

Contexte, état de l'art et objectifs

L'objectif de ce chapitre est dans un premier temps de faire un état de l'art des principales technologies de mise en oeuvre des matériaux composites hautes performances, ainsi que de présenter le contexte général dans lequel s'intègre ce travail de thèse. Dans un second temps, les objectifs du projet MATTE vis-à-vis des attentes des industriels est exprimé. Enfin, le déroulement général du travail de thèse est introduit.

Sommaire

1.1	Contexte et objectifs	8
1.1.1	Contexte industriel	8
1.1.2	Contexte législatif	9
1.1.3	Les procédés actuels de mise en oeuvre des composites	10
1.1.4	Technologies Heat & Cool actuelles	13
1.2	Objectifs industriels et objectifs MATTE	17
1.2.1	Travaux de recherche actuels	17
1.2.2	Le projet MATTE	20
1.3	Déroulement des travaux de recherche	24
1.3.1	Présentation des partenaires	24
1.3.2	Démarche de recherche	24

1.1 Contexte et objectifs

1.1.1 Contexte industriel

Le marché des composites en France et dans le monde est réparti entre différents secteurs d'activités tel que : le transport, le bâtiment, l'énergie, l'aéronautique, ... Le transport étant un acteur majeur dans les rejets de gaz à effet de serre, un effort a été porté afin d'intégrer des matériaux plastiques et composites aux produits dans un but d'allègement et donc de réduction des consommations. L'automobile est le premier secteur de consommation des composites en volume, alors que l'aéronautique est le premier secteur en valeur. Le groupe Airbus par exemple, intègre de plus en plus de matériaux composites dans ses structures, passant de 5% en masse en 1985 avec l'A310-300, à 25% en 2007 avec l'A380-800 et enfin 53% avec l'A350XWB [Thévenin2015]. Ce recours aux matériaux composites a permis au groupe Airbus l'amélioration de ses avions en terme de masse, résistance à la fatigue... et la réduction des coûts de maintenance [Thévenin2015]. Par ailleurs, les prévisions prévoient une forte croissance de la demande en matériaux composites pour les années à venir du fait de l'augmentation du nombre de passagers dans le monde et du remplacement des avions anciens. Le groupe Airbus anticipe ainsi une croissance du secteur de 4 à 5% par an jusqu'à 2031. La Figure 1.1 présente les prévisions réalisées par Airbus concernant les nouveaux avions d'ici 20 ans.

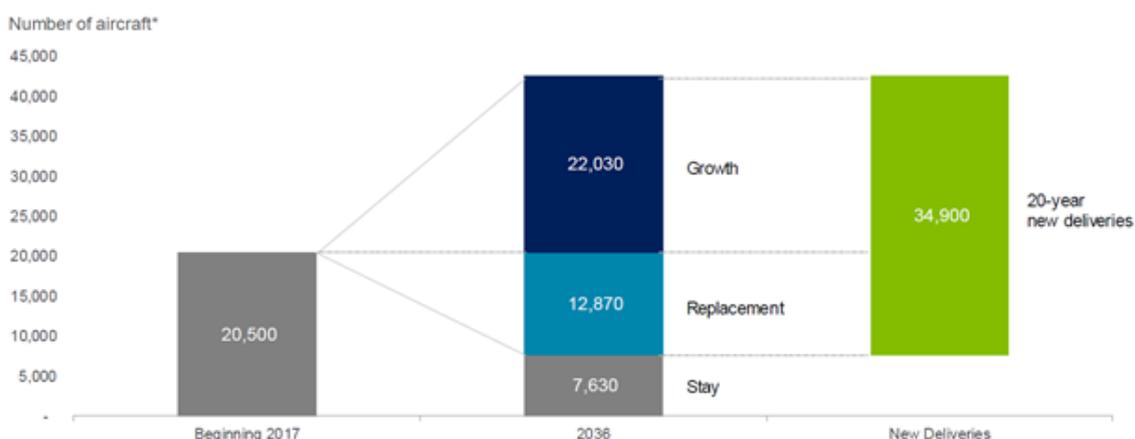


Figure 1.1 – Prévisions nouveaux avions [Leahy2017]

Le secteur automobile s'avère être quant à lui un marché d'avenir pour les matériaux composites. En effet, depuis les années 85, la masse moyenne des véhicules automobiles est en constante augmentation, passant de 900kg en 1985 à 1300kg en 2011 pour les véhicules PSA [David2013]. Cela s'explique par une intégration toujours plus importante de systèmes de sécurité, d'accessoires de confort, d'équipements et de l'augmentation des dimensions des véhicules. Cependant, le contexte réglementaire mondial imposant des réductions importantes des émissions de gaz à effet de serre, le secteur automobile tend à la réduction des masses des véhicules. Comme le montre la Figure 1.2, un des leviers principaux permettant cette réduction de masse est le changement de matériaux, comme par exemple le remplacement de structures acier par des structures aluminium ou en matériaux composites possédant une meilleure rigidité spécifique. Actuellement, en dehors de quelques voitures de luxe ou de sport (TESLA, McLaren MP4 12C, Alpha 4C) [Elend2016], l'utilisation actuelle des matériaux plastiques et composites dans l'automobile se limitent essentiellement à des pièces non-structurelles s'expliquant en partie par les procédés de mise en œuvre non adaptés aux cadences de l'industrie automobile (problématique de robustesse et de simulation des procédés par exemple). Cependant, à l'image de l'industrialisation de la BMW i3 [Elend2016], une évolution du marché automobile est en cours dans le but d'intégrer de manière croissante des

pièces composites structurelles et ce, de manière automatisée dans le but de rendre ce type de matériaux compétitifs vis-à-vis des structures conventionnelles telles que les structures aciers.

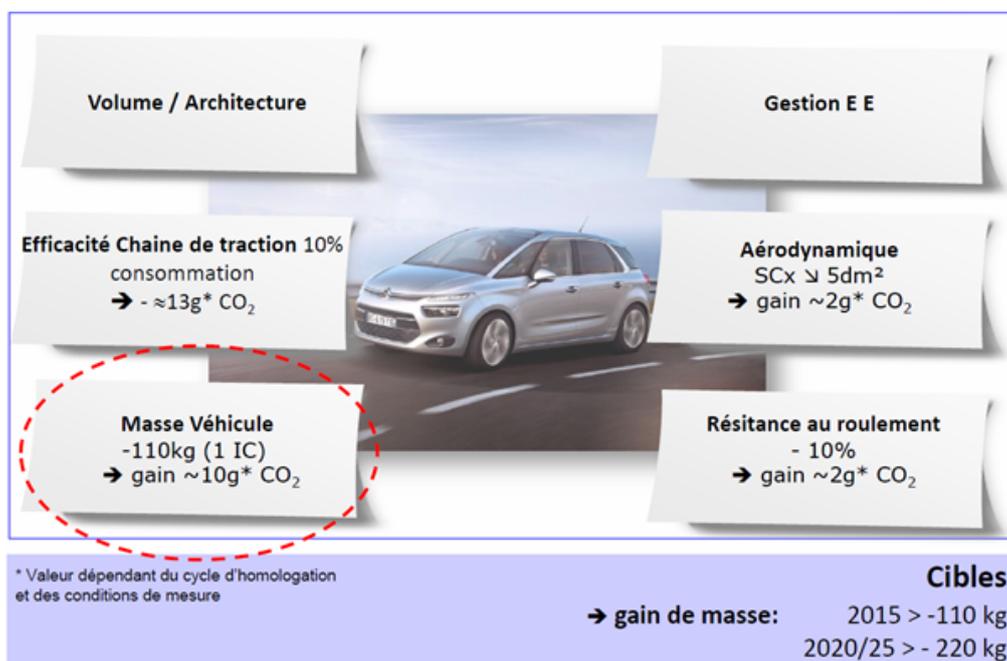


Figure 1.2 – Principaux leviers pour la réduction du CO₂ dans l'automobile [Leahy2017]

Les enjeux pour le secteur des matériaux composites sont donc de pouvoir répondre aux besoins croissants de composites hautes performances pour le secteur aéronautique et également de développer des matériaux et procédés permettant de garantir la mise en œuvre haute cadence de pièces automobiles structurelles. Il est important de noter que la réponse apportée à ces problématiques pourra être étendue à d'autres secteurs tels que le sport et loisirs, le domaine de la construction...

1.1.2 Contexte législatif

Au cours des années, la consommation énergétique mondiale n'a cessé de croître, passant de 4661 millions de tonnes équivalentes de pétrole en 1973 à 9425 millions de tonnes équivalentes de pétrole en 2014 [International Energy Agency2016]. Le pétrole représente à lui seul près de la moitié de la consommation mondiale d'énergie, dont 65% utilisé pour le secteur du transport. De plus, face au développement économique croissant, le secteur du transport a vu sa consommation doubler entre 1971 et 2014. L'évolution de la consommation du pétrole par secteur est présentée Figure 1.3.

Afin de limiter en partie l'impact de l'Homme sur l'environnement, les réglementations mondiales dans le domaine du transport tendent à réduire les rejets de gaz à effet de serre. Ainsi, dans le domaine de l'automobile, il apparaît une convergence mondiale des objectifs de réduction de rejet de CO₂, pour passer de 180g de CO₂/kg en moyenne en 2008 à 100g de CO₂/kg en moyenne en 2020. L'Union Européenne s'avère être leader dans ce domaine via une législation contraignante pour les constructeurs et les clients [UE Commission2012, UE Commission2016]. Ainsi, les constructeurs possèdent un règlement strict concernant les rejets de CO₂ de leurs véhicules, à respecter sous peine de pénalités financières. Les clients quant à eux voient leur achat de véhicule crédité d'un bonus ou d'un malus financier en fonction des émissions de l'automobile.

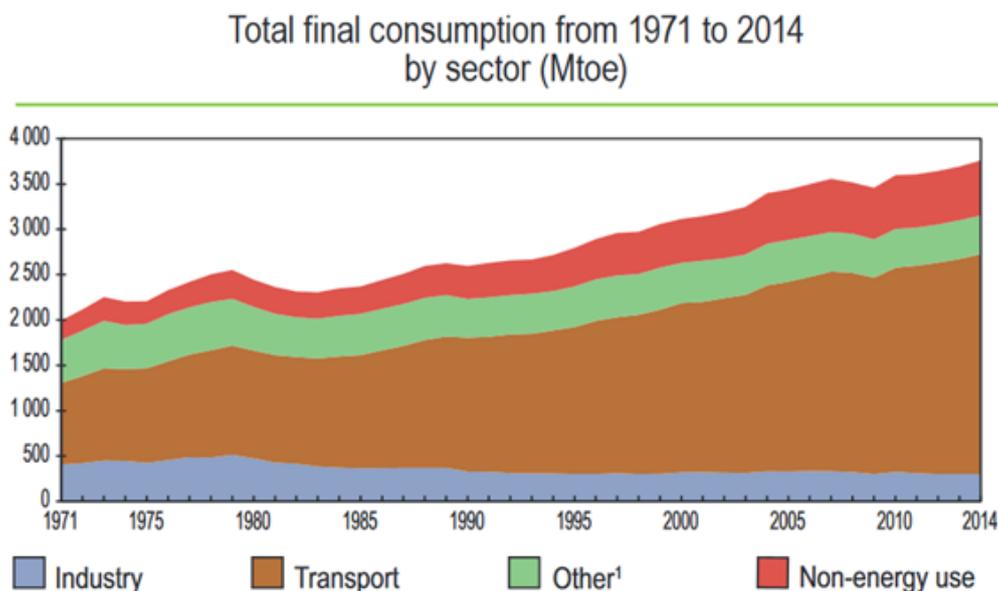


Figure 1.3 – Consommation de Pétrole [International Energy Agency2016]

L'industrie aéronautique est également concernée par la mise en place de réglementation des émissions de gaz à effet de serre. Ainsi en 2017, l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale a mis en place une nouvelle norme pour réduire l'incidence des émissions de gaz à effet de serre produit par les aéronefs sur le climat mondial. Cette norme qui entrera en vigueur en 2020 imposera aux constructeurs d'aéronefs l'achat de crédits de compensation des émissions de CO_2 supérieures au niveau des émissions de l'année 2020 [Internationale2017].

Dans ce contexte mondial d'augmentation de la consommation énergétique et de législations visant à réduire les rejets de gaz à effet de serre, les secteurs aéronautique et automobile développent et intègrent de plus en plus de structures en matériaux composites. Les composites rendent possible le remplacement de structures massives acier par des structures allégées mais aux propriétés identiques et leur bilan carbone massique est somme toute aussi intéressant face aux matériaux traditionnels.

1.1.3 Les procédés actuels de mise en oeuvre des composites

Les procédés actuels de mise en oeuvre des matériaux composites peuvent être classés en deux catégories : procédés grande diffusion et procédés hautes performances. Il apparaît qu'avec les procédés actuels de mise en oeuvre, les performances finales du composite et la cadence de production sont deux paramètres antagonistes, Figure 1.4.

Le procédé de mise en oeuvre des composites hautes performances de référence dans l'aéronautique est l'autoclave, dont le schéma de principe est présenté Figure 1.5. L'autoclave est une enceinte sous pression thermorégulée qui permet une polymérisation optimale du stratifié composite issu du drapage de préimprégnés à l'aide d'un contrôle précis de la pression dans l'enceinte, du vide dans l'outillage.

Le procédé de mise en oeuvre des composites à haute cadence de référence dans l'automobile est la compression des compounds par SMC/BMC tel que présenté Figure 1.5. Le compound est un semi-produit constitué d'un renfort et d'une matrice pré-mélangés et prêts pour la mise en

forme [Marzano2014, Jacquinet2001]. Les principales caractéristiques de ces deux procédés de mise en œuvre sont présentées Tableau 1.1.

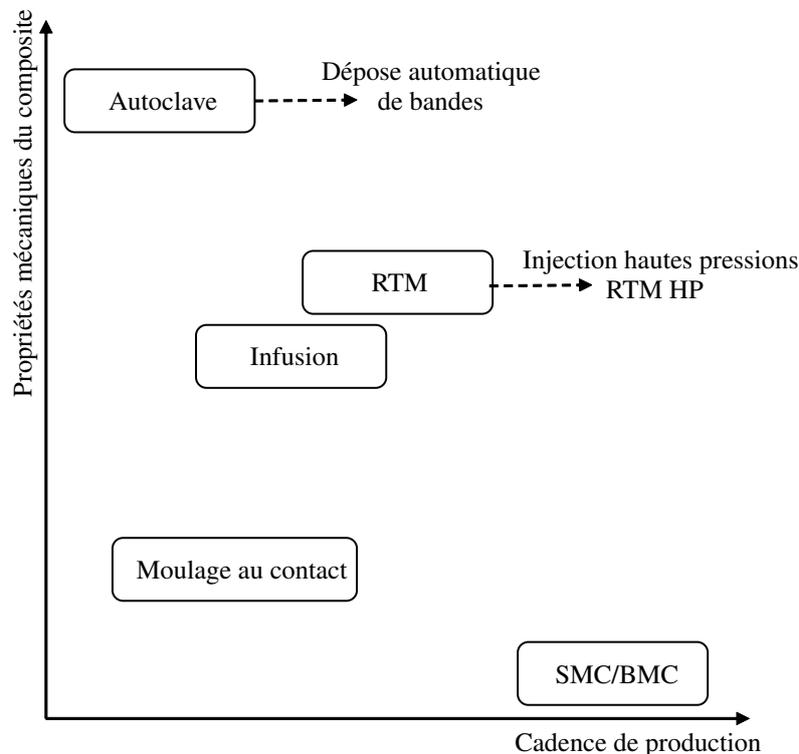


Figure 1.4 – Comparaison des procédés de mise en œuvre des matériaux composites

Le RTM (Resin Transfer Molding), présenté Figure 1.5, est quant à lui un procédé intermédiaire au SMC/BMC et à l'autoclave en terme de qualité-cadence [Boinot1991]. Les renforts, sous forme de mats ou tissus, sont placés entre un moule et un contre moule rigides et régulés thermiquement, dans lesquels une résine de faible viscosité est injectée sous 1 à 4 bars. Le démoulage est effectué une fois la réticulation terminée. Ce procédé garantit une bonne reproductibilité et permet l'obtention de pièces composites présentant peu de porosité, ayant deux faces lisses et possédant de bonnes propriétés mécaniques et géométriques. Le RTM est ainsi bien adapté pour la réalisation de pièces de moyennes séries et est utilisé dans les secteurs aéronautiques, automobiles, sport et loisirs ... Les développements actuellement menés sur les résines thermodurcissables et thermoplastiques ouvrent la voie à la transformation rapide des matériaux composites par ce type de procédé de mise en œuvre. Cette augmentation des cadences, tout en préservant la qualité structurale et géométrique de la pièce moulée, passe par le développement de résines thermoplastiques (TP) réactives in-situ et d'outillages réactifs thermiquement couramment appelés outillages Heat & Cool. Le RTM traditionnel pour composites thermodurcissables (TD) se fait avec des outillages en quasi-isotherme et le cycle de fabrication est ici piloté par la réactivité du système résine. Pour les résines TP, qui présentent plusieurs intérêts par rapport aux résines TD pour de nombreux marchés, les outillages devront permettre le cyclage thermique rapide, tout en garantissant une bonne homogénéité. Les principaux avantages et inconvénients du RTM sont également présentés Tableau 1.1.

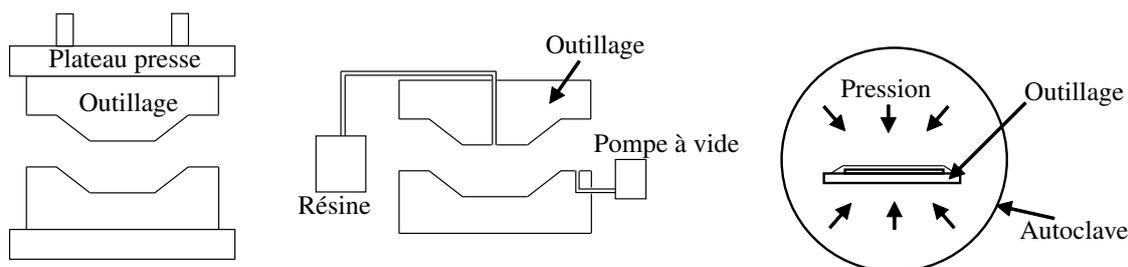


Figure 1.5 – Schéma de principe SMC-BMC (gauche), RTM (centre) et Autoclave (droite)

Procédés	Avantages	Inconvénients
SMC-BMC	<ul style="list-style-type: none"> Cadence élevée > 10000 pièces/an Géométries à formes complexes Fort compactage (50 à 100 bars) Composites à deux faces lisses 	<ul style="list-style-type: none"> Dimensions limitées à la taille de la presse Propriétés mécaniques moyennes (Vf de 15 à 35%) Coûts d'investissement
RTM	<ul style="list-style-type: none"> Bonnes propriétés mécaniques Cadence moyennes séries jusqu'à 5000 pièces/an Main d'oeuvre peu qualifiée 	<ul style="list-style-type: none"> Coûts d'investissement Cyclage thermique rapide impossible
Autoclave	<ul style="list-style-type: none"> Taux de renfort (Vf) de 60 à 80% Propriétés mécaniques élevées Dimensions technologiquement illimitées Tous types de géométries de pièces 	<ul style="list-style-type: none"> Cadence faible < 1000 pièces/an Coûts d'investissement Main d'oeuvre qualifiée

Tableau 1.1 – Caractéristiques SMC-BMC, RTM et Autoclave

Les procédés utilisés pour transformer les matériaux composites, notamment pour la mise en œuvre des composites hautes performances, ne sont pas compétitifs en terme de coût-cadence-performance vis-à-vis des matériaux et procédés usuels (métaux et alliages). En effet, aujourd'hui pour palier à la faible réactivité thermique des outillages, l'augmentation des cadences de production passe par la multiplication des postes de mise en œuvre, provoquant des coûts de production importants en terme de matériels et de main d'œuvre. Afin de répondre aux besoins à venir des industriels, il est impératif de rendre les lignes de production des composites compétitives pour permettre la mise en œuvre de structures hautes performances, à cadence importante et à coûts maîtrisés. Comme représenté en pointillés Figure 1.4, des développements et des solutions technologiques émergent quant à l'automatisation des lignes de production avec par exemple la dépose automatique par des robots de fibres sur les outillages [Kozaczuk2016] et le développement de lignes RTM hautes pressions et hautes cadences [Geiger2011, James2014, SFIP2016]. Ce contrôle du trio qualité-cadence-coût passe également par une maîtrise efficace des procédés de mise en œuvre, notamment en terme de performances liées à l'outillage : vitesse de chauffe et de refroidissement, homogénéité thermique, tenue mécanique et consommation énergétique.

1.1.4 Technologies Heat & Cool actuelles

Les technologies d'outillages et de mise en œuvre Heat & Cool sont des technologies permettant de réaliser la chauffe et le refroidissement de manière maîtrisée. Comme cela a déjà été étudié [Shayfull2014, Wang2014, long Wang2014], les phases de chauffe et de refroidissement de l'outillage peuvent être effectuées à l'aide de différentes technologies présentées. Un tableau comparatif de ces différentes technologies est présenté Tableau 1.2.

Les phénomènes de transferts thermiques en jeu sont :

- La conduction : qui est un mode de transfert thermique sans déplacement de matière et se déroulant essentiellement dans les solides ;
- La convection : qui est un mode de transfert thermique avec déplacement de matière et se déroulant essentiellement entre deux fluides ou entre un solide et un fluide ;
- Le rayonnement : qui est un mode de transfert thermique par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques et ne nécessitant pas de matière.

Technologies	Phénomènes transferts	Avantages	Inconvénients
Electrique Fils Films Cartouches	Conduction	Vitesses de chauffe élevées	Puissance crête élevée Intégration CAO Chauffe locale Pas de froid Encombrement
Induction	Conduction	Vitesses de chauffe élevées	Aciers spécifiques Puissance crête élevée Conception complexe Investissements élevés Pas de froid
Infrarouge	Rayonnement	Chauffe sans contact Chauffe directe du solide Efficacité élevée Température d'utilisation élevée Temps de réponse rapide	Rayonnement non-visible Puissance crête élevée Pas de froid Uniquement moule ouvert
Fluide Huile	Convection Conduction	Solution robuste Homogénéité thermique Température d'utilisation élevée Possibilité chaud/froid	Échange thermique faible Réticence secteur aéronautique
Fluide Eau	Convection Conduction	Solution robuste Possibilité chaud/froid Echange thermique élevé	Corrosion Température limitée à 200°C
Fluide Vapeur	Convection Conduction	Echange thermique optimal Possibilité chaud/froid	Température limitée à 200°C
Bain d'huile	Convection Conduction	Homogénéité thermique Pression de compactage	Forte inertie thermique Vitesse limitée Enceinte sous pression Investissement huile

Tableau 1.2 – Comparatif des technologies de chauffe d'outillages

Les principales technologies actuelles de mise en œuvre des composites par un système Heat & Cool sont présentées Tableau 1.3 et illustrées Figure 1.6.

	Avantages	Inconvénients
Roctool «Chauffe d'outillage métallique par induction» [Feigenblum2012]	Vitesses H & C très importante $\approx 20^{\circ}\text{C/s}$ Energie consommée faible	Analyse multi-physiques Puissance élevée : jusqu'à 500kW Géométries type 2D Investissements importants
Arrk Tooling Sermo « Outillage multi-matériaux thermorégulé » [INPI2010]	Découplage fonctions thermique et mécanique Masse à chauffer plus faible	Canaux de chauffe usinés dans de la résine : température et robustesse limitées Aucune gestion des dilatations thermiques différentielles
Quickstep « Chauffe d'outillage dans un bain de fluide sous pression » [Quickstep2015]	Très bonne homogénéité thermique	Structure sous pression (fluide à 1 à 2 bars) Vitesses H & C faibles ($<5^{\circ}\text{C/min}$)
TechniModul « Outillage composite thermorégulé » [INPI2014]	Mise en œuvre 3D aisée Peu de masse à chauffer Faibles investissements	Vitesses H & C faibles ($<5^{\circ}\text{C/min}$) Limité en température ($<200^{\circ}\text{C}$) Faible longévité outillage

Tableau 1.3 – Principales technologies Heat & Cool

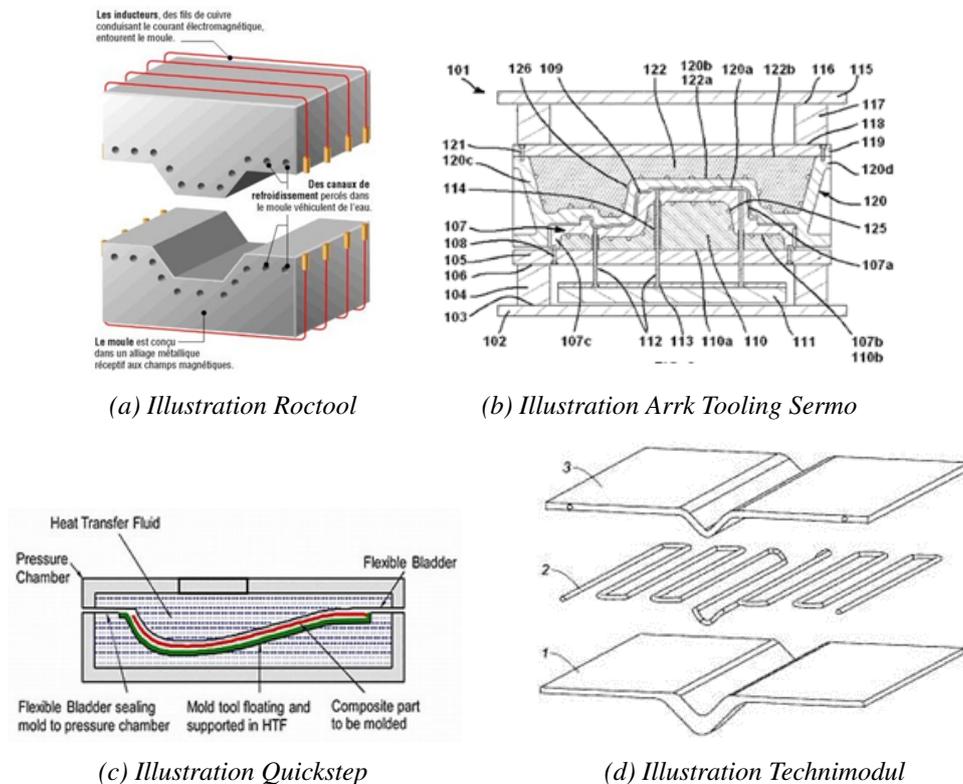


Figure 1.6 – Principales technologies Heat & Cool

Ces différentes technologies Heat & Cool de mise en œuvre des matériaux composites présentent des intérêts différents : réduction du temps de chauffe (Roctool), faibles investissements (TechniModul), séparation des fonctions thermique et mécanique pour limiter la masse à chauffer (Arrk Tooling Sermo), maîtrise de l'homogénéité thermique (Quickstep). Cependant, chacune de ces technologies présentent des contraintes fortes pouvant être problématiques pour les besoins à venir des industries aéronautique et automobile : géométries limitées à du 2D (Roctool), fluide sous pression (Quickstep), vitesses et températures d'utilisation limitées (TechniModul).

L'objectif de ces travaux de thèse consiste au développement d'un outillage novateur pour la mise en œuvre des matériaux composites hautes performances reposant sur la synergie et la combinaison des avantages des solutions actuelles existantes. Comme présenté Figure 1.7 et comme cela sera présenté dans la suite de ce rapport, le concept d'outillage MATTE (Moule Autonome à Transfert Thermique Efficient) repose sur le découplage des fonctions thermiques et mécaniques par l'utilisation (i) d'une structure métallique mince pour la mise en forme et la cuisson du composite, (ii) d'un isolant rigide et d'un caisson externe pour la reprise des efforts mécaniques.

	Outillage conventionnel	Concept MATTE
Nature	Massif	Faible inertie thermique
Type de canaux	Canaux droits à section circulaire	Canaux conformables à section rectangulaire
H & C	Généralement dans des canaux différents	Avec le même canal
Fabrication	Usinage d'un bloc d'acier	Mise en forme et assemblage multi-matériaux

Tableau 1.4 – Principales technologies Heat & Cool

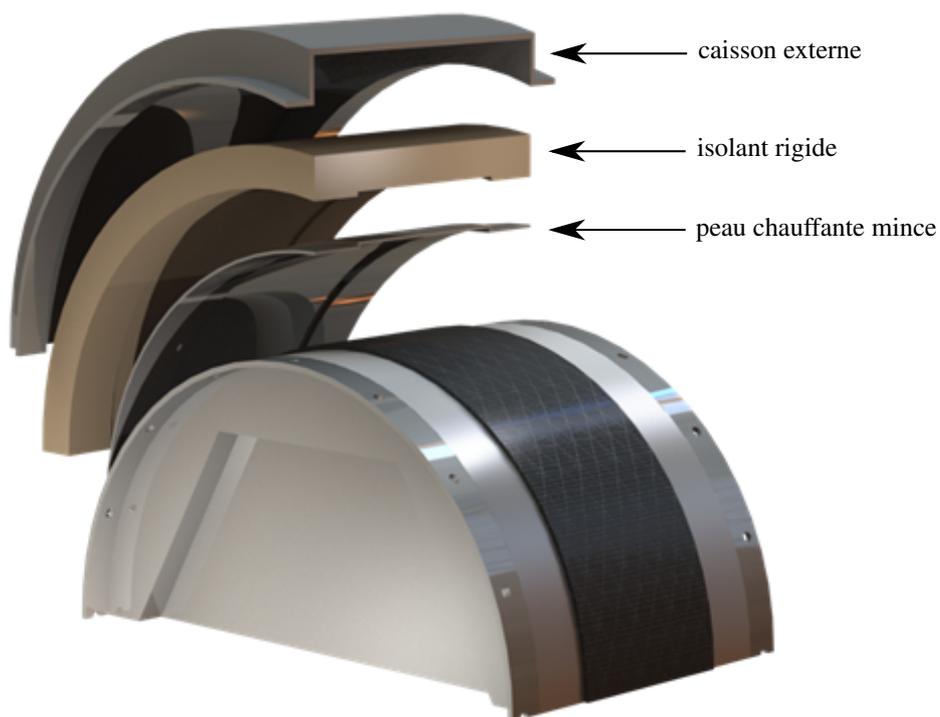


Figure 1.7 – Illustration du principe d'outillage MATTE

Les différences majeures entre un outillage conventionnel et MATTE sont présentées Tableau 1.4. Ainsi, la mise en place d'une structure à très faible inertie thermique nécessite le développement d'outils de calculs à la fiabilité et à la prédictivité accrue concernant les phénomènes de transferts thermiques.

1.2 Objectifs industriels et objectifs MATTE

1.2.1 Travaux de recherche actuels

Dans le but de rendre le composite compétitif en augmentant les cadences de production des stratifiés hautes performances, différents travaux de recherche et développements sont actuellement menés sur les étapes successives de mise en œuvre : réalisation des préformes, résines réactives et résines thermoplastiques, système d'injection automatisé et outillages. Les principaux projets de recherche pour la mise en œuvre des composites à destination du secteur automobile sont présentés Figure 1.8 [Liraut2014], tandis que les principaux domaines d'études associés sont présentés Figure 1.9 [Liraut2014].

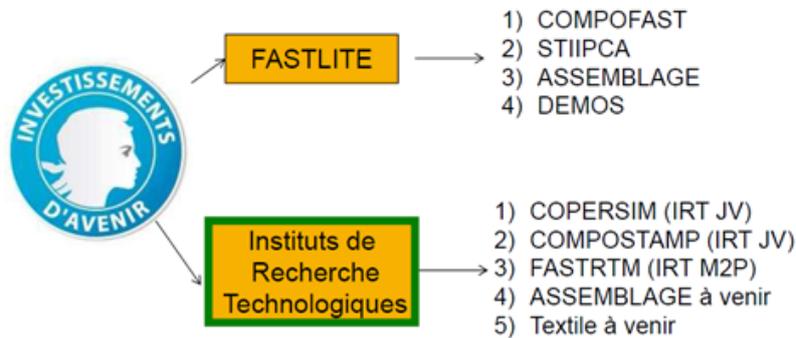


Figure 1.8 – Principaux travaux de recherche pour la mise en œuvre des composites [Liraut2014]

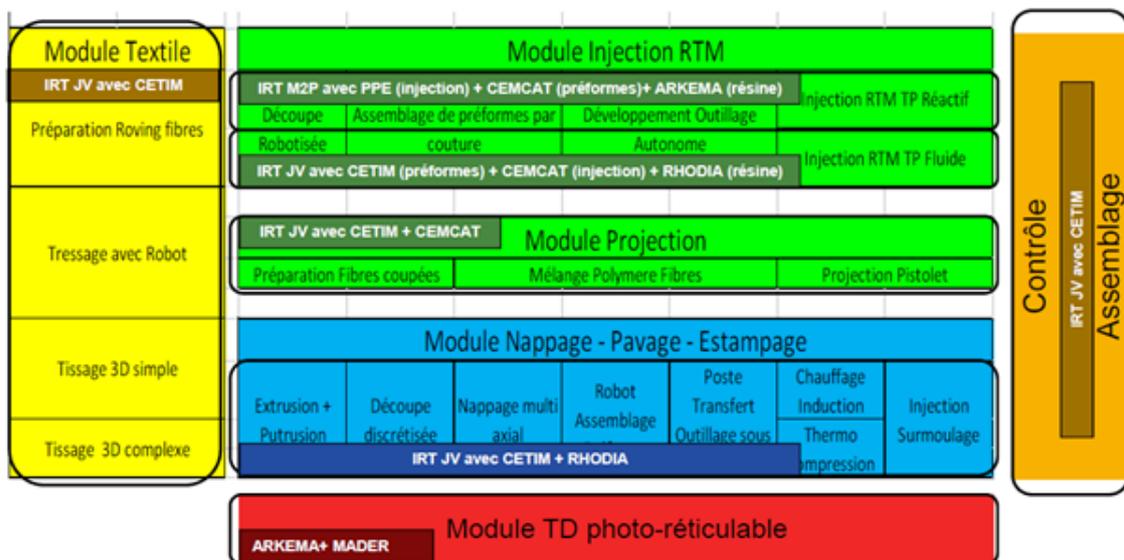


Figure 1.9 – Domaines de recherche et principaux acteurs [Liraut2014]

D'autres travaux de recherche sont également menés sur ces thèmes, comme par exemple le développement de moyens et de procédés pour la réalisation de préformes à destination de l'industrie automobile dans le cadre du projet FAST FORM. Le projet mené par l'IRT M2P en collaboration avec 14 industriels (Arkema, Chomarar, Compose Group, Coriolis, ESI, Faurecia, Hexion, Hutchinson, Institut de soudure, Owens Corning, PEI, PSA, Renault, SISE) a pour objectif de développer un procédé permettant la réalisation de préformes sèches pour des pièces structurales de grandes dimensions et avec un temps de cycle inférieur à 2 minutes [M2P2016, SFIP2016].

D'autre part, des travaux sont à ce jour menés par les fabricants de résines thermodurcissables et thermoplastiques afin d'accroître la réactivité de la polymérisation dans le but de réduire les temps de mise en œuvre des stratifiés composites. En effet, les résines utilisées actuellement sont majoritairement des résines thermodurcissables et les temps de polymérisation associés sont de quelques dizaines de minutes à quelques heures. Par exemple, la résine RTM6 dédiée à l'injection RTM est couramment utilisée dans l'industrie aéronautique nécessite un temps de cycle de 120 minutes à 180°C. Dans cette optique, Arkema a par exemple récemment débuté la commercialisation d'une nouvelle résine thermoplastique, la résine Elium, aux propriétés similaires à une résine époxy et permettant d'atteindre des cadences de production de 100 pièces par jour en RTM [Arkema2016c].

Par ailleurs, des développements sont également à l'étude afin d'automatiser les lignes de production RTM dans le but de favoriser l'industrialisation des matériaux composites hautes performances. Le projet FAST RTM par exemple, porté par l'IRT M2P et 10 industriels (Arkema, Chomarat, Compose Group, Faurecia, Hexion, Hutchinson, Institut de soudure, Renault, SISE), vise à développer de nouveaux équipements pour la production de pièces structurales de grandes dimensions pour les industriels de l'automobile et de l'aéronautique, tout en réduisant le temps de cycle, notamment par le biais du procédé C-RTM (Compression – Resin Transfer Molding) [M2P2016, SFIP2016]. Le groupe Compose a pour sa part développé une ligne de production RTM automatisée : FlexCell. Cette cellule flexible de production, présentée Figure 1.10, permet une injection automatique mono ou bi-composants et le changement rapide d'outillage grâce à une connectique universelle au niveau de la buse d'injection.

Les recherches menées sur la réalisation des préformes composites, sur les résines thermodurcissables et thermoplastiques réactives, ainsi que sur les lignes de production permettent d'espérer des cadences de mise en œuvre pour les matériaux composites hautes performances. Afin d'atteindre des temps de cycle de l'ordre de quelques minutes (voir 1 à 2 minutes pour les cadences automobile), il apparaît nécessaire de développer un nouveau type d'outillage, qui puisse réaliser un cyclage thermique efficace (rapide et de manière homogène dans la structure) afin de transformer le composite dans des conditions optimales et donc de garantir une bonne qualité et santé matière.

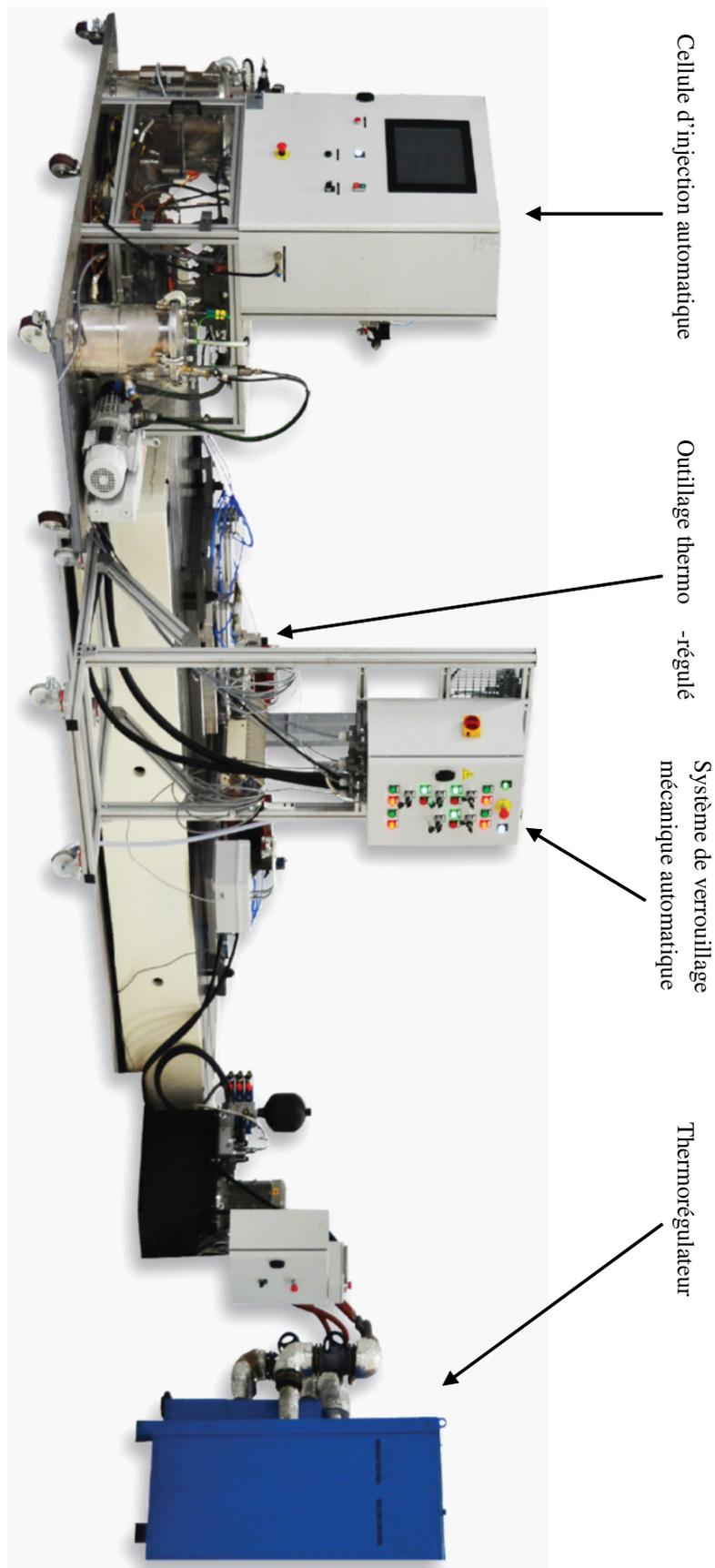


Figure 1.10 – FlexCell - Ligne automatisée [CT12017]

1.2.2 Le projet MATTE

Pour résumer, les industries de l'aéronautique et de l'automobile sont fortement consommatrices de structures composites hautes performances et souhaitent des améliorations sensibles des procédés actuels. Pour chacun de ces secteurs, les enjeux énoncés sont :

Enjeux pour l'aéronautique :

- Remplacer le procédé historique autoclave par des procédés plus productifs (RTM, placement de fibres, estampage) ;
- Remplacer progressivement les composites à matrices therm durcissables par des matrices thermoplastiques hautes performances (PA, PC, PPS, PEI, PEKK) ;
- Disposer de procédés robustes permettant d'assurer une traçabilité de production.

Enjeux pour l'automobile :

- Réduire les coûts d'accès des pièces composites par rapport au métal (coûts matières et méthodes de fabrication) ;
- Disposer de procédés automatisés assurant des hautes cadences avec une très bonne reproductibilité pièce ;
- Utiliser des matériaux composites recyclables et composites thermoplastiques ;
- Être exigeant en suivi et contrôle qualité de production.

Par ailleurs, les industries consommatrices de matériaux composites tendent de plus en plus à remplacer les résines therm durcissables par des résines thermoplastiques [Juras2010]. En effet, à la différence des résines therm durcissables, les thermoplastiques présentent les avantages suivants [Juras2010] :

- Faible temps de mise en œuvre : en moyenne de l'ordre de 1 à 2 minutes ;
- Meilleures propriétés concernant la résistance aux chocs ;
- Assemblages facilités : soudage, sur-moulage... ;
- Meilleur environnement de travail : moins de problèmes d'émission de COV¹ ;
- Meilleur stockage des produits ;
- Meilleure recyclabilité ;
- ...

Cependant, les résines thermoplastiques nécessitent généralement des températures de transformation plus importantes, imposant de ce fait le besoin de faire cycler thermiquement l'outillage, ce dont les structures actuelles ne sont pas capables de réaliser de manière compétitive.

L'objectif de ces travaux de thèse est le développement du concept MATTE : Moule Autonome à Transfert Thermique Efficient. La structure devra être autonome, c'est-à-dire intégrer le système de régulation thermique en chaud et en froid et être efficiente thermiquement afin de pouvoir maîtriser les vitesses et les gradients thermiques au cours du cycle.

1. COV : Composé organique volatil

A cet effet et pour répondre simultanément aux demandes de ces deux secteurs en proposant un procédé de fabrication innovant issu de la combinaison de solutions éprouvées afin d'éviter les risques technologiques, le cadre d'intervention du procédé MATTE, équipé d'un système Heat & Cool, concerne toutes les variantes de procédés :

- d'injection d'une résine liquide dans une préforme fibreuse sèche insérée dans un moule et contre-moule régulés en température, dit RTM, avec une maîtrise spatio-temporelle du champ de température ;
- ou de thermo-compression : compression d'une préforme pré-imprégnée dans un moule et contre moule régulés en température.

Les procédés d'injection pour les matériaux composites permettent l'obtention d'un bon compromis entre les performances mécaniques du stratifié composite et les cadences de production. Ce type de procédé, couplé à la fabrication rapide de préformes et la polymérisation rapide de la résine dans un moule chaud/froid réactif rend possible l'obtention d'une finition netshape et peut permettre une augmentation sensible des cadences de production.

Les performances visées pour ce nouveau type d'outillage sont :

- Une augmentation des vitesses de chauffe et de refroidissement : jusqu'à 50°C/min (en comparaison : autoclave 1 à 3°C/min et RTM 3 à 8°C/min) ;
- Une maîtrise de l'homogénéité thermique sur la surface moulante : ΔT de 5 à 10°C en fonction des besoins ;
- Une réduction de la consommation énergétique de 50 à 80% par rapport à un procédé équivalent (outillage métallique thermorégulé) ;
- La reprise de pression de compactage de l'ordre de 15 bars.

L'outillage doit également permettre la mise en œuvre de composites thermodurcissables et thermoplastiques par :

- Procédé RTM ;
- Consolidation in-situ ;
- Infusion (Out of Autoclave) ;
- Transformation de pré-imprégné.

Ainsi, le concept MATTE devant être une technologie polyvalente permettant la chauffe et le refroidissement rapide de la structure et en assurant un compactage suffisant pour l'obtention de propriétés mécaniques élevées, les choix possibles pour la technologie de chauffe sont donc : la chauffe par induction, cartouches électriques ou fluides caloporteurs, présentés Tableau 1.2. Des actions correctives peuvent être menées afin de palier à certains inconvénients liés à la chauffe par fluide caloporteur. Ces actions sont présentées Tableau 1.5.

A la différence de la chauffe électrique ou par induction, la chauffe par fluide caloporteur permet la réalisation à l'aide du même réseau de canaux la chauffe et le refroidissement. Cela permet ainsi de simplifier la conception de l'outillage et également de limiter la distance entre les canaux pour maîtriser l'homogénéité thermique de la surface moulante. La technologie de chauffe et de refroidissement par fluide caloporteur permet également de rendre la technologie polyvalente et d'adapter le fluide aux performances souhaitées et aux applications visées. Ainsi, il est

par exemple possible de réaliser le cyclage thermique à l'aide d'huile pour outillages utilisés à des températures élevées supérieures à 200°C ou avec de l'eau pour accroître les vitesses de chauffe et refroidissement en dessous de 200°C.

Inconvénients	Solutions
Température d'utilisation	Utilisation d'eau/vapeur ou d'huile en fonction de la température d'utilisation
Echange thermique	Optimisation des canaux pour accroître les performances thermiques
Réticence secteur aéronautique vis-à-vis de l'huile	Démontrer la parfaite étanchéité des canaux

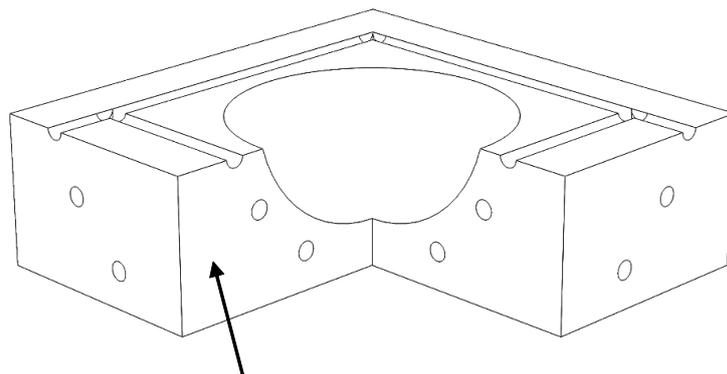
Tableau 1.5 – Solutions potentielles aux inconvénients de la chauffe par fluide caloporteur

Aux vues des performances thermiques et mécaniques attendues et du cahier des charges fixé, le concept MATTE s'est dirigé vers une solution d'outillage type RTM à faible inertie thermique, thermorégulé par un fluide caloporteur réalisant la chauffe et le refroidissement.

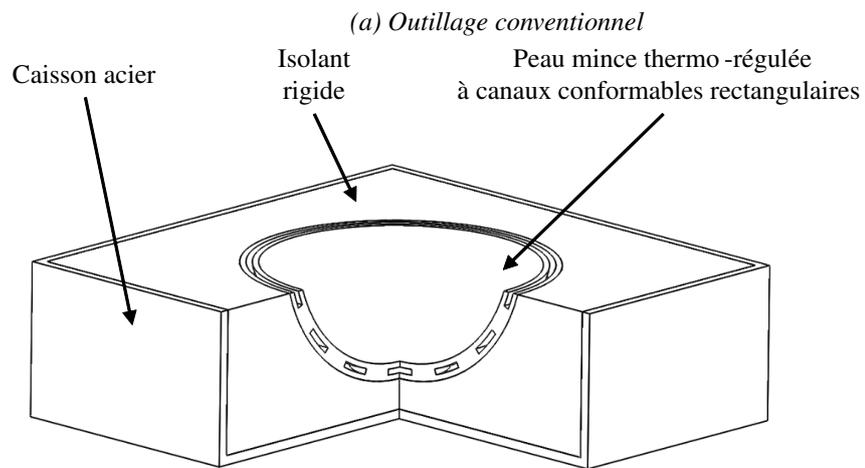
Le concept MATTE, présenté Figure 1.11, est ainsi basé sur le principe d'un outillage multi-matériaux constitué d'une peau chauffante, mince et thermorégulée par un fluide caloporteur, d'un isolant rigide et d'un caisson externe en acier. Les principaux aspects de cette structure sont :

- Peau chauffante mince pour favoriser la réduction de la masse à chauffer et ainsi augmenter la réactivité thermique ;
- Intégration dans la peau chauffante de canaux de chauffe et de refroidissement conformables et rectangulaires pour accroître l'échange convectif, favoriser la diminution de l'épaisseur de la peau et améliorer la maîtrise du champ de température sur la surface moulante ;
- Intégration d'un isolant rigide pour focaliser le flux thermique du côté de la pièce moulée et participer à la reprise des efforts mécaniques.

Ce travail de thèse a donc pour objectif de développer des outils numériques permettant de confirmer l'intérêt de ce concept d'outillage, d'optimiser les performances thermomécaniques de celui-ci en ayant confirmé expérimentalement les résultats numériques obtenus et les modèles associés. L'ambition de ces travaux est d'aboutir à un processus complet de dimensionnement et d'optimisation thermomécaniques des structures MATTE pour la mise en œuvre des matériaux composites hautes performances.



Structure massive à canaux de chauffe droits



(b) *Outillage à canaux conformables dans le concept MATTE*

Figure 1.11 – Comparaison entre des canaux conventionnels et des canaux conformables

1.3 Déroulement des travaux de recherche

1.3.1 Présentation des partenaires

Ces travaux de recherche sont menés dans le cadre d'une thèse CIFRE en collaboration avec l'entreprise CT1 du groupe Compose et le laboratoire SYMME.

CT1 est une filiale du groupe Compose et est dédiée au développement des process composites. Le groupe Compose comprend également les entreprises :

- Compose Tools : mouliste expert dans la réalisation d'outillages à destination du marché du composite et de la plasturgie ;
- Global RTM : développeur de lignes process complètes pour les matériaux composites ;
- IronJaw : fournisseur des produits IronJaw permettant d'accroître la force de fermeture des outillages.

Les principaux marchés de CT1 sont l'aéronautique, l'automobile, l'énergie et le sport et loisirs. La société conçoit et réalise des outillages métalliques innovants pour transformer les matériaux thermoplastiques et composites par RTM, drapage, SMC, injection, estampage... Sa principale force est de pouvoir gérer des projets dans leur globalité en offrant des solutions clés en main : du développement pièce jusqu'au démarrage série.

Le laboratoire SYMME (SYstèmes et Matériaux pour la MEcatronique) (EA4144) est l'un des trois laboratoires de recherche de Polytech Annecy-Chambéry, une école d'ingénieurs publique intégrée à l'Université Savoie Mont Blanc et au Réseau Polytech (13 écoles). Son effectif est de 40 enseignants-chercheurs et 30 doctorants/post-doctorants. Le laboratoire regroupe des compétences en Automatique, Electronique, Instrumentation, Génie Mécanique, Science des Matériaux, et mène des recherches à caractère pluridisciplinaire pour mettre au point des méthodologies de conception et de production de systèmes mécatroniques, avec pour but la maîtrise des matériaux et l'introduction de l'intelligence dans des systèmes mécaniques, pour en améliorer les potentialités et/ou les performances.

1.3.2 Démarche de recherche

Les objectifs de la démarche de travail mise en place sont ainsi le :

- Développement du concept d'outillages MATTE ;
- Développement d'outils informatiques ou numériques qui seront implémentés dans l'entreprise pour la conception et le pré-dimensionnement des outillages MATTE.

La démarche de recherche mise en place pour ces travaux de thèse présentée Figure 1.12 est basée sur une réflexion de recherche pour le développement du concept MATTE et également pour répondre aux besoins industriels dans le cadre du déroulement d'une affaire pour le traitement d'une demande client.

La démarche classique et simplifiée pour le traitement d'une affaire à CT1 est constituée des étapes suivantes :

- Réception du besoin client : informations sur la géométrie, les températures de transformation, ... ;

- Conception d'un outillage : conception basée sur des règles prédéfinies et sur le savoir-faire de l'entreprise ;
- Vérification : validations numériques thermomécaniques des performances de la structure ;
- Fabrication : mise en œuvre de l'outillage ;
- Essais : réalisation de quelques pièces composites pour valider le bon fonctionnement de la structure ;
- Livrables client : Note de calculs thermique, note de calculs mécaniques, outillage.

Ces travaux de recherche nécessitent la mise en place d'outils numériques permettant le traitement des données d'entrées brutes issues du cahier des charges clients et des fiches techniques (homogénéisation du stratifié composite par exemple) et permettant le dimensionnement thermomécanique des structures. Ces outils doivent être généralistes afin de pouvoir être réutilisés ultérieurement au sein de l'entreprise CT1 pour le traitement des futures affaires clients. Par ailleurs, les résultats issus des campagnes numériques, expérimentales et d'optimisation ont pour objectif la mise en place de règles de conception et/ou d'abaques permettant de guider la conception d'outillages lors du traitement des affaires client par la suite.

La démarche de recherche pour le développement du concept MATTE est basée sur un processus similaire à l'échelle TRL (Technology Readiness Level) consistant à évaluer le niveau de maturité d'un système. La démarche adoptée pour le développement du concept MATTE à travers ces travaux de thèse est ainsi :

- L'étude numérique du concept MATTE pour la mise en place du concept ;
- La validation expérimentale à l'aide de démonstrateurs laboratoire et industrielle échelle 1 dans un environnement significatif ;
- L'optimisation numérique du concept MATTE grâce aux retours d'expériences des campagnes expérimentales et numériques.

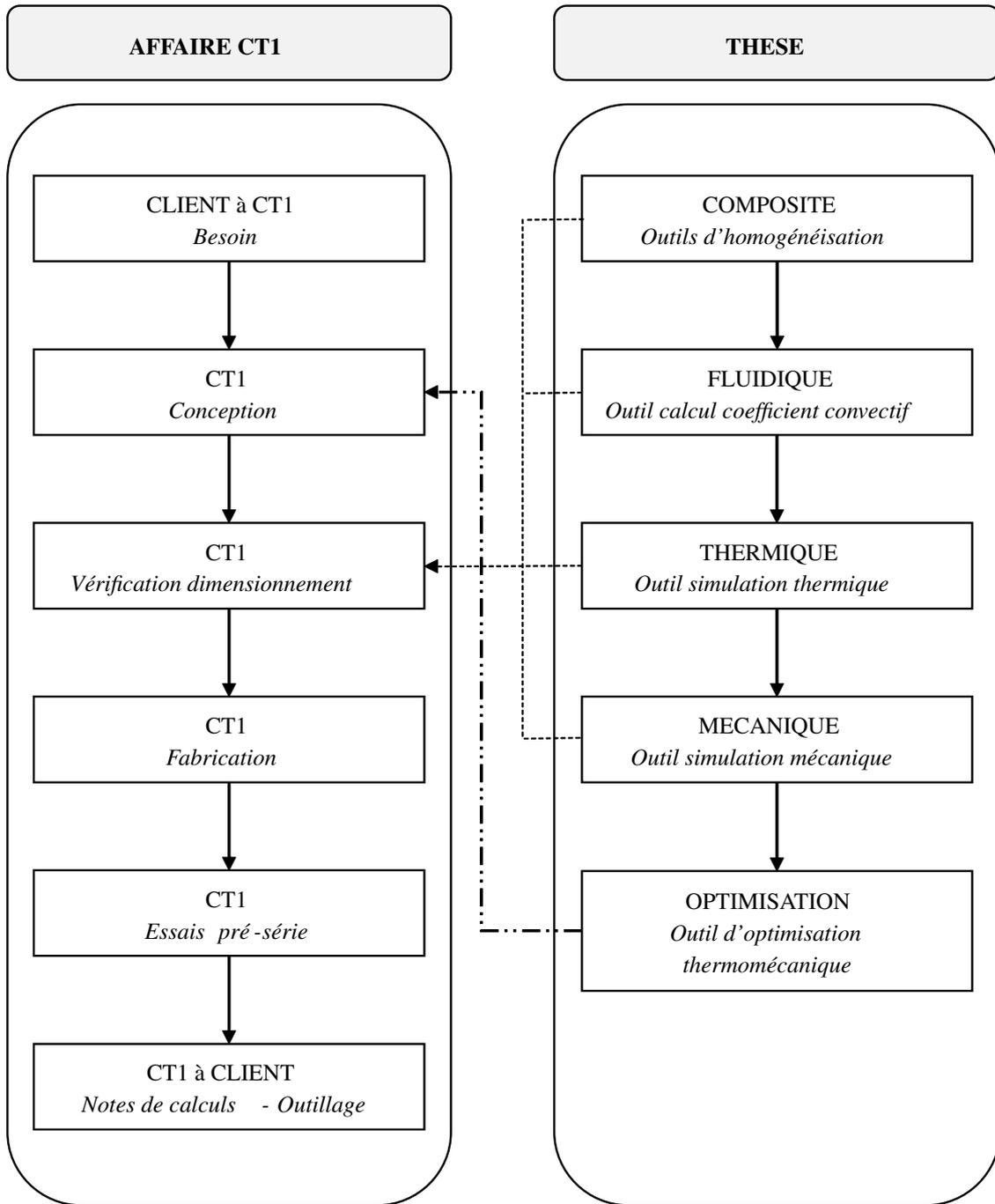


Figure 1.12 – Démarche de recherche