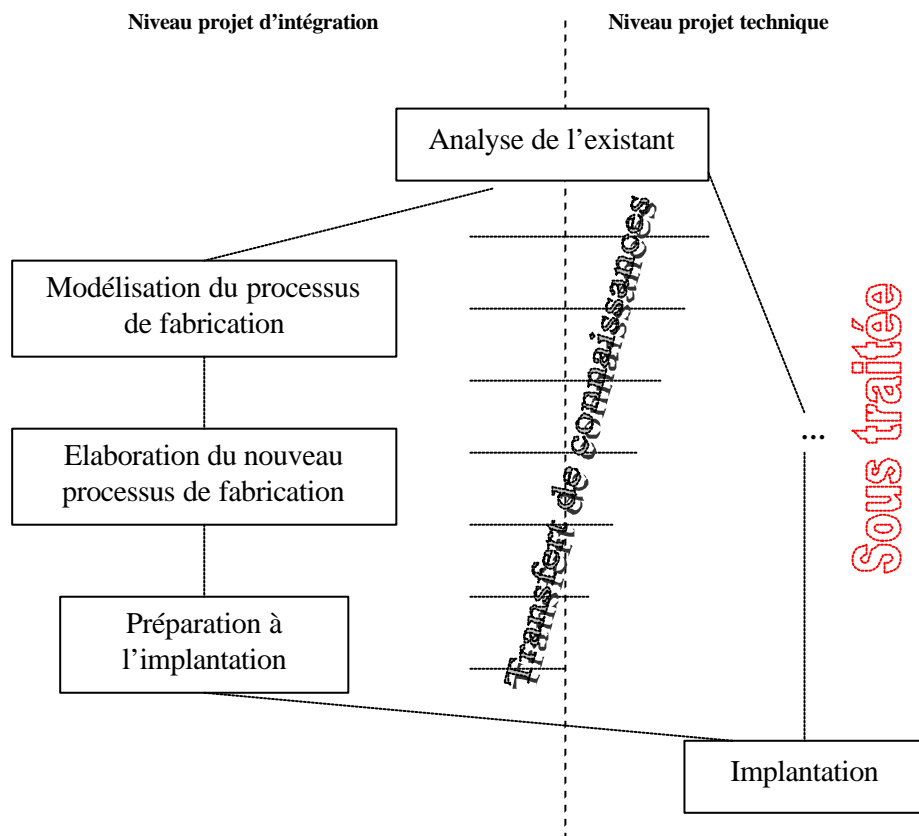


Figure 5. Les quatre phases de la démarche d'intégration de la technologie laser

4.2.1. *Analyse de l'existant*

La phase d'analyse de l'existant est une étape inéluctable et déterminante pour toute démarche d'intégration (Boumane *et al.*, 2001). En effet, pour se rendre sûr que cette opération doit être réalisée notre démarche doit prendre en compte l'état actuel (As-Is) de l'entreprise pour pouvoir en définir son état futur désiré (To-Be). Pour ce faire nous nous appuyerons sur la méthodologie proposée par Abderrazak Boumane utilisant des outils tels que la méthode d'auto diagnostic, le benchmarking et l'analyse organisationnelle (Boumane *et al.*, 2001). Cette étape devrait mettre en relief les forces et les faiblesses de l'entreprise, pour nous permettre ensuite de valider notre objectif stratégique : Intégrer et maîtriser un procédé nous permettant de réduire les coûts et les délais de fabrication. Cette première étape aboutira à un plan stratégique directeur sur l'intégration de la technologie, choisie dans les premières phases du niveau de projet technique.

4.2.2. *Modélisation du processus de fabrication*

Une fois l'analyse de l'existant réalisée, la phase suivante consiste à modéliser le processus de fabrication de l'entreprise dans le but d'avoir aussi bien une vue macroscopique que microscopique de celui-ci. Ce modèle pourra être réalisé à partir d'un outil tel que le SADT. Cette étape vise à obtenir une arborescence organisationnelle et opérationnelle du processus de fabrication existant. Le « dossier processus de fabrication » qui en découlera présentera une fiche signalétique de chacune des opérations de fabrication, le modèle du processus, les ressources et les moyens de production ainsi que les relations avec les autres services de l'entreprise. Ce résultat sera à la base du positionnement de la technologie laser au sein du processus de fabrication de la PME.

4.2.3. *Elaboration d'un nouveau processus de fabrication*

Cette étape est sûrement la plus longue de la démarche d'intégration mais aussi la plus importante. Elle se déclinera en plusieurs sous phases : Identification et analyse des impacts, Modélisation du nouveau processus de fabrication, Elaboration du « dossier d'intégration ».

L'étape d'identification et d'analyse des impacts consiste à confronter, le plus tôt possible, les acteurs aux conséquences que pourrait entraîner l'introduction d'une nouvelle technologie de fabrication sur les structures internes de l'entreprise. Elle devra être réalisée avec le plus d'objectivité possible, car elle conditionnera la suite et la réussite du projet. Nous pourrions la décliner en cinq parties qui correspondent à la nature des impacts que pourraient engendrer l'intégration : Impacts technologiques (technologie classique/ technologie laser), Impacts produit, Impacts organisationnels, Impacts stratégiques, Impacts culturels.

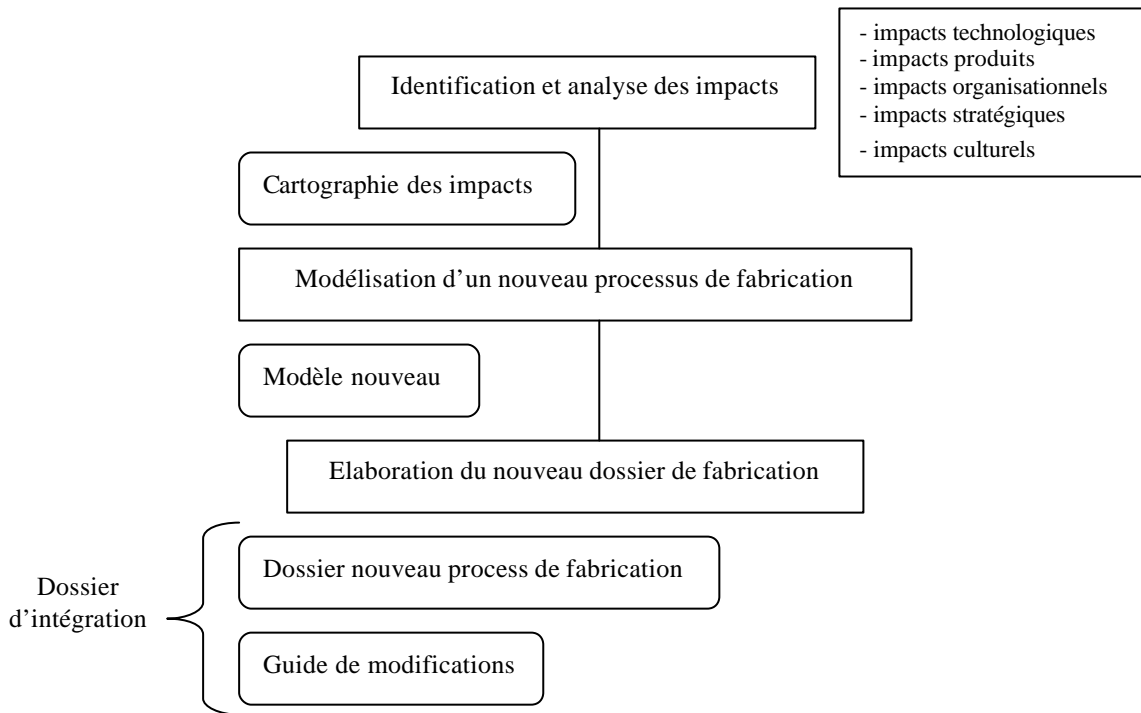


Figure 6. Arborescence de la phase d'Elaboration d'un nouveau processus de fabrication

Dans notre contexte, l'analyse des impacts technologiques devra être soumise à une attention toute particulière. En effet, elle permettra de statuer sur la possibilité de faire cohabiter dans un processus de fabrication une technologie « émergente » et des technologies « classiques ». Elle consistera donc en l'évaluation des synergies entre des technologies conventionnelles, telles que l'électroérosion, l'usinage ou l'attaque chimique (processus de fabrication existant) et des technologies émergentes telles que les procédés laser. Cependant les analyses des autres impacts ne devront pas être pour autant négligées. Cette sous phase devrait donner lieu à l'élaboration d'une cartographie réunissant tous les impacts identifiés. L'analyse de ces impacts sera à la base de l'élaboration d'un « guide de modifications » dans la dernière sous phase.

La seconde sous phase consiste à construire puis modéliser le nouveau processus de fabrication de l'entreprise. Celui-ci sera réalisé à partir du modèle existant élaboré précédemment ainsi que la cartographie des impacts.

Ce travail nous permettra de construire un nouveau dossier de fabrication ainsi qu'un « guide de modifications ». Ce dernier énumèrera les changements nécessaires à la bonne intégration de la technologie.

4.2.4. Préparation à l'implantation

Cette phase consiste tout simplement à suivre les recommandations du « guide de modifications » qui se déclinera suivant la nature des changements (techniques, opérationnels, produit, organisationnels, stratégiques, culturels...). Par exemple, mettre en place les nouvelles opérations qu'implique l'intégration de la technologie laser : de nouveaux contrôles qualité, une traçabilité des nouveaux produits... Mais aussi réadapter les structures au nouveau processus, élaborer des plans de formation pour les principaux acteurs, modifier le produit par rapport au futur processus de fabrication (re-conception « Produit/Process »), affirmer de nouvelles stratégies (stratégies d'entreprise, stratégie marketing) ou encore rendre compatible la nouvelle technologie/culture de l'entreprise.

Cette phase est aussi l'étape permettant de mettre en place une nouvelle structure pour manager ce nouveau procédé laser : trouver de nouvelles applications internes à l'entreprise.

5. Conclusion et perspectives

Nous avons pu constater dans cette étude que la technologie laser est difficilement maîtrisable pour des sociétés dont le bassin technologique est basé sur d'autres sciences. Il est donc important d'aider les acteurs de ce type de projet à pouvoir intégrer ces nouvelles technologies en anticipant leurs effets négatifs sur les structures existantes de l'entreprise. La structuration méthodique d'une démarche d'intégration est nécessaire pour optimiser la réussite d'un tel projet mais aussi augmenter le degré d'appropriation de la technologie. En effet, cette formalisation ouvrira la voie à la capitalisation des savoirs et savoirs faire ; et ainsi permettra d'établir de véritables fondations pour la création d'un nouveau bassin technologique (développement de nouvelles applications internes).

L'apport d'une telle démarche sera d'autant plus positive, si le choix des outils de modélisation des processus et d'évaluation des impacts sont cohérent avec les critères propres au procédé laser : une technologie peu flexible, de très fortes incertitudes techniques, des enjeux stratégiques et économiques forts. Le formalisme de modélisation du processus de fabrication et d'évaluation des différents impacts conditionnera donc la réussite du projet. Nous travaillons, actuellement, sur le choix et l'élaboration d'outils répondant le mieux à nos besoins.

6. Bibliographie

Bernard A., Taillandier G., *Le Prototypage rapide*, Edition HERMES, 1998.

Boumane A., Talbi A., Hammouche A., Tahon C., *Proposition d'une méthodologie de conduite d'une analyse de l'existant dans le cadre d'une démarche globale d'intégration des fonctions de l'entreprise*, Colloque CPI, du 24 au 26 octobre 2001 à Fès.

Cadix A., Pointet J.M., *Le management à l'épreuve des changements technologiques. Impacts sur la société et les organisations*, Editions d'Organisation, série Stratégie-Organisation, 2002.

Curinckx L., Delporte S., Les lasers de découpe, janvier 1999.
<http://perso.wanadoo.fr/delporte/travaux/decoupe.htm>

Iansiti M., *Technological integration: Making critical choices in a turbulent world*, Harvard Business School Press, 1998.

Mabire P., L'analyse de la valeur dans le transfert de technologie : Application au développement d'un système de maintenance de réseaux d'assainissement, Thèse de doctorat, Laboratoire CPI, ENSAM Paris, 1995.

Pollet F., *Les nouveaux atouts des lasers pompés par diodes*, Le journal de la production, n°46, Février/Mars, pp 20-21, 2003.

Ribault J.M., Martinet B., Lebidois D., *Le management des technologies*, Les Editions d'Organisation.

Roulet N., Dubois P., *Evolutions dans le domaine de la fabrication rapide de pièces métalliques : de nouvelles voies d'investigation*, 9^{ème} Colloque CONFERE à Nancy, les 4 et 5 juillet 2002.

Scherer M., Le Toullec M., Guézel JC., *Le laser se surpasse*, Industrie et Technologies, n°848, mai 2003, p. 46- 60.

Steen W., *Laser Material Processing*, Edition Springer, Seconde édition, 1998.

Talbi A., Hammouche A., Tahon C., *Stratégie et modèle d'intégration des fonctions production et maintenance*, 2^{ème} Colloque National de Productique de Casablanca, le 13 et 14 Nov. 1997.