



**HAL**  
open science

# Évaluation environnementale des procédés composites pour l'analyse multicritère des systèmes de production : méthodologies, outils et applications.

Vincent Lacoma

► **To cite this version:**

Vincent Lacoma. Évaluation environnementale des procédés composites pour l'analyse multicritère des systèmes de production : méthodologies, outils et applications.. Génie mécanique [physics.class-ph]. École centrale de Nantes, 2023. Français. NNT : 2023ECDN0020 . tel-04457288

**HAL Id: tel-04457288**

**<https://theses.hal.science/tel-04457288v1>**

Submitted on 14 Feb 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# MEMOIRE DE DOCTORAT DE

## L'ECOLE CENTRALE DE NANTES

ECOLE DOCTORALE N° 602

*Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes*

Spécialité : *Génie Mécanique*

Par

**Vincent LACOMA**

## **Evaluation environnementale des procédés composites pour l'analyse multicritère des systèmes de production : méthodologies, outils et applications**

Projet de recherche doctoral présenté et soutenu à Nantes, le 25 septembre 2023

Unité de recherche : UMR 6183, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM)

### **Rapporteurs avant soutenance :**

**Martine DUBE**

Full professor, École de Technologie Supérieure (ETS), Canada

**Emmanuel CAILLAUD**

Professeur des universités, Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris (CNAM)

### **Composition du Jury :**

Président :

**Nicolas PERRY**

Professeur des universités, Arts et Métiers ParisTech - Centre de Talence

Examineurs :

**Martine DUBE**

Full professor, École de Technologie Supérieure (ETS), Canada

**Emmanuel CAILLAUD**

Professeur des universités, Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris (CNAM)

**Sébastien COMAS-CARDONA**

Professeur des universités, École Centrale de Nantes

**Guillaume VINCENT**

Dr, Ingénieur Composites Thermoplastiques, IRT Jules Verne, Bouguenais

Directeur de recherches doctorales:

**Olivier KERBRAT**

Professeur des universités, École Normale Supérieure de Rennes

Co-dir. de recherches doctorales :

**Christophe BINETRUY**

Professeur des universités, École Centrale de Nantes

Co-enc.de recherches doctorales :

**Jean-Luc BAILLEUL**

Professeur des universités, Nantes Université



# Remerciements

Tout d'abord, je remercie les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer mes travaux. Je remercie particulièrement Madame Martine Dubé et Monsieur Emmanuel Caillaud pour leur rôle en tant que rapporteur et la grande attention qu'ils ont porté à la lecture de mes travaux. Je remercie également Monsieur Nicolas Perry pour son investissement en tant que président du jury. Enfin, merci à Sébastien Comas-Cardona d'avoir été membre du jury mais aussi pour nos échanges durant ces trois années au laboratoire. Merci à tous pour les échanges très pertinents et constructifs que nous avons pu avoir que ce soit sur des points techniques de mes travaux, leurs perspectives ou même sur la dimension sociétale des enjeux environnementaux.

Je voudrais ensuite remercier mon encadrement académique durant ces travaux. Olivier Kerbrat mon directeur de thèse, Christophe Binetruy mon co-directeur et Jean-Luc Bailleul mon co-encadrant qui ont su m'aider et m'orienter dans mes travaux, toujours de façon pertinente. J'ai particulièrement apprécié votre disponibilité et votre bienveillance qui ont largement contribué à mon épanouissement professionnel.

Du côté de mon encadrement à l'IRT Jules Verne, j'aimerais remercier Sandy Moisan et Guillaume Vincent qui ont été très présents durant ces trois années et qui m'ont apporté une aide précieuse dans beaucoup de domaines, comme la présentation de mes résultats scientifiques.

Je remercie aussi l'IRT Jules Verne pour avoir financé ce projet de recherche ainsi que les partenaires industriels avec qui j'ai pu échanger dans le cadre de mes travaux.

Merci également à mes collègues des laboratoires du GeM, du LTeN, de l'ENS et de l'IRT avec qui j'ai eu l'occasion d'échanger, de travailler et avec qui j'ai partagé de très bons moments durant ces trois années intenses.

Je voudrais enfin remercier ma famille, mes parents, mon frère Tom et en particulier ma compagne Claire. Merci pour votre amour et votre soutien dans tous mes projets.



# Table des matières

Liste des figures.....	9
Liste des tableaux.....	14

## Chapitre 1

<b>Contexte général et motivations</b> .....	17
1.1. Transition environnementale de l'industrie.....	18
1.1.1. Contexte.....	18
1.1.2. Besoin d'évaluation des impacts environnementaux.....	21
1.1.3. Nécessité d'intégration de considérations environnementales.....	21
1.2. Développement du marché des composites.....	22
1.3. Problématique, objectif et plan du manuscrit.....	24
1.3.1. Problématique et objectif.....	24
1.3.2. Plan du mémoire de thèse.....	24

## Chapitre 2

<b>Etat de l'art sur l'évaluation et l'intégration de critères environnementaux lors de la fabrication de pièces en composites</b> .....	25
2.1. Introduction.....	26
2.2. Méthode générale d'évaluation environnementale.....	26
2.2.1. La méthode d'Analyse de Cycle de Vie.....	26
2.2.2. Application à des procédés de fabrication.....	27
2.3. Le secteur des matériaux composites.....	28
2.3.1. Les matériaux composites.....	28
2.3.2. Diversité de procédés de fabrication de pièces composites.....	31
2.4. Evaluation et intégration de critères environnementaux lors de la fabrication de pièces en composites.....	33
2.4.1. Stratégies de réduction de l'impact environnemental des procédés composites.....	33
2.4.2. Synthèse des méthodologies d'analyse environnementale, économique et d'exploitation multicritère déployées pour le cas des procédés composites.....	42
2.5. Conclusion.....	48

## Chapitre 3

<b>Définition des objectifs et du périmètre de travail de l'analyse environnementale</b> .....	49
3.1. Introduction.....	50
3.2. Définition de l'unité fonctionnelle.....	50

3.2.1.	Démarche générale.....	50
3.2.2.	Application au cas du thermoformage-estampage .....	50
3.3.	Définition du périmètre de l'étude .....	51
3.3.1.	Démarche générale.....	51
3.3.2.	Description détaillée du procédé de thermoformage-estampage.....	51
3.4.	Détermination des contraintes techniques du procédé de thermoformage-estampage .....	56
3.4.1.	Influence des paramètres du thermoformage-estampage sur les propriétés mécaniques des pièces produites.....	56
3.4.2.	Evaluation expérimentale de l'influence des paramètres procédés sur la résistance mécanique.....	58
3.5.	Conclusion.....	65

## Chapitre 4

### Analyse d'inventaire pour la construction de modèles de flux dépendants des paramètres de réglage du procédé.....

4.1.	Introduction .....	68
4.2.	Méthodes de collecte des données .....	68
4.2.1.	Choix des méthodes de mesures des différents flux d'inventaire .....	68
4.2.2.	Modélisation des consommations électriques à partir de relevés expérimentaux ....	71
4.2.3.	Évaluation des émissions dans l'air .....	73
4.3.	Résultats d'inventaire et modélisations associées .....	78
4.3.1.	Consommation C/PPS.....	78
4.3.2.	Découpe jet d'eau de la préforme.....	79
4.3.3.	Chauffage infrarouge.....	81
4.3.4.	Transferts par le bras robotisé .....	85
4.3.5.	Estampage .....	87
4.3.6.	Finition par usinage .....	91
4.3.7.	Emissions dans l'air.....	91
4.4.	Bilan des modélisations des flux d'inventaire.....	95
4.5.	Mise en perspective des résultats de laboratoire par rapport à la consommation électrique d'une ligne de thermoformage-estampage à échelle industrielle.....	97
4.5.1.	Unité fonctionnelle et périmètre de l'étude .....	97
4.5.2.	Montage expérimental .....	98
4.5.3.	Résultats des mesures électriques .....	99
4.5.4.	Comparaison des résultats avec le procédé à l'échelle du laboratoire.....	102
4.6.	Conclusion.....	104

## Chapitre 5

### **Exploitation des modèles de flux d'inventaire pour les analyses environnementale et économique du procédé**..... 105

5.1. Introduction .....	106
5.2. Méthode d'exploitation des données d'inventaire pour l'analyse environnementale et économique .....	106
5.2.1. Établissement du modèle environnemental (étape I).....	107
5.2.2. Etablissement du modèle économique du procédé (étape II) .....	109
5.2.3. Recherche des postes majeurs d'impact environnemental et de coût (étapes I.2 et II.2) .....	110
5.2.4. Analyse de l'influence des paramètres procédés (étapes I. 3 et II.3).....	112
5.2.5. Analyse des incertitudes (étapes I.1 et II.1).....	113
5.3. Application au cas du thermoformage-estampage de C/PPS.....	116
5.3.1. Description du cas étudié et du scénario de production de référence .....	116
5.3.2. Analyse environnementale.....	119
5.3.3. Prise en compte des incertitudes sur les résultats environnementaux (étape I.1)...	124
5.3.4. Analyse économique.....	127
5.3.5. Bilan des résultats des analyses environnementales et économiques .....	130
5.4. Conclusion.....	132

## Chapitre 6

### **Modélisation physique du procédé de thermoformage-estampage pour le calcul de données d'inventaire complémentaires**..... 133

6.1. Introduction .....	134
6.2. Modélisation thermique pour l'identification de données de consommation d'énergie ...	134
6.2.1. Objectif de la modélisation thermique du procédé .....	134
6.2.2. Description du système modélisé.....	134
6.2.3. Modèle proposé.....	136
6.2.4. Caractérisation des propriétés thermiques du matériau C/PPS.....	141
6.2.5. Validation expérimentale du modèle thermique .....	144
6.2.6. Exploitation du modèle thermique pour la quantification du potentiel de diminution de la consommation d'énergie .....	148
6.3. Modélisation du formage pour le calcul de taux de chute .....	151
6.3.1. Objectif de la modélisation de la consommation de matériau .....	151
6.3.2. Description de la méthode de formage cinématique.....	151
6.3.3. Application au calcul de surconsommations de matière.....	155
6.4. Conclusion.....	159

## Chapitre 7

<b>Analyse multicritère du procédé à partir de modèles d'impacts environnementaux, de coût et de résistance mécanique</b> .....	161
7.1. Introduction .....	162
7.2. Système étudié pour le développement des propositions méthodologiques.....	162
7.2.1. Définition du système.....	162
7.2.2. Indicateur de performance choisi.....	163
7.3. Analyse et choix de paramètres multicritères par une méthode graphique.....	164
7.3.1. Présentation conceptuelle.....	164
7.3.2. Application au thermoformage-estampage .....	165
7.3.3. Synthèse.....	169
7.4. Choix de paramètres par minimisation d'un indicateur agrégé .....	169
7.4.1. Présentation conceptuelle.....	169
7.4.2. Application au choix de paramètre de thermoformage-estampage.....	171
7.4.3. Définition d'un nouvel indicateur pour la prise en compte de la problématique de respect de critères techniques.....	174
7.4.4. Synthèse.....	175
7.5. Choix parmi les optimums de Pareto.....	176
7.5.1. Présentation conceptuelle.....	176
7.5.2. Application au thermoformage-estampage .....	177
7.5.3. Synthèse.....	178
7.6. Conclusion.....	179

## Chapitre 8

<b>Conclusion générale</b> .....	181
8.1. Synthèse.....	182
8.2. Bilan des contributions .....	183
8.3. Perspectives .....	184
Références.....	186

# Liste des figures

Figure 1 : Evolution de la température (moyenne décennale) à la surface du globe [2].	18
Figure 2 : Répartition des émissions mondiales de gaz à effet de serre par secteur d'activité : a. en 2010 [3] ; b. en 2019 [4].	19
Figure 3 : Les objectifs de développement durable [5].	19
Figure 4 : Evolution mondiale du nombre d'entreprises ayant un système de management environnemental certifié ISO 14001 (source des données : ISO Survey).	20
Figure 5 : Stratégie d'amélioration continue proposée dans la norme ISO 14001, d'après [8].	21
Figure 6 : Nombre d'articles de journal publiés avec les mots clés « sustainable » et « manufacturing » entre 1990 et 2022 (Source des données : Scopus en avril 2023).	22
Figure 7 : Evolution du marché mondial des composites en masse entre 2010 et 2022 et perspectives d'évolution du marché entre 2022 et 2027 [12].	23
Figure 8 : Schéma des différentes étapes de la méthode ACV (ISO 14 040) [16].	27
Figure 9 : Périmètres d'étude couramment employés en ACV : « Cradle-to-grave » : du berceau à la tombe ; « Cradle-to-gate » : du berceau à la porte ; « Gate-to-gate » : « porte à porte ».	27
Figure 10 : Diagramme d'Ashby comparant le module d'élasticité et la densité de différentes familles de matériaux [26].	29
Figure 11 : Principales résines thermoplastiques utilisées dans les composites [13].	30
Figure 12 : Clip de fuselage d'A350 XWB produit par thermoformage-estampage par DAHER à Nantes [33].	32
Figure 13 : Procédé de thermoformage-estampage.	33
Figure 14 : Représentation sur un diagramme radar des résultats économiques, mécaniques et énergétiques des différentes configurations de paramètres testés pour aider à la décision [52].	40
Figure 15 : Méthodologie d'évaluation environnementale et économique proposée par Lindner et Schmitt [55].	44
Figure 16 : Représentation des deux visions du périmètre à considérer.	51
Figure 17 : Machine de découpe jet d'eau ProtoMAX (OMAX) utilisée pour l'étape de découpe de préforme.	52
Figure 18 : Système de préhension de matériau par ventouses et aiguilles selon que le matériau soit à l'état solide ou bien fondu.	53
Figure 19 : Cellule de thermoformage-estampage de l'école Centrale de Nantes : Four IR SOPARA utilisé pour l'étape de chauffage et Presse SCAMEX de 75T utilisée pour l'étape d'emboutissage.	53
Figure 20 : Arbre des processus du procédé de thermoformage-estampage de C/PPS.	55
Figure 21 : a. Cellule d'estampage du laboratoire composé du four IR et de la presse ; b. Plateaux de la presse avec système de glissières; c. Cadre de transport de matière dans le tiroir du four IR.	59
Figure 22 : Pièces fabriquées par thermoformage-estampage avec différentes configurations de paramètres.	60
Figure 23 : Machine de traction-compression Instron 68FM - 300 équipée du montage de flexion trois points utilisés.	61
Figure 24 : Banc de flexion trois points utilisé.	62
Figure 25 : Exemple de résultats d'essais de flexion pour des éprouvettes prises dans les plaques n°2, 4, 6, 8 et dans le matériau vierge.	63
Figure 26 : Coefficients de l'expression de la résistance au cisaillement interlaminaire des pièces produites en fonction de la température du moule ( $T_{\text{presse consigne}}$ ), pression de consolidation ( $P_{\text{consolidation}}$ ) et de la température de chauffage infrarouge ( $T_{\text{IR consigne}}$ ).	64
Figure 27 : Méthodologie de choix de la technique de quantification des flux d'inventaire à partir du jugement de la personne qui réalise l'étude environnementale.	70

Figure 28 : Techniques de collectes des données d'inventaire pour l'étude du thermoformage-estampage de C/PPS.....	71
Figure 29 : Matériel de mesure électrique utilisé : a. Fluke 434 II avec pinces ampèremétriques Fluke i30s ; b. Fluke 1736 avec pinces ampèremétriques Fluke iFlex 1500-12. ....	72
Figure 30 : Méthodologie de modélisation de la consommation électrique des machines comme une fonction de leurs réglage à partir de relevés expérimentaux. ....	73
Figure 31 : Appareils de mesure d'émissions dans l'air : a. DUSTTRAK ; b. Q-TRAK. ....	75
Figure 32 : Montage expérimental pour la détection de composés gazeux émis lors du chauffage de matériau C/PPS dans le four IR : positionnement du Q-TRAK dans le flux d'air du système d'extraction du four IR.....	76
Figure 33 : Montage expérimental utilisé pour mesurer les émissions lors du chauffage de matériau C/PPS sur une plaque chauffante.....	76
Figure 34 : Four de calcination Nabertherm utilisé pour évaluer les émissions dans l'air lors du chauffage de C/PPS : a. Face avant du four ; b. Face arrière du four avec l'unique sortie d'effluents. ....	77
Figure 35 : Appareils de mesures : a. Spectromètre de masse Omnistar (Pfeiffer Vacuum) ; b) ATG Setsys Evolution.....	78
Figure 36 : a. Montage électrique pour les relevés de puissance active consommée par la machine de découpe jet d'eau ; b. Découpes réalisées lors des relevés électriques sur la machine de découpe jet d'eau.....	79
Figure 37 : Consommation électrique de la machine de découpe jet d'eau ProtoMAX (OMAX) : a. Relevés de puissance consommée lors de la découpe de 4 pièces ; b. Modèle de consommation de puissance proposé.....	80
Figure 38 : Montage expérimental utilisé pour les relevés électriques sur le four IR : a. Représentation schématique des différents points de mesure ; b. Tableau électrique du four IR et emplacement des mesures électriques réalisées sur l'alimentation générale avec le Fluke 434 II (pinces i30s) et le Fluke 1736 (pinces iFlex 1500-12) ainsi que sur l'alimentation de deux panneaux radiants avec le Fluke 434 II (pinces i30s).....	81
Figure 39 : Modélisation de la consommation d'énergie électrique du four IR : a. Puissance consommée par deux panneaux radiants lors du chauffage de C/PPS à 310 °C et une puissance de chauffage $H_{paramètre} = 70\%$ ; b. Modèle de consommation de puissance proposé. ....	82
Figure 40 : Modélisation linéaire de la puissance consommée par le four lors de la phase de montée en température $P_{IR\ chauffage}$ en fonction du réglage de puissance du four $H_{paramètre}$ . ....	83
Figure 41 : Modélisation linéaire de l'énergie de maintien en température $E_{IR\ maintien}$ consommée par le four en fonction de la température de consigne du four $T_{IR\ consigne}$ . ....	84
Figure 42 : Température en surface lors d'un essai de chauffage à 370 °C avec une puissance de chauffage de 100 %. ....	84
Figure 43 : Vitesses de chauffage $v_{IR\ chauffage}$ calculées pour des chauffages successifs pour une puissance de chauffage $H_{paramètre} = 85\%$ . ....	85
Figure 44 : Vitesse de montée en température en régime permanent $v_{IR\ chauffage}$ en fonction du réglage de puissance du four $H_{paramètre}$ . ....	85
Figure 45 : Mouvement réalisé par les bras robotisés étudiés par Chemnitz et al. [77]. ....	86
Figure 46 : Consommation d'énergie des bras robot pour réaliser un mouvement en fonction de la durée du mouvement [77]. ....	86
Figure 47 : Modèle proposé pour la consommation d'énergie électrique du bras robot d'après les travaux de Chemnitz et al. [77]. ....	87
Figure 48 : Tableau électrique de la presse et emplacement des mesures électriques réalisées. ....	88

Figure 49 : Consommation d'énergie électrique du sous-système thermique (plateaux chauffants) de la presse : a. Relevés électriques lors du chauffage des plateaux à 100 °C ; b. modèle électrique proposé. ....	88
Figure 50 : Consommation d'énergie électrique du sous-système mécanique de la presse : a. Relevés électriques lors d'un cycle fermeture-maintien en pression-ouverture à 200 kN superposés avec le modèle constant par morceau proposé; b. modèle électrique global proposé. ....	89
Figure 51 : Modélisation linéaire des coefficients du modèle de consommation électrique du système thermique de la presse en fonction de la température de consigne des plateaux chauffants $T_{presse\ consigne}$ : a. Energie de montée en température $E_{presse\ chauffage}$ ; b. Puissance de maintien en température $P_{presse\ maintien}$ .....	90
Figure 52 : Exemple de résultat des mesures d'émissions de particules fines totales lors d'un essai de chauffage dans le four IR à 100% de la puissance de chauffage.....	92
Figure 53 : Résultats des mesures ATG et DSC des essais 2 (sous air) et 4 (sous N <sub>2</sub> ).....	93
Figure 54 : Dérivée du signal du spectromètre de masse par rapport au temps et de la température lors des essais 2 et 4.....	94
Figure 55 : Périmètre de l'étude du procédé de thermoformage-estampage de l'IRT Jules Verne. ....	97
Figure 56 : Cellule d'estampage de l'IRT Jules Verne. ....	98
Figure 57 : Enchaînement des différentes étapes du procédé de thermoformage-estampage mises en œuvre sur la plateforme de l'IRT Jules Verne. ....	98
Figure 58 : Exemple de relevé de puissance électrique consommée par le four infrarouge lors de la mise en œuvre du procédé à l'IRT Jules Verne. ....	99
Figure 59 : Exemple de relevé de puissance électrique consommée par le bras robot lors de la mise en œuvre du procédé à l'IRT Jules Verne.....	100
Figure 60 : Exemple de relevé de puissance électrique consommée par le thermorégulateur TT-388 Z lors de la mise en œuvre du procédé de l'IRT Jules Verne.....	101
Figure 61 : Exemple de relevé de puissance électrique consommée par la presse lors de la mise en œuvre du procédé à l'IRT Jules Verne.....	102
Figure 62 : Comparaison des consommations d'énergie électrique des procédés du laboratoire et de l'IRT Jules Verne pour la transformation d'1kg de matériau.....	103
Figure 63 : Méthodologie globale d'exploitation des résultats d'inventaire. ....	106
Figure 64 : Lien de causalité entre différentes catégories d'impact environnementaux et les trois grandes aires de protection [89]. ....	107
Figure 65 : Positionnement du système étudié par rapport à la technosphère et l'écosphère. ....	109
Figure 66 : Etape I.2. Méthodologie d'identification des postes d'impacts environnementaux majeurs du procédé ; Etape II.2. Méthodologie d'identification des postes de coût majeurs du procédé.....	112
Figure 67 : Méthode de calcul de la criticité d'une donnée d'inventaire.....	114
Figure 68 : Résultats du modèle environnemental du procédé de thermoformage-estampage de C/PPS pour le scénario de production choisi comme référence. ....	119
Figure 69 : Résultats du modèle environnemental du procédé de thermoformage-estampage de C/PPS pour le scénario de production choisi comme référence, simplifiés avec la méthode du PEF.....	120
Figure 70 : Résultats du modèle environnemental du procédé de thermoformage-estampage de C/PPS simplifiés.....	121
Figure 71 : Résultats de l'analyse de sensibilité des postes d'impacts majeurs pour les catégories d'impacts Climate change et Ionising radiation. ....	122
Figure 72 : Indicateurs de la sensibilité de l'impact environnemental Climate change aux paramètres du procédé de thermoformage-estampage.....	123
Figure 73 : Indicateurs d'incertitude de PEDIGREE associés aux flux d'inventaire du procédé de thermoformage-estampage de C/PPS.....	125

Figure 74 : Résultats de l'analyse de sensibilité de l'impact environnemental Climate change du procédé de thermoformage-estampage aux incertitudes des données d'inventaire non mesurées.	126
Figure 75 : Résultats de la criticité des données non mesurées pour l'analyse environnementale avec l'indicateur Climate change.	127
Figure 76 : Résultats de l'évaluation économique du scénario de production de référence.	127
Figure 77 : Résultats de l'analyse de sensibilité des postes de coût majeurs aux paramètres du procédé de thermoformage-estampage de C/PPS.	128
Figure 78 : Résultats de l'analyse de sensibilité du coût aux paramètres du procédé de thermoformage-estampage.	129
Figure 79 : Résultats de l'analyse de sensibilité du coût du procédé de thermoformage-estampage aux incertitudes des données d'inventaire non mesurées.	130
Figure 80 : Résultats de la criticité des données non mesurées pour l'analyse économique.	130
Figure 81 : Description du procédé de thermoformage-estampage et des transferts thermiques mis en jeux et modélisés.	135
Figure 82 : Représentation de la géométrie de la pièce et du moule dont le comportement thermique est modélisé.	136
Figure 83 : Discrétisation spatiale à un instant $t_j$ utilisée pour la résolution par différences finies de l'équation de la chaleur.	137
Figure 84 : Condition d'équilibre des flux thermiques sur la surface supérieure de la préforme lors de l'étape de chauffage infrarouge.	139
Figure 85 : Condition d'équilibre des flux thermiques sur la surface supérieure de la préforme lors de l'étape de transfert.	139
Figure 86 : Condition d'équilibre des flux thermiques à l'interface moule-pièce lors de l'étape d'emboutissage.	140
Figure 87 : Condition d'équilibre des flux thermiques du moule lors des phases de chauffage puis de maintien en température moule ouvert.	141
Figure 88 : a. Montage expérimental pour les essais de plaque chaude gardée ; b. Epruvette de plaque chaude gardée.	141
Figure 89 : Résultats des essais de plaque chaude gardée réalisés pour la caractérisation de la conductivité thermique du matériau C/PPS.	142
Figure 90 : Résultats des essais de dilatométrie montrant les interpolations linéaires utilisées pour déterminer les coefficients d'expansion thermique du matériau C/PPS.	142
Figure 91 : a. Montage expérimental pour les essais DSC ; b. Montage expérimental pour les essais ATG.	143
Figure 92 : Résultats d'un essai DSC : échantillon de 8,74 mg et réalisation du cycle thermique numéro 1.	144
Figure 93 : Instrumentation des plaques par 3 thermocouples : a. Photographie d'une pièce instrumentée après insertion des thermocouples et avant reconsolidation ; b. Positionnement des thermocouples dans la pièce de 4,3 mm d'épaisseur ; c. Positionnement des thermocouples dans la pièce de 2,8 mm d'épaisseur.	145
Figure 94 : Comparaison entre les résultats des mesures de température dans la pièce avec ceux issus de la modélisation développée dans la configuration de l'essai 2 et pour la plaque de 4,3 mm d'épaisseur.	146
Figure 95 : Résultats des mesures et de la modélisation développée des températures pour la phase de chauffage du moule de la presse.	148
Figure 96 : Puissance nécessaire lors d'un cycle de chauffage infrarouge calculée avec la modélisation thermique du procédé.	149

Figure 97 : Puissance nécessaire pour la presse calculée avec la modélisation thermique du procédé. ....	149
Figure 98 : Résultats de l'exploitation du modèle thermique et des données mesurées pour l'identification du potentiel de diminution de consommation d'énergie du procédé de thermoformage-estampage. ....	150
Figure 99 : Energie perdue au cours du temps par la pièce lors de l'étape de transfert calculée avec la modélisation thermique du procédé. ....	151
Figure 100 : Déformation d'un tissu par cisaillement avec les hypothèses de la méthode de formage cinématique [107]. ....	152
Figure 101 : Création de ligne génératrice par la méthode planaire (en bleu) et par la méthode géodésique (en rouge) [107]. ....	153
Figure 102 : Description de la méthode de drapage cinématique développée par Krogh et al. [107]. ....	154
Figure 103 : Champ de cisaillement prédit par le code de Krogh et al. pour le formage de composite sur une calotte sphérique. ....	155
Figure 104 : Exemple sur le cas d'une calotte sphérique de la projection sur le plan (x,y) des résultats du calcul de formage pour le calcul de la quantité de matière surconsommée. ....	156
Figure 105 : Exemple d'itérations pour l'optimisation de la taille de la préforme dans le cas du formage d'une calotte sphérique. ....	156
Figure 106 : Géométries non développables étudiées avec le modèle de calcul des surconsommations de matières lors du formage maillées sous Gmsh : a. Calotte sphérique ; b. Pyramide à base triangulaire ; c. Pyramide à base carrée tronquée. ....	157
Figure 107 : Résultats de l'application de la procédure d'identification de la préforme minimale permettant de produire les pièces étudiées : a. Calotte sphérique ; b. Pyramide à base triangulaire ; c. Pyramide à base carrée tronquée. ....	157
Figure 108 : Surconsommations de matériau calculées pour les différentes géométries étudiées. ...	158
Figure 109 : Exemple de pièce plaque en C/PPS fabriquée par le procédé de thermoformage-estampage étudié. ....	163
Figure 110 : Représentation conceptuelle des différentes étapes de la méthode d'analyse multicritère graphique. ....	165
Figure 111 : Surface de réponse du procédé de thermoformage-estampage de C/PPS. ....	166
Figure 112 : Tracé des courbes iso-ILSS sur la surface de réponse du procédé de thermoformage-estampage pour trois critères minimaux de résistance au cisaillement interlaminaire : 60 MPa, 65 MPa, et 68 MPa. ....	166
Figure 113 : a. Evolution de l'impact environnemental minimal du procédé en fonction du critère de résistance au cisaillement interlaminaire (ILSS) ; b. Evolution du coût du procédé en fonction du critère ILSS. ....	168
Figure 114 : Méthodologie d'analyse multicritère par indicateur agrégé. ....	170
Figure 115 : Coefficients de pondération du coût ( $\lambda_{Coût}$ ), de l'impact environnemental Climate change ( $\lambda_{Climate\ change}$ ) et de la résistance mécanique ILSS ( $\lambda_{ILSS}$ ) de l'indicateur $I_1$ pour les 6 scénarios étudiés. ....	173
Figure 116 : Facteurs de pondération du coût ( $\lambda_{Coût}$ ) et de l'impact environnemental Climate change ( $\lambda_{Climate\ change}$ ) de l'indicateur $I_2$ pour les 3 scénarios étudiés. ....	175
Figure 117 : Méthodologie de choix de paramètres par la recherche d'optimum de Pareto. ....	177

# Liste des tableaux

Tableau 1 : Résumé des propriétés mécaniques de fibres haute performances [27]. .....	29
Tableau 2 : Principaux procédés de mise en œuvre des composites, d'après [27]. .....	32
Tableau 3 : Synthèse des choix d'application de la méthode ACV des travaux d'évaluation de l'impact environnemental des procédés composites étudiés dans la section précédente. ....	43
Tableau 4 : Postes de coûts pris en compte dans les travaux d'analyse environnementale et économique de la littérature. ....	46
Tableau 5 : Indicateurs de qualité technique des pièces fabriquées intégrés dans les analyses environnementales des procédés composites. ....	46
Tableau 6 : Paramètres de fabrication pour la mise en forme de pièces en C/PPS par thermoformage-estampage. ....	58
Tableau 7 : Plan d'essai pour la fabrication des pièces lors de l'étude de l'influence des paramètres du procédé de thermoformage-estampage et résultats des mesures de résistance au cisaillement interlaminaire. ....	60
Tableau 8 : Dimensions des éprouvettes de flexion et du montage de flexion trois points. ....	61
Tableau 9 : Méthodes de collecte de données d'inventaire avec leurs avantages et inconvénients. ...	69
Tableau 10 : Composés chimiques potentiellement émis lors du chauffage de matériau PPS. ....	74
Tableau 11 : Essais ATG/DSC-MS réalisés. ....	78
Tableau 12 : Taux de chute inhérents à divers procédés de mise en forme de composites. ....	79
Tableau 13 : Paramètres machine utilisés lors des relevés électriques réalisés sur le four IR. ....	81
Tableau 14 : Paramètres presse utilisés lors des relevés électriques. ....	87
Tableau 15 : Données de consommation d'agent démoulant issues de la littérature. ....	91
Tableau 16 : Masses molaires détectées lors des essais. ....	94
Tableau 17 : Notations utilisées pour la synthèse des modèles d'inventaire. ....	95
Tableau 18 : Synthèse des modèles d'inventaire du procédé de thermoformage-estampage. ....	96
Tableau 19 : Montages électriques utilisés lors des relevés sur la cellule d'estampage de l'IRT. ....	99
Tableau 20 : Résultats des mesures électriques sur le bras robotisé de l'IRT Jules Verne. ....	100
Tableau 21 : Résultats des relevés de consommation électrique des régulateurs thermiques de l'IRT Jules Verne. ....	101
Tableau 22 : Paramètres procédé et données d'inventaire calculées pour le procédé de laboratoire. ....	102
Tableau 23 : Facteurs de coût relatifs aux flux d'inventaire du procédé de thermoformage-estampage de C/PPS. ....	110
Tableau 24 : Matrice de PEDIGREE adaptée de Weidema et Wesnæs [93] et indicateurs d'incertitudes $U_i$ pour la conversion des scores PEDIGREE en indicateurs d'incertitudes [94]. ....	115
Tableau 25 : Paramètres de fabrication et données d'inventaire pour le scénario de production de la pièce plaque de 250 mm x 200 mm x 4,34 mm choisie comme référence. ....	117
Tableau 26 : Données d'inventaire pour la production d'1 kg de PAN, d'après Duflou et al. [95]. ....	118
Tableau 27 : Données d'inventaire pour la production d'1 kg de fibres de carbone à partir de PAN, d'après Khalil [96]. ....	118
Tableau 28 : Participation normalisée et pondérée des différentes catégories d'impacts environnementaux à l'empreinte environnementale du procédé de thermoformage-estampage avec le scénario choisi selon la méthode du PEF [91]. ....	120
Tableau 29 : Valeurs des paramètres du procédé utilisées pour l'analyse de sensibilité des postes majeurs d'impacts environnementaux du procédé de thermoformage-estampage de C/PPS. ....	122
Tableau 30: Valeurs des paramètres du procédé utilisées pour l'analyse de sensibilité visant à établir l'influence des paramètres du procédé. ....	123

Tableau 31 : Évaluation des scores de PEDIGREE pour toutes les données d'inventaire collectées pour le procédé de thermoformage-estampage de C/PPS.....	124
Tableau 32: Valeurs des paramètres du plan d'expérience établi pour l'analyse de sensibilité de l'impact environnemental du procédé de thermoformage-estampage aux incertitudes des données d'inventaire non mesurées.....	125
Tableau 33 : Bilan de l'analyse environnementale et de l'analyse économique du procédé de thermoformage-estampage. ....	131
Tableau 34 : Cycles thermiques utilisés lors des essais DSC. ....	143
Tableau 35 : Propriétés thermiques des matériaux des systèmes modélisés. ....	144
Tableau 36 : Configurations de paramètres utilisées lors des essais de thermoformage-estampage avec les pièces instrumentées avec des thermocouples.....	146
Tableau 37 : Coefficients de corrélation et erreur absolue moyenne entre les données mesurées et les résultats de la modélisation thermique. ....	147
Tableau 38 : Valeurs des paramètres du procédé de thermoformage-estampage utilisées.....	163
Tableau 39 : Valeurs des paramètres du procédé utilisées pour le calcul des données lors de la construction de la surface de réponse. ....	165
Tableau 40 : Configurations des paramètres des procédés optimales à adopter en phase de production pour les trois critères de résistance au cisaillement interlaminaire étudiés. ....	167
Tableau 41 : Echelle d'évaluation pour la comparaison par paires des indicateurs utilisés. ....	171
Tableau 42 : Matrice de comparaison par paires construite pour le scénario mixte techno-éco centré (scénario 2) utilisé avec l'indicateur $I_1$ .....	172
Tableau 43 : Paramètres du procédé identifiés après la minimisation de l'indicateur agrégé $I_1$ .....	173
Tableau 44 : Matrice de comparaison par paire construite pour le scénario enviro-centré (scénario2) utilisé avec l'indicateur $I_2$ .....	174
Tableau 45 : Paramètres du procédés identifiés après la minimisation de l'indicateur agrégé $I_2$ . ....	175
Tableau 46 : Solutions de Pareto identifiées avec une contrainte de résistance au cisaillement interlaminaire de 65 MPa.....	177
Tableau 47 : Comparaison entre les résultats obtenus avec l'approche de Pareto et ceux obtenus avec les autres méthodes pour le cas d'une contrainte de résistance au cisaillement interlaminaire fixée à 65 MPa.....	177
Tableau 48 : Bilan des avantages et inconvénients des méthodes de choix de paramètres proposées. ....	180



# Chapitre 1

## Contexte général et motivations

---

1.1. Transition environnementale de l'industrie .....	18
1.1.1. Contexte.....	18
1.1.2. Besoin d'évaluation des impacts environnementaux.....	21
1.1.3. Nécessité d'intégration de considérations environnementales.....	21
1.2. Développement du marché des composites .....	22
1.3. Problématique, objectif et plan du manuscrit .....	24
1.3.1. Problématique et objectif.....	24
1.3.2. Plan du mémoire de thèse.....	24

---

## 1.1. Transition environnementale de l'industrie

### 1.1.1. Contexte

#### 1.1.1.1. Les problématiques environnementales

Il est aujourd'hui admis que les activités humaines ont des conséquences négatives sur l'environnement qui peuvent se manifester sous différentes formes. Ces problématiques peuvent tout d'abord se déclarer à une échelle locale. Ainsi, durant la révolution industrielle, des épisodes de concentration de fumées formant un brouillard toxique (*smog*) ont par exemple été observés dans des villes telles que Londres, avec des conséquences néfastes sur la santé humaine et l'environnement [1]. Les activités humaines ont également des effets négatifs à une échelle plus globale. Le changement climatique, suivi par le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) depuis 1988, est un exemple d'impact négatif des activités anthropiques à l'échelle de la planète. Le changement climatique, qui se traduit par une augmentation de la température moyenne de la planète (Figure 1), a de dangereuses répercussions sur notre environnement menant à des problèmes sociétaux et économiques : l'augmentation de la fréquence et de l'intensité de phénomènes météorologiques extrêmes (sécheresse, vague de chaleur) qui perturbent les capacités de production agricoles et augmentation du niveau des océans menant à des crises migratoires en sont deux exemples [2].

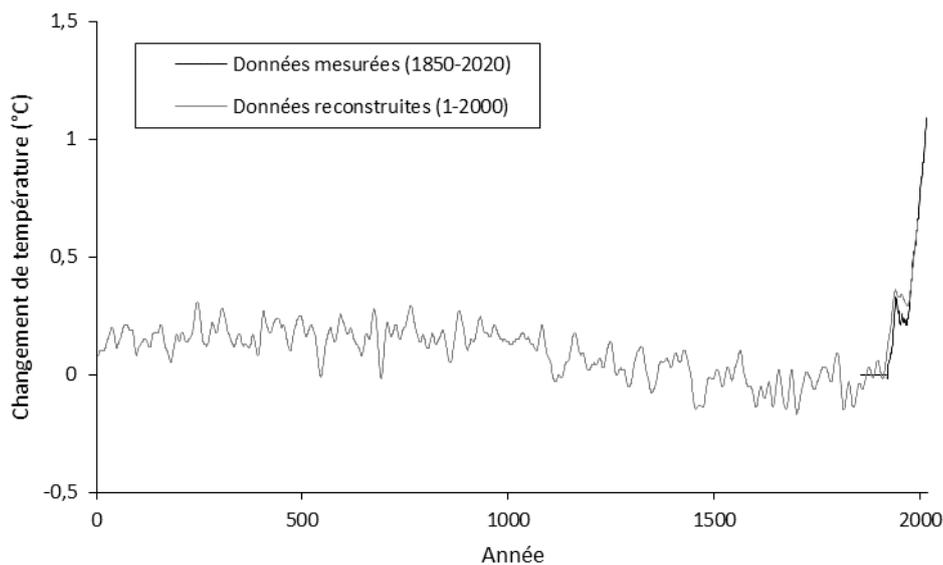


Figure 1 : Evolution de la température (moyenne décennale) à la surface du globe [2].

Le changement climatique est un phénomène principalement attribué au mécanisme d'effet de serre qui est favorisé par les émissions dans l'atmosphère de gaz à effets de serre tels que le  $\text{CO}_2$  [2]. Étudiant l'influence de différentes activités humaines responsables de ce type d'émissions, le GIEC a pu évaluer que l'industrie compte parmi les secteurs majeurs d'émission de gaz à effet de serre (Figure 2). En 2010, ce secteur était responsable de 32 % des émissions totales de gaz à effet de serre, calculées en masse de  $\text{CO}_2$  équivalent, si l'on somme les émissions directes (21 %) et les émissions indirectes associées à la consommation d'énergie. En 2019, les émissions directes de ce secteur s'élevaient encore à 24 % des émissions totales (soit 14 Gt de  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ ). De ce fait, le secteur de l'industrie compte parmi les secteurs sur lequel agir en priorité afin de diminuer de façon significative les impacts environnementaux des activités humaines.

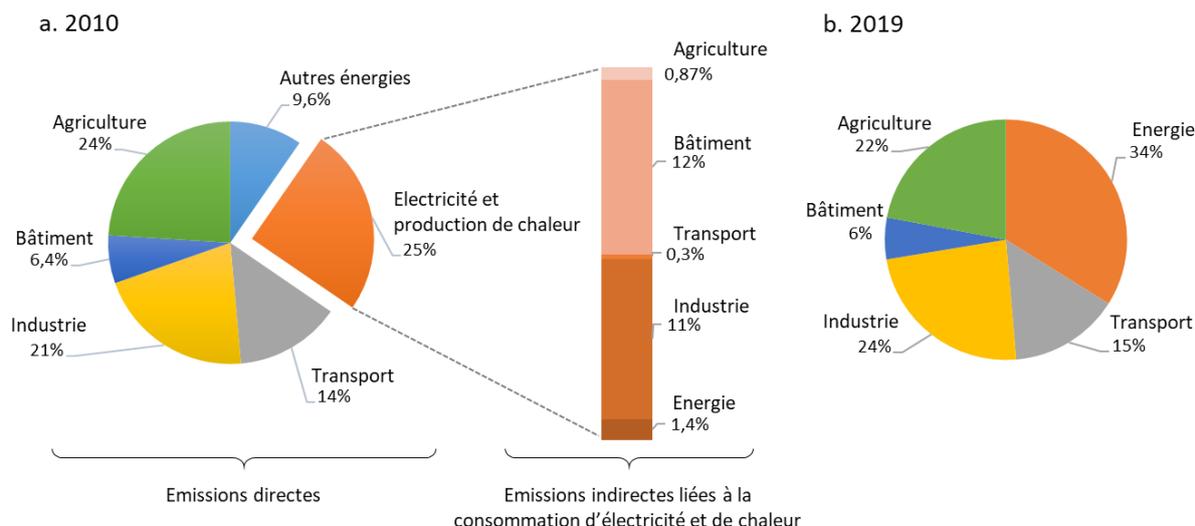


Figure 2 : Répartition des émissions mondiales de gaz à effet de serre par secteur d'activité : a. en 2010 [3] ; b. en 2019 [4].

### 1.1.1.2. Une réponse politique

Face au constat que les activités humaines ont des conséquences néfastes sur l'environnement à différentes échelles, un consensus existe aujourd'hui sur la nécessité d'agir. Afin de répondre à ces problématiques environnementales, certains engagements politiques ont été pris. En 2015 par exemple, tous les états membre de l'ONU ont adhéré à un programme visant à réduire les inégalités, la pauvreté et protéger l'environnement [5]. Ce programme est divisé en 17 objectifs de développement durable (Figure 3). Ayant été identifié comme responsable d'impacts environnementaux majeurs, le secteur de l'industrie manufacturière est logiquement visé par ce programme (objectif 9).

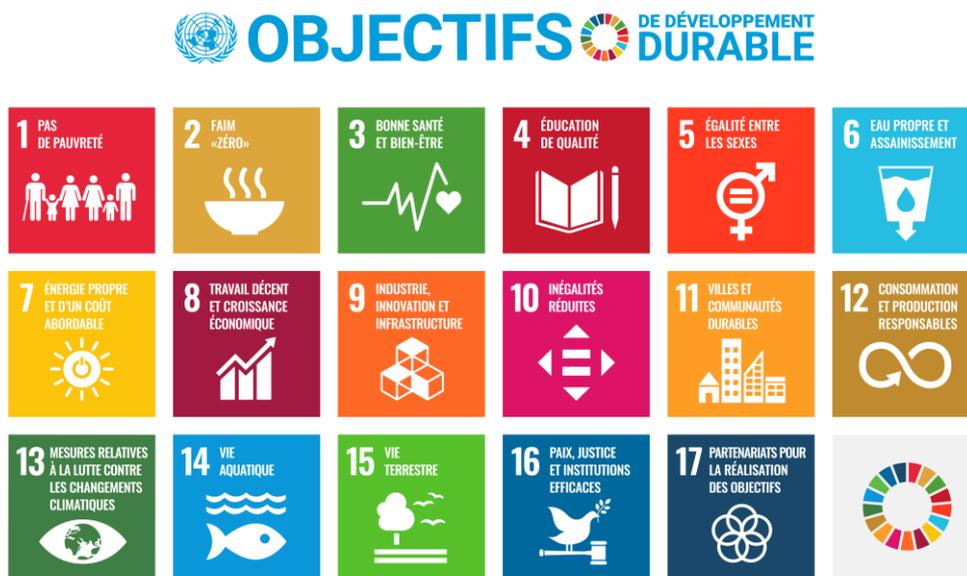


Figure 3 : Les objectifs de développement durable [5].

Pour réaliser l'objectif de diminution de l'impact environnemental des activités industrielles, différents leviers peuvent être actionnés par les états signataires de ce programme. La mise en place de réglementations est par exemple un moyen d'imposer des changements de pratiques afin de prendre en compte les enjeux environnementaux. La réglementation européenne REACH [6] a par exemple été

développée dans ce sens, pour sécuriser la fabrication et l'utilisation de substances chimiques dans l'industrie. Une autre voie consiste à allouer des subventions pour récompenser les initiatives de diminution des impacts environnementaux de l'industrie. C'est par exemple le choix qu'a fait l'état français lors de la mise en place de son *plan de soutien à l'aéronautique pour une industrie verte et compétitive* [7] visant à soutenir la filière aéronautique durant la crise sanitaire du COVID tout en demandant en contrepartie aux industriels des efforts de réduction des impacts environnementaux de leurs produits et procédés.

#### 1.1.1.3. Des engagements industriels

D'un point de vue industriel, la diminution des impacts environnementaux des activités de production est évidemment un enjeu important pour des raisons de responsabilité sociétale des entreprises. Il est également important d'ajouter que la transition environnementale est aussi un enjeu de compétitivité pour les entreprises industrielles, nécessaire pour se protéger en anticipant les changements réglementaires ou bien obtenir des financements.

Motivés par ces deux enjeux, on peut noter aujourd'hui la volonté de certaines entreprises à avancer sur les objectifs de transition environnementale. Cette volonté se traduit par exemple par la croissance du nombre d'entreprises ayant mis en place un système de management environnemental et obtenu la certification ISO 14 001 [8] (multiplication par 3 en 15 ans Figure 4). A une échelle locale, on peut également souligner l'initiative de plus de 80 entreprises du grand-ouest de la France, autour du pôle de compétitivité EMC2, d'un *Manifeste pour une industrie éco-responsable* [9].

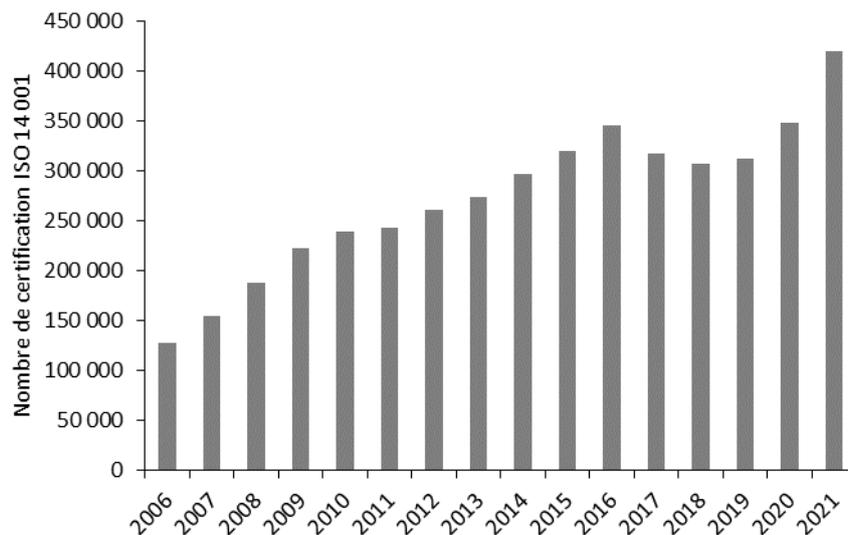


Figure 4 : Evolution mondiale du nombre d'entreprises ayant un système de management environnemental certifié ISO 14001 (source des données : ISO Survey).

Les travaux de cette thèse sont motivés par ce contexte. **Ils visent à participer à la diminution des impacts environnementaux des activités industrielles, en se concentrant sur les activités de production de pièces en matériaux composites.**

Ces travaux sont réalisés dans le cadre du programme PERFORM (Programme de Recherche Fondamentale et de Ressourcement sur le Manufacturing) de l'IRT Jules Verne qui est soutenu en partie par plusieurs acteurs industriels. Dans le cadre de ce programme de thèse, déployé dans le but de stimuler la recherche amont dans le domaine du manufacturing, **nos travaux ont été suivis par des industriels du secteur aéronautique.**

### 1.1.2. Besoin d'évaluation des impacts environnementaux

Une démarche très générale pour atteindre les objectifs de réduction des impacts environnementaux dans n'importe quelle organisation a été formalisée dans la norme ISO 14001 qui traite de la mise en place d'un système de management environnemental [8]. D'un point de vue général, cette méthodologie s'appuie sur une stratégie d'amélioration continue, représentée sur la Figure 5. Elle ne fixe pas d'exigences chiffrées mais se traduit par une volonté constante d'améliorer les performances environnementales en répétant de façon itérative des étapes de définition des objectifs environnementaux et de planification des actions, de mise en œuvre du plan d'action établi, de vérification de l'efficacité du plan mis en œuvre puis éventuellement de corrections des actions pour mener à bien les objectifs fixés.

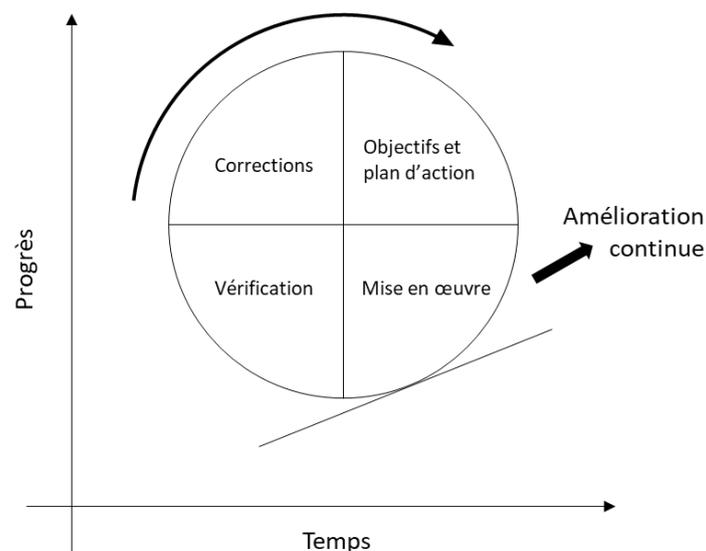


Figure 5 : Stratégie d'amélioration continue proposée dans la norme ISO 14001, d'après [8].

Finalement, les différentes étapes proposées dans cette méthodologie soulignent le besoin essentiel de mesures régulières des impacts environnementaux. Ces évaluations permettent alors d'évaluer l'efficacité des mesures déployées. **L'évaluation des impacts environnementaux est donc centrale pour atteindre les objectifs de réduction de ceux-ci.**

### 1.1.3. Nécessité d'intégration de considérations environnementales

Dans l'industrie, les problèmes environnementaux qui ont été discutés précédemment doivent être gérés simultanément avec les enjeux techniques et économiques qui conditionnent aussi le bon fonctionnement et la durabilité des entreprises. Ce concept de durabilité a d'ailleurs été défini de façon plus générale comme la capacité à satisfaire les besoins présents sans compromettre la capacité à satisfaire les besoins futurs [10]. Il est souvent représenté comme l'équilibre de trois volets : social, environnemental et économique.

Dans le secteur de l'industrie des procédés, cette définition de durabilité a fait naître le concept de fabrication durable (*Sustainable Manufacturing*) qui fait l'objet d'un intérêt croissant [11]. La Figure 6 témoigne de l'augmentation très rapide ces dernières années des publications avec pour mots clés « *sustainable* » et « *manufacturing* ». L'objectif poursuivi consiste à développer des modes de production viables d'un point de vue technique, économique et environnemental.

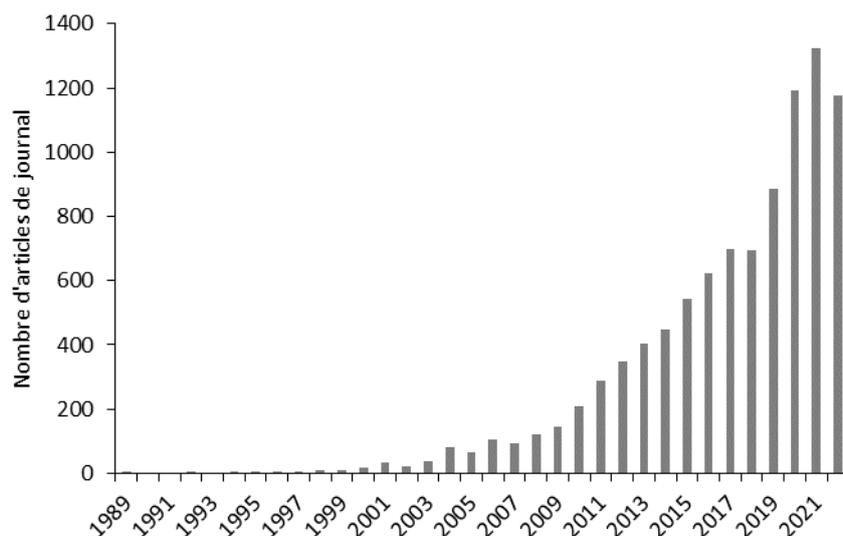


Figure 6 : Nombre d'articles de journal publiés avec les mots clés « sustainable » et « manufacturing » entre 1990 et 2022 (Source des données : Scopus en avril 2023).

Pour s'inscrire dans cette dynamique et répondre aux enjeux de la durabilité, les aspects environnementaux traités dans cette thèse doivent être couplés aux aspects technico-économiques des procédés de fabrication de composites. **Les travaux présentés dans cette thèse se positionnent alors sur la problématique multi-objectifs de recherche de la diminution de l'impact environnemental des procédés de fabrication de pièces en composites tout en s'assurant de la production de pièces aux propriétés conformes aux attentes de qualité techniques et de coût de revient.** Dans ces travaux de thèse, le pilier social de la durabilité n'est pas étudié.

## 1.2. Développement du marché des composites

Selon les données parues dans le JEC Composite Magazine d'avril-mai 2023 [12], le développement des composites se poursuit à une vitesse importante. L'utilisation de composites a ainsi enregistré une croissance annuelle en masse de 4 % entre 2010 et 2019. Suite à la crise sanitaire, une diminution de l'utilisation des composites a cependant été enregistrée en 2020 (Figure 7). Néanmoins, cet évènement n'a pas stoppé l'engouement porté aux matériaux composites. La croissance annuelle du marché des composites s'est malgré cela maintenue à un niveau de 3 % durant la période 2019-2022 et les projections tablent sur le maintien d'un niveau de croissance de 3 % à 4 % pour la période 2022-2027. Parmi les différents secteurs utilisant les matériaux composites, les applications de transport (automobile, maritime, aéronautique) sont les premières consommatrices, représentant entre 34 % et 39 % de la consommation annuelle totale de composite. En particulier, le secteur aéronautique est celui qui a enregistré la plus forte croissance annuelle d'utilisation de composites avant la crise sanitaire (+ 7 % pour la période 2010-2019). Bien qu'impactée lourdement par la crise (- 10 % entre 2019 et 2022), les projections d'utilisation des composites dans ce secteur restent élevées avec une estimation de croissance annuelle de + 6 % entre 2022 et 2027.

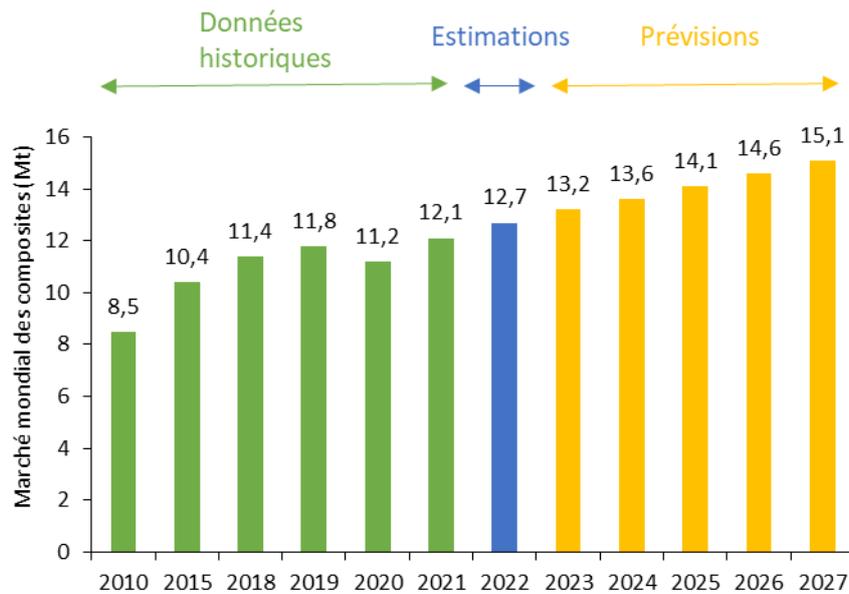


Figure 7 : Evolution du marché mondial des composites en masse entre 2010 et 2022 et perspectives d'évolution du marché entre 2022 et 2027 [12].

Dans le secteur aéronautique, on observe récemment une volonté de transition des matériaux composites à matrices thermodurcissables vers les composites à matrices thermoplastiques en raison notamment de leur meilleur potentiel de recyclabilité [13]. Ce phénomène se traduit par une croissance de l'utilisation des composites thermoplastiques dans l'aéronautique depuis plusieurs années et avec une accélération ces dernières années évaluée à 9 % entre 2018 et 2023 [14].

Finalement, le choix de travailler sur les procédés de fabrication de pièces en composite est aussi appuyé par l'utilisation de plus en plus fréquente de ces matériaux. En effet, la combinaison de cette croissance du secteur des composites avec les objectifs de réduction globale des impacts environnementaux impose de réduire les impacts environnementaux de chaque pièce en composite.

### 1.3. Problématique, objectif et plan du manuscrit

#### 1.3.1. Problématique et objectif

Pour répondre aux enjeux environnementaux actuels, une transition environnementale de l'industrie est nécessaire. Pour cela, la mise en place d'évaluations environnementales des activités industrielles est la base sur laquelle s'appuyer pour avancer sur l'objectif de réduction des impacts environnementaux. Afin d'être durable, cette transition doit alors concilier la diminution des impacts environnementaux des activités de production avec les impératifs techniques et les objectifs économiques du monde industriel. Par rapport à ce contexte, nous avons choisi de nous concentrer sur le secteur des matériaux composites à matrice thermoplastique en raison de sa dynamique de croissance. Les travaux de cette thèse traitent donc de la problématique qui peut être formulée en :

**Comment évaluer puis exploiter des indicateurs environnementaux pour diminuer l'impact environnemental de la fabrication de pièces composites afin de répondre aux enjeux actuels de transition environnementale ?**

#### 1.3.2. Plan du mémoire de thèse

Ce mémoire de thèse est organisé en 7 chapitres avec une structuration qui s'inspire des principales étapes de la méthode générale d'Analyse de Cycle de Vie. Dans ce chapitre 1, une introduction du contexte a permis d'établir les motivations et d'exprimer la problématique de ce travail de thèse. Le chapitre 2 est ensuite consacré à une analyse de la littérature traitant de l'analyse environnementale des procédés de fabrication de pièces composites. Le chapitre 3 détermine comment réaliser l'étape de description du champ de l'étude en s'appuyant sur le cas du thermoformage-estampage. Le chapitre 4 se concentre ensuite sur l'étape d'analyse d'inventaire en donnant des précisions d'application pour les procédés composites. L'application de cette méthode permet d'établir une expression des flux d'inventaire du procédé de thermoformage-estampage sous la forme de fonctions dépendantes des paramètres du procédé, comme par exemple les températures de mise en forme. Dans le chapitre 5, des méthodes d'exploitation des données d'inventaire sont présentées afin de réaliser une analyse environnementale et économique. Le chapitre 6 présente ensuite des outils de simulation qui permettent d'évaluer certains flux d'inventaire. Un modèle thermique permettant de calculer la consommation minimale d'énergie du procédé de thermoformage-estampage est présenté. Un outil de calcul de formage permettant le calcul des consommations de matériau composite y est également décrit. Le chapitre 7 propose enfin des méthodes de prise de décisions multicritères sur le procédé de fabrication. Le problème traité dans ce chapitre est le choix des paramètres du procédé dans le but de diminuer l'impact environnemental et le coût de fabrication des pièces tout en assurant la meilleure qualité technique possible. Enfin, une conclusion viendra dresser la synthèse des travaux, leur bilan vis-à-vis de la problématique de recherche énoncée et proposera des perspectives d'évolution.

## Chapitre 2

# Etat de l'art sur l'évaluation et l'intégration de critères environnementaux lors de la fabrication de pièces en composites

---

2.1. Introduction .....	26
2.2. Méthode générale d'évaluation environnementale.....	26
2.2.1. La méthode d'Analyse de Cycle de Vie .....	26
2.2.2. Application à des procédés de fabrication .....	27
2.3. Le secteur des matériaux composites.....	28
2.3.1. Les matériaux composites .....	28
2.3.2. Diversité de procédés de fabrication de pièces composites .....	31
2.4. Evaluation et intégration de critères environnementaux lors de la fabrication de pièces en composites .....	33
2.4.1. Stratégies de réduction de l'impact environnemental des procédés composites .....	33
2.4.2. Synthèse des méthodologies d'analyse environnementale, économique et d'exploitation multicritère déployées pour le cas des procédés composites .....	42
2.5. Conclusion.....	48

---

## 2.1. Introduction

Dans ces travaux de thèse, l'objectif poursuivi consiste à contribuer à la réduction des impacts environnementaux de la fabrication de pièces en composites. Pour cela, les travaux présentés dans ce mémoire cherchent à déterminer comment évaluer puis exploiter des indicateurs environnementaux pour les procédés composites afin de participer à une réponse aux enjeux de durabilité actuels. Pour répondre à cette problématique, une étude bibliographique a été menée pour fonder les bases de nos travaux. Dans une première partie, la méthode générale d'Analyse de Cycle de Vie dédiée à la réalisation d'évaluations environnementales est présentée et son application au cas des procédés composites est discutée. Le secteur des matériaux composites est ensuite détaillé dans une seconde partie qui précise les formulations de matériaux, les procédés de fabrication et les avantages de ce domaine. Enfin, la dernière partie de ce chapitre se consacre spécifiquement à l'analyse des travaux d'évaluation environnementale de la fabrication de pièces composites. Dans cette partie, les différentes stratégies utilisées pour répondre à l'objectif de réduction des impacts environnementaux de la fabrication de pièces composites sont listées. Chaque travail d'évaluation environnementale de procédés composites est alors détaillé avec une attention particulière faite aux méthodologies utilisées. Un bilan de ces méthodologies est ensuite présenté pour analyser comment ont été évalués les impacts environnementaux des procédés composites puis comment les résultats ont été exploités et couplés à des évaluations technico-économiques plus traditionnelles.

## 2.2. Méthode générale d'évaluation environnementale

### 2.2.1. La méthode d'Analyse de Cycle de Vie

Les premiers travaux d'évaluation environnementale de produits ont été réalisés à la fin des années 1960. Depuis, le débat scientifique coordonné par la SETAC (*Society for Environmental Toxicology and Chemistry*) et l'UNEP (*United Nation Environmental Programme*) ont permis la standardisation d'une méthode d'évaluation, appelée Analyse de Cycle de Vie (ACV) [15]. Normalisée pour la première fois en 1997 (ISO 14040:1997), cette méthode a fait l'objet d'une mise à jour en 2006 (ISO 14040:2006) [16]. Aujourd'hui, l'ACV est la méthode la plus utilisée pour réaliser des analyses environnementales [15].

L'ACV comporte 4 grandes étapes présentées sur la Figure 8 et détaillées ici :

#### Définition de l'objectif et du champ d'étude :

Il s'agit de la première étape à réaliser. L'objectif de l'étude et l'application envisagée sont clairement énoncés. Une description complète du système étudié est réalisée avec des précisions sur les frontières du système étudié et les limites de l'étude. Les flux de matières et d'énergie qui entrent et qui sortent du système sont décrits. Ces flux sont appelés flux d'inventaire.

#### Analyse d'inventaire :

Cette étape consiste à quantifier les flux de matière et d'énergie entrants et sortants du système étudié. Il s'agit de collecter des données relatives à tous les flux d'inventaire pris en compte dans l'étude et décrits lors de l'étape précédente.

#### Evaluation de l'impact :

Cette étape consiste à calculer les impacts environnementaux à partir des données d'inventaire. Il existe différentes méthodes d'évaluation des impacts ainsi que différents indicateurs d'impacts environnementaux rassemblés dans trois catégories principales appelées aires de

protection qui représentent les cibles impactées par les impacts environnementaux : la santé humaine, les ressources naturelles et l'écosystème.

Interprétation :

Cette étape est itérative et consiste en l'analyse des résultats obtenus à chaque étape. Elle permet d'évaluer les résultats obtenus par rapport aux objectifs de l'étude et d'en tirer des conclusions, tout en établissant les limites de l'étude.

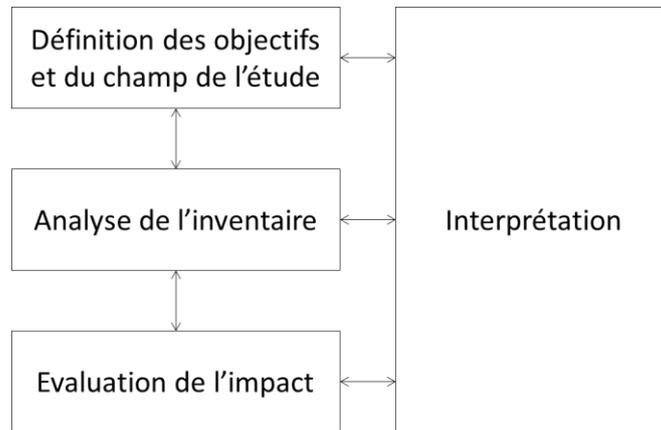


Figure 8 : Schéma des différentes étapes de la méthode ACV (ISO 14 040) [16].

Le cycle de vie d'un produit peut être décomposé en quatre grandes étapes présentées sur la Figure 9 : une étape d'extraction des matières premières, une étape de fabrication, une étape d'utilisation et une étape de fin de vie. La méthode ACV permet d'évaluer les impacts environnementaux d'un produit tout au long de ce cycle de vie mais le périmètre de l'étude peut aussi être réduit pour réaliser des analyses environnementales focalisées sur les premières étapes du cycle de vie de produits.

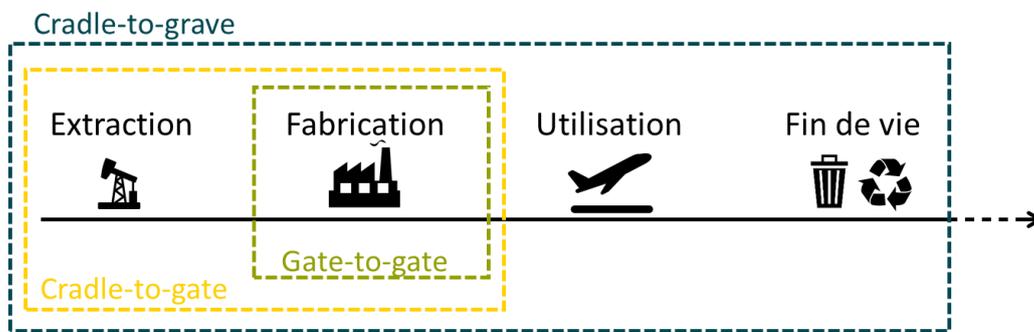


Figure 9 : Périmètres d'étude couramment employés en ACV : « Cradle-to-grave » : du berceau à la tombe ; « Cradle-to-gate » : du berceau à la porte ; « Gate-to-gate » : « porte à porte ».

2.2.2. Application à des procédés de fabrication

L'ACV est une méthode standardisée qui reste très générale car elle a été développée pour évaluer les impacts environnementaux de n'importe quelle activité ou produit sur une partie ou la totalité de son cycle de vie. Cette démarche donne peu de précisions quant à la réalisation de ses principales étapes (Figure 8) pour l'étude spécifique des procédés de transformation de matières premières en produits manufacturés. L'application de la méthode ACV pour l'évaluation de l'impact environnemental de l'étape de fabrication de pièces n'est donc pas directe et demande à la personne réalisant l'étude de faire des choix d'application de cette méthodologie générale. Lors de la première étape de définition du champ de l'étude, la personne qui réalise l'étude doit juger du périmètre de l'étude et des flux d'inventaire à prendre en compte en fonction des objectifs poursuivis. Des questions se posent

également pour l'étape d'analyse d'inventaire. Les moyens de collecte des données d'inventaire à utiliser ainsi que leur mise en œuvre ne sont par exemple pas détaillés dans la méthodologie. Afin de faciliter les travaux d'analyse environnementale des procédés de fabrication, il apparaît donc nécessaire de guider les choix à faire pour appliquer la méthode ACV.

Ayant identifié cette « lacune », quelques travaux ont déjà permis d'apporter des précisions pour l'application de la méthodologie ACV sur les procédés de fabrication. Durant l'initiative européenne CO2PEI, Kellens *et al.* ont ainsi proposé la méthode UPLCI (Unit Process Life Cycle Inventory) spécifique à l'étape d'analyse d'inventaire [17]–[19]. Cette méthode décrit de façon générale comment collecter, documenter et présenter des données d'inventaire associées à des procédés de fabrication. Elle propose de décomposer le procédé en plusieurs étapes unitaires (appelées aussi processus unitaires) qui représentent le plus petit élément pris en compte dans l'analyse environnementale. Les flux d'inventaire entrants et sortants de chaque étape unitaire sont listés puis évalués à partir de bases de données, de la littérature ou bien de mesures expérimentales. Des travaux sur les machines-outils ont également été réalisés et ont abouti à une série de cinq normes ISO 14955 qui traitent de leur évaluation environnementale. La norme NF ISO 14955-1 [20] propose par exemple une méthodologie pour concevoir des machines-outils qui consomment un minimum d'énergie lors de leur utilisation. La norme NF ISO 14955-2 [21] définit quant à elle une méthode pour mesurer les consommations d'énergie de machines-outils durant leur phase d'utilisation. Des indications pour les mesures d'énergie consommée par les machines-outils pour le travail du bois sont données dans la norme NF ISO 14955-5 [22]. Les normes NF ISO 14955-3 [23] et NF ISO 14955-4 [24] traitent des mesures de l'efficacité énergétique des machines-outils d'usinage par enlèvement de matière métallique, de formage de métaux et des machines laser.

Les travaux de cette thèse proposent de participer à la réduction des impacts environnementaux de la phase de fabrication de pièces en composites. **À ce titre, la méthode ACV est utilisée comme référence pour réaliser les analyses environnementales qui sont nécessaires pour évaluer l'efficacité des dispositions proposées dans ces travaux pour quantifier puis réduire les impacts environnementaux.** Les travaux de cette thèse se concentrent sur l'étape de fabrication de pièces en composites, l'utilisation d'un périmètre de type Gate-to-gate sera donc pertinente. Le caractère général de la méthode ACV empêche une application directe aux procédés de fabrication de pièces en composites, **des précisions doivent donc être apportées à chaque étape de la méthode pour les procédés composites étudiés dans ces travaux de thèse.** Pour identifier les verrous associés à l'établissement de ces précisions au cas particulier des procédés composites, deux travaux doivent être menés : une étude du secteur des matériaux composites pour intégrer les spécificités du secteur des matériaux composites et des procédés de fabrication associés ainsi qu'une analyse des travaux d'évaluation environnementale spécifiques à la fabrication de pièces composites pour tirer un bilan des pratiques utilisées. Ces travaux sont présentés dans la suite de ce chapitre.

## 2.3. Le secteur des matériaux composites

### 2.3.1. Les matériaux composites

#### 2.3.1.1. Diversité de matériaux composites

Les composites à matrice polymère sont définis comme l'assemblage de deux matériaux non miscibles de nature et de propriétés différentes : une matrice polymère qui assure la cohésion et le transfert du chargement mécanique avec un renfort. La combinaison de ces matériaux permet d'obtenir un matériau plus performant que ses composants pris séparément [25]. En outre, l'avantage majeur de cette famille de matériaux réside dans leurs bonnes propriétés mécaniques spécifiques (propriétés

mécaniques rapportées à la densité) comparée à d'autres familles de matériaux (Figure 10). Cette propriété permet alors de produire des pièces structurales légères favorisant la pénétration de ces solutions dans le domaine des transports.

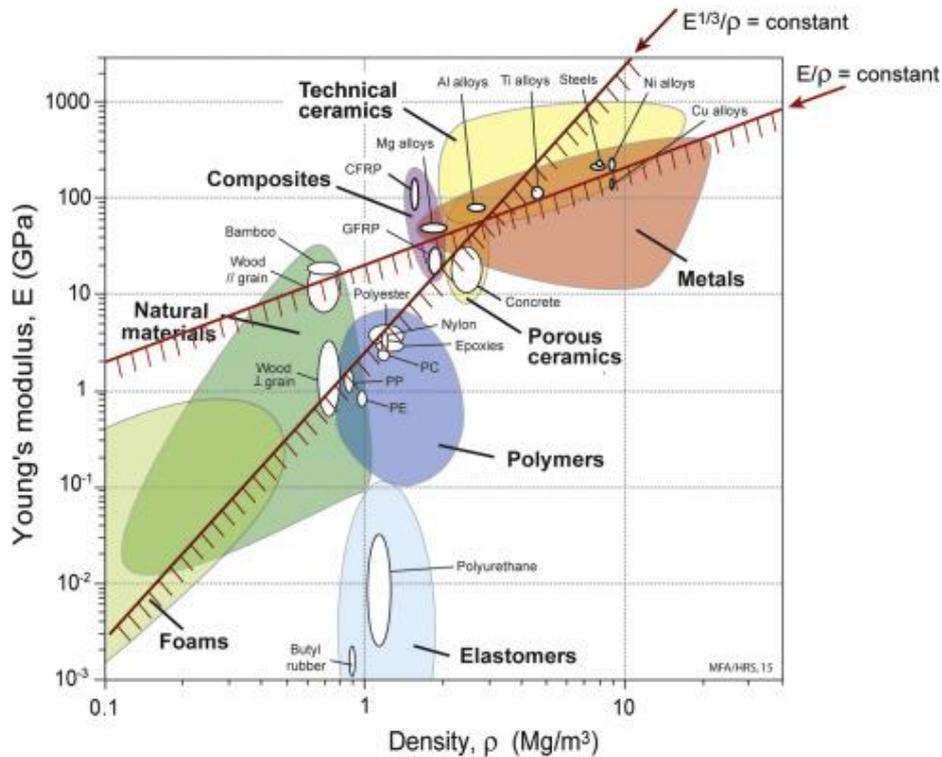


Figure 10 : Diagramme d'Ashby comparant le module d'élasticité et la densité de différentes familles de matériaux [26].

Les renforts utilisés dans les composites polymères peuvent se présenter sous deux facteurs de forme différents : des particules ou bien des fibres (longues ou courtes). Dans ces travaux de thèse, on s'intéresse aux composites polymères renforcés par des fibres continues. L'utilisation de renforts fibreux implique une forte anisotropie des propriétés mécaniques qui dépendent de l'orientation des fibres dans le matériau, le maximum de résistance mécanique étant obtenu dans le sens des fibres. Les fibres utilisées dans les composites peuvent être de différentes natures, par exemple des fibres de verre, de carbone ou bien des fibres naturelles comme le lin ou le chanvre. Il s'entend alors que les propriétés mécaniques de ces différents types de fibres varient (Tableau 1), ce qui a une conséquence directe sur les propriétés mécaniques du matériau composite produit à partir de ces fibres. Outre les différences de matériau possibles entre les fibres, les renforts fibreux peuvent se présenter sous différentes formes : des nappes unidirectionnelles ou multi-axiales, des tissus ou encore des mats. Les fibres utilisées peuvent alors être de différentes longueurs, ce qui a aussi une influence sur les propriétés mécaniques du composite : pour des fibres de même nature, l'utilisation de fibres plus longues augmente en général les propriétés mécaniques du matériau.

Tableau 1 : Résumé des propriétés mécaniques de fibres haute performances [27].

Fibre	Densité (g/cm³)	Module d'Young (GPa)	Résistance à la traction (MPa)	Elongation à rupture (%)
Verre E*	2,52 - 2,60	72 - 77	3400 - 3700	3,3 - 4,8
Carbone HM**	1,76 - 1,96	300 - 500	1750 - 3200	0,35 - 1,0
Aramide	1,39 - 1,47	58 - 186	2760 - 3620	1,9 - 4,4

\* Verre E : fibre de verre la plus commune (E car initialement développé pour une application électrique) ; \*\*HM : Haut Module.

Deux familles de matrices polymères peuvent être employées pour fabriquer des pièces en matériaux composites : thermodurcissables ou thermoplastiques. Dans cette thèse, on s'orientera vers l'étude des composites à matrice thermoplastique car leur plus grand potentiel de recyclabilité par rapport aux composites à matrice thermodurcissable a été identifié comme une opportunité pour réduire l'impact environnemental de la fin de vie des pièces composites [28]. Il existe un grand nombre de résines thermoplastiques employées dans les composites. Ces matériaux peuvent être classés par rapport à leurs performances mécaniques et à leur capacité à cristalliser, comme présenté sur la Figure 11. Naturellement, les propriétés mécaniques de la résine thermoplastique choisie ont une influence sur les propriétés mécaniques du matériau composite fabriqué.

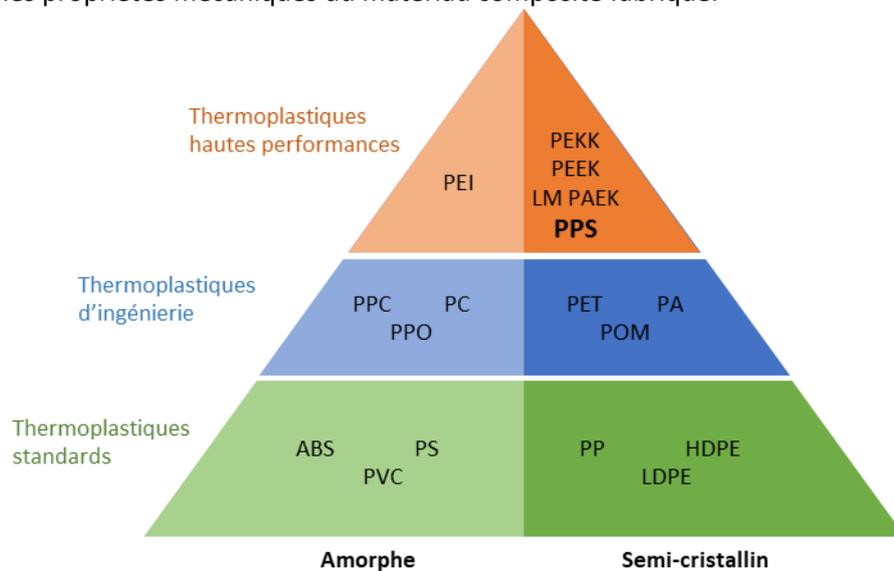


Figure 11 : Principales résines thermoplastiques utilisées dans les composites [13].

Il existe finalement un grand nombre de matrices et de renforts fibreux permettant de réaliser des pièces en composites. Le grand nombre de couples matrice/fibre possible implique qu'il est difficile de proposer des résultats généraux relatifs à l'impact environnemental de la fabrication de pièces pour chaque formulation de matériau composite possible. **Par conséquent, une réponse à la problématique de diminution de l'impact environnemental des procédés composite au cœur des travaux de cette thèse consistera en la proposition d'une méthodologie applicable à ces différentes configurations.**

#### 2.3.1.2. Les bénéfices environnementaux d'une réduction de la masse des pièces

Le potentiel de diminution de la masse de pièces structurales grâce à l'utilisation des matériaux composites plutôt que d'autres classes de matériaux, tels que les métaux, peut être particulièrement intéressant d'un point de vue environnemental pour certaines applications de transport. En effet, la réduction de la masse des pièces entraîne une diminution de la consommation de carburant ce qui peut engendrer dans certains cas une diminution de l'impact environnemental de la pièce sur son cycle de vie complet. Pour cela, il faut que les bénéfices environnementaux liés aux économies d'énergie pendant la phase d'utilisation compensent les différences d'impacts environnementaux durant les autres phases du cycle de vie des pièces comparées [29]. Cette condition s'exprime sous la forme d'un seuil de distance parcourue par la pièce à partir de laquelle cette compensation devient bénéficiaire.

Pour des applications aéronautiques, l'utilisation de matériaux composites, au lieu de matériaux métalliques traditionnels, permet systématiquement de réduire l'impact environnemental des pièces sur leur cycle de vie complet [29]. En travaillant sur la substitution des alliages d'aluminium par un composite époxy renforcé par des fibres de carbone dans une section de fuselage de Boeing 787, Timmis *et al.* ont par exemple évalué ce seuil entre 95 000 km et 170 000 km (équivalent à entre 105

h et 188 h de vol) [30]. La distance seuil à parcourir est donc très rapidement atteinte et elle est également très inférieure à la durée de service d'un appareil, estimée par les auteurs à 150 millions de kilomètres. Pour des applications automobiles, le bilan est plus contrasté. Il est nécessaire de traiter la question au cas par cas car l'utilisation des composites ne permet pas toujours de diminuer l'impact environnemental des pièces sur leur cycle de vie complet [29]. Witik *et al.* ont par exemple comparé l'impact environnemental de l'utilisation de plusieurs matériaux composites et de l'acier pour la fabrication d'une cloison d'automobile qui sépare le coffre et l'habitacle [31]. Les résultats de ces travaux montrent que la distance à partir de laquelle l'utilisation de composite est amortie est très variable selon le matériau utilisé pour remplacer l'acier. Pour du polyamide 6 renforcé par des fibres de verre il suffit de parcourir environ 25 000 km. Cependant, cette distance est évaluée à 162 000 km pour du polyuréthane renforcé par des fibres de carbone, proche par conséquent de la distance parcourue en moyenne par une voiture sur son cycle de vie complet (entre 150 000 km et 250 000 km [32]).

**Dans cette thèse, le choix d'étudier les matériaux composites est donc appuyé par le fait que, pour certaines applications et notamment l'aéronautique, l'utilisation de ces matériaux est pertinente par rapport aux enjeux actuels de réduction des impacts environnementaux.**

### 2.3.2. Diversité de procédés de fabrication de pièces composites

#### 2.3.2.1. Principe de mise en œuvre des composites

La mise en œuvre des matériaux composites pour la fabrication de pièces requiert de remplir plusieurs objectifs :

- Une bonne adhérence entre les fibres et la matrice de façon à transférer les chargements mécaniques aux fibres ;
- Une orientation correcte des fibres de façon à obtenir le maximum de résistance mécanique dans le sens de sollicitation de la pièce ;
- Un taux approprié de fibres et une distribution uniforme des fibres dans la matrice pour assurer une homogénéité des propriétés mécaniques dans le volume du matériau ;
- Une polymérisation ou une solidification complète de la matrice, selon la nature thermodurcissable ou thermoplastique de celle-ci ;
- Une présence limitée de porosités, qui sont à l'origine d'une diminution des propriétés mécaniques du matériau (les porosités constituent des sites de concentration de contraintes pouvant favoriser l'amorçage de fissures et donc la rupture) ;
- Le respect de la géométrie de la pièce, à coût et délai maîtrisés.

Pour mettre en œuvre les matériaux composites en remplissant ces objectifs, un nombre important de procédés de fabrication ont été développés pour répondre à la variété des exigences de coût de production, de performances mécaniques des pièces fabriquées, de cadence de production ainsi que de taille et géométrie des pièces fabriquées [27] (Tableau 2). Les procédés composites peuvent être divisés en deux catégories. Une première catégorie de procédés, dite en voie humide, consiste à réaliser l'imprégnation du renfort fibreux en même temps que la pièce composite est réalisée. Les procédés de moulage au contact et d'infusion font par exemple partie de cette catégorie. Par opposition, les procédés en voie sèche sont des procédés de fabrication qui se décomposent en deux étapes. Tout d'abord, la résine thermodurcissable ou thermoplastique est introduite dans le renfort fibreux de façon à l'imprégner. Le matériau ainsi produit, appelé pré-imprégné ou compound et présenté sous forme de plaques ou feuilles, est ensuite utilisé pour la fabrication de pièces lors d'une seconde étape de mise en forme et de consolidation. Les procédés de thermoformage ou moulage par compression sont des exemples de ce type de procédés.

Tableau 2 : Principaux procédés de mise en œuvre des composites, d'après [27].

Procédé	Quantité de pièces produites	Type de matrice*	Maturité du marché	
<b>Moulage par compression</b>	> 10 000	TD	Grande	
<b>Moulage des composites liquides</b>	RTM	> 10 000	TP & TD	Grande
	Wet pressing	> 10 000	TD	Moyenne
	Rotational moulding	< 10 000	TP & TD	Moyenne
<b>Dépose de fibre</b>	Tape laying	< 10 000	TP & TD	Grande
	Fibre placement	< 10 000	TP & TD	Grande
<b>Thermoformage</b>	> 10 000	TP	Moyenne	
<b>Pultrusion</b>	> 10 000	TP & TD	Grande	
<b>Enroulement filamentaire</b>	Rotating mandrel	< 10 000	TD	Grande
	Flexible robot	< 10 000	TD	Faible
<b>Moulage par injection</b>	> 10 000	TP & TD	Grande	
<b>Fabrication additive</b>	< 100	TP & TD	Faible	

\*TP : Thermoplastique ; TD : Thermodurcissable.

Finalement, il existe ainsi une très grande variété de procédés de fabrication de pièces en composites. Associée au grand nombre de choix de fibres et de matrices possibles pour formuler les matériaux composites, cette variété de procédés implique qu'un très grand nombre de configurations de production de pièces en composites est possible. Il apparaît alors encore plus difficile de proposer des résultats relatifs à l'impact environnemental de la fabrication de pièces composites pour chaque configuration procédé/matériau possible. **Par conséquent, la proposition d'une réponse méthodologique au problème de diminution de l'impact environnemental des procédés composites traité dans cette thèse semble adaptée.**

#### 2.3.2.2. Procédé de thermoformage-estampage

Le procédé de thermoformage-estampage est un procédé par voie sèche utilisé pour produire des pièces en composites à matrice thermoplastique. Ce procédé est notamment utilisé dans l'industrie aéronautique pour fabriquer des pièces comme le clip de fuselage présenté en Figure 12.



Figure 12 : Clip de fuselage d'A350 XWB produit par thermoformage-estampage par DAHER à Nantes [33].

Le procédé de thermoformage-estampage peut se décomposer en trois principales étapes qui sont décrites sur la Figure 13 . Une préforme de semi-produit est d'abord chauffée dans un four infrarouge (IR) jusqu'à ce que la fraction thermoplastique du matériau soit fondue. La plaque à haute température est ensuite transférée rapidement dans une presse. La température de chauffage du matériau est choisie assez haute pour que le matériau reste à l'état fondu après le transfert dans l'outillage monté

sous la presse. Le matériau, encore à l'état fondu, est enfin mis en forme et consolidé dans un moule maintenu à une température inférieure à la température de fusion de la matrice thermoplastique. Le choix de la température du moule a une influence sur la cinétique de refroidissement du matériau. Dans le cas où la matrice du matériau composite mis en forme est semi-cristalline (Figure 11), cette température joue sur le degré de cristallinité du thermoplastique et influence donc les propriétés mécaniques de la pièce fabriquée [34]. Une fois la pièce refroidie et le matériau thermoplastique solidifié, la pièce est démoulée. L'avantage de ce procédé est qu'il permet de fabriquer des pièces avec des cycles courts par rapport à d'autres procédés de fabrication. Ici, l'enchaînement des étapes qui vient d'être décrit est réalisé en quelques minutes là où d'autres procédés utilisés dans l'aéronautique, comme la consolidation en autoclave, nécessitent plusieurs heures pour produire des pièces.

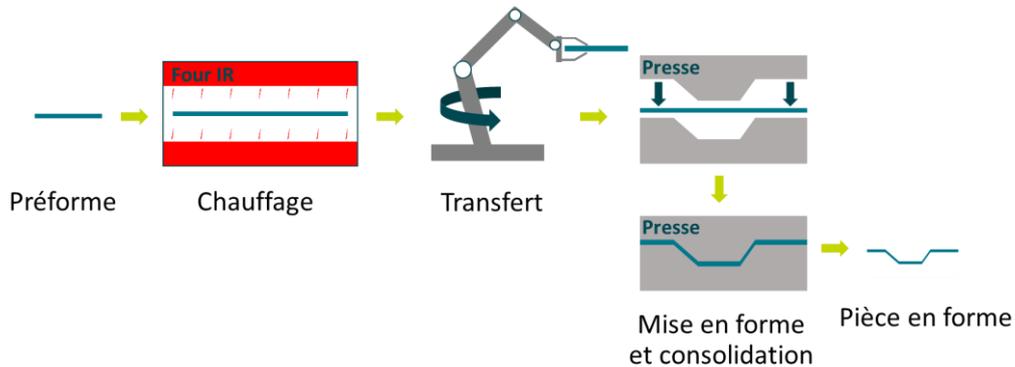


Figure 13 : Procédé de thermoformage-estampage.

**Dans mes travaux de thèse, le procédé de thermoformage-estampage de polysulfure de phénylène renforcé par des fibres de carbone (C/PPS) a été choisi comme cas d'étude de notre proposition méthodologique.** Ce choix est motivé par le fait que cette configuration matériau/procédé possède déjà un potentiel intéressant quant aux enjeux de diminution des impacts environnementaux. En effet, ce couple matériau/procédé est utilisé pour des applications aéronautiques qui sont un secteur où l'utilisation des composites est particulièrement intéressante d'un point de vue environnemental en raison du potentiel d'allègement des structures permis par ces matériaux. De plus, ce procédé permet la mise en œuvre des matériaux composites thermoplastiques tels que le C/PPS qui ont un potentiel de recyclabilité permettant de diminuer l'impact environnemental de la fin de vie des pièces par rapport à l'utilisation de matériaux à matrice thermodurcissable.

## 2.4. Evaluation et intégration de critères environnementaux lors de la fabrication de pièces en composites

### 2.4.1. Stratégies de réduction de l'impact environnemental des procédés composites

#### 2.4.1.1. Analyses comparatives pour le choix d'un couple matériau-procédé

##### 2.4.1.1.1. Etudes environnementales comparatives

Dans la littérature, des comparaisons de l'impact environnemental de la fabrication de pièces avec différents couples matériau-procédé ont été développées afin d'aider dans le choix de la configuration de production à adopter. Ces travaux proposent systématiquement des analyses environnementales (souvent par ACV) comparatives de plusieurs scénarios de production, c'est-à-dire plusieurs couples matériau-procédé, pour la fabrication d'une pièce donnée. Les résultats environnementaux obtenus permettent ensuite d'identifier le couple matériau-procédé causant le moins d'impacts environnementaux. Il sera alors considéré comme le mieux adapté et donc le procédé à retenir :

- Dans une ACV « cradle-to-grave », Wegmann *et al.* [35] ont comparé sept scénarios de production pour la fabrication d'un capot de voiture : emboutissage métallique d'acier et d'aluminium, procédé RTM de mise en forme de PA6 renforcé par des fibres de verre et d'époxy renforcé par des fibres de verre ou de carbone et thermoformage-estampage de polycarbonate renforcé par des fibres de verre. **Ce travail est, à notre connaissance, la seule étude environnementale d'un procédé de thermoformage-estampage.** Dans cet article, les données d'inventaire utilisées ont été obtenues par des mesures expérimentales, des calculs de thermique et d'après la base de données Ecoinvent. Les résultats de cette étude environnementale, calculés avec la méthode Impact 2002+, montrent alors que la stratégie utilisant le procédé de thermoformage-estampage est la moins impactante d'un point de vue environnemental comparé aux autres stratégies de fabrication de pièces composites et métalliques évaluées.
- Plusieurs travaux de comparaison de procédés ont été menés avec un périmètre resserré autour de la phase de production de pièces à l'Universita Polytecnica delle March d'Ancône. Forcellese *et al.* ont proposé une comparaison d'un procédé RTM, d'un procédé de moulage par compression PBM (*Pressure Bag Molding*) et d'un procédé en autoclave pour la fabrication d'un capot de voiture en époxy renforcé par des fibres de carbone [36], [37]. Dans un autre travail, Bianchi *et al.* ont comparé la fabrication de coques de chaussures de sécurité en polycarbonate (PC) injecté avec le moulage par compression de chutes de prepreg thermodurcissable [38]. Ces différents travaux de cette équipe de recherche proposent une approche des ACV « cradle-to-gate » intégrant la fabrication du moule au périmètre considéré. Les impacts environnementaux sont alors calculés par l'intermédiaire de la méthode ReCiPe ainsi qu'avec la CED (*Cumulative Energy Demand*) et le GWP (*Global Warming Potential*) à partir de données d'inventaire issues de la littérature, de la base de données Ecoinvent et de relevés expérimentaux. Les résultats obtenus montrent, selon les études, que le procédé RTM et le moulage par injection présentent les impacts environnementaux les moins importants.
- Salles *et al.* ont travaillé sur la comparaison du drapage automatisé avec le drapage manuel [39]. Pour cela, les auteurs ont réalisé l'ACV de la fabrication d'un longeron oméga d'Airbus. Celui-ci est en polymère thermodurcissable renforcé par des fibres de carbone et l'étude est menée dans le périmètre « gate-to-gate » qui intègre aussi la consommation d'énergie de l'usine. Les résultats de l'évaluation, calculés avec les indicateurs GWP et PED (*Primary Energy Demand*) à partir de mesures de consommations d'énergie des procédés, montrent que le procédé automatisé a l'impact environnemental le plus faible. Ce résultat s'explique par le fait que la consommation d'énergie électrique supplémentaire des bras robotisés par rapport au drapage manuel est compensée par les économies d'énergies liées au raccourcissement de la durée de production qui permettent une réduction de l'énergie consommée par l'usine durant le procédé de fabrication.

#### 2.4.1.1.2. Comparaison environnementale et économique de procédés

Les travaux de comparaison de procédés de fabrication sur des critères exclusivement environnementaux ont permis d'identifier des scénarios de production qui permettent de réduire les impacts environnementaux. Cependant, ces travaux ne suffisent pas en pratique pour choisir le procédé à utiliser dans un contexte industriel puisqu'ils ne prennent pas en compte les enjeux économiques qui conditionnent le bon fonctionnement des entreprises. Certains travaux de comparaison de procédés composites ont donc couplé les évaluations environnementales à des évaluations économiques. Dans la plupart de ces travaux, l'exploitation des résultats

environnementaux et économiques est ensuite réalisée de façon indépendante afin d'identifier la meilleure solution d'un point de vue environnemental et la meilleure solution d'un point de vue économique. Ce type d'exploitation des résultats a permis en général de choisir le procédé à utiliser puisque dans ces cas-là le procédé le moins impactant pour l'environnement est aussi celui le moins coûteux :

- Des travaux d'une équipe de recherche de l'université de Patras en Grèce se sont intéressés à la fabrication d'une verrière d'hélicoptère en résine époxy renforcée par des fibres de carbone [40], [41]. Différents scénarios sont comparés, combinant deux stratégies de fin de vie (recyclage mécanique et pyrolyse) associées à cinq couples matériau-procédé : autoclave avec matrice époxy, autoclave avec matrice PEEK, RTM avec matrice époxy, ainsi que RTM avec matrice PEEK et un procédé de moulage par compression CDF (*Cold Diaphragm Forming*) avec matrice PEEK. Pour mener l'analyse environnementale, une étude ACV est réalisée dans un périmètre intégrant l'extraction, la production et la fin de vie pour calculer les impacts environnementaux des procédés, exprimés avec l'indicateur GWP, à partir de données d'inventaire issues de la littérature. Le coût de fabrication est quant à lui calculé dans le même périmètre en faisant la somme du coût de la main d'œuvre, des matériaux, de l'énergie et du recyclage. Les résultats obtenus montrent alors que le scénario de fabrication en composite thermodurcissable avec le procédé RTM est le meilleur d'un point de vue économique et environnemental.
- Witik *et al.* ont comparé plusieurs scénarios de fabrication de pièces aéronautiques en résine époxy renforcée par des fibres de carbone [42]. Les auteurs ont confronté l'utilisation d'un autoclave avec celle d'un four à micro-ondes et d'un four traditionnel pour la consolidation d'un panneau de dimensions 400 x 400 x 4 mm<sup>3</sup> fabriqué à partir de prepreg ou bien après infusion d'une préforme sèche. Pour l'analyse environnementale, une ACV dans un périmètre « cradle-to-gate » a été réalisée pour calculer les impacts environnementaux du procédé avec la méthode Impact 2002+ à partir de données d'inventaire issues de la littérature et de la base de données Ecoinvent, complétées par les relevés des consommations d'énergie électrique de l'autoclave et des fours. Le coût des procédés est également calculé comme la somme des coûts de main d'œuvre, de coûts directs (matériaux, énergie) et de coûts indirects (machines, site de production) associés à des scénarios d'amortissement. Les résultats de ces travaux montrent alors que les procédés d'infusion avec polymérisation hors autoclave sont meilleurs d'un point de vue économique et d'un point de vue environnemental.

L'exploitation distincte des résultats environnementaux et économiques ne permet cependant pas facilement de faire un choix de procédé dans le cas où, parmi plusieurs procédés comparés, la meilleure solution environnementale ne coïncide pas avec la meilleure solution économique. Cette situation s'est présentée dans un travail de l'équipe de recherche italienne de l'Universita Polytechnica delle Marche d'Ancône dans lequel Vita *et al.* ont comparé les procédés PBM et autoclave pour la fabrication d'un diffuseur arrière de voiture de luxe en résine époxy renforcée par des fibres de carbone [43]. Dans ces travaux, l'évaluation environnementale est réalisée avec la méthode ACV sur un périmètre « cradle-to-gate » incluant le cycle de vie complet des outillages (moules). En utilisant des données d'inventaire issues de la littérature, de la base de données Ecoinvent mais aussi de relevés électriques, les impacts environnementaux des procédés comparés sont calculés avec la méthode ReCiPe. Le coût du procédé est également évalué : il est défini comme la somme des coûts des matières premières, des consommables, de la main d'œuvre, de l'énergie consommée et des outillages (distribué en fonction du nombre de pièces produites). Les résultats obtenus dans ces travaux montrent alors que le scénario en autoclave est le meilleur d'un point de vue environnemental alors

que le scénario PBM est le meilleur d'un point de vue économique. Dans ce type de cas, il est alors nécessaire de faire un arbitrage entre les objectifs de réduction des impacts environnementaux et les contraintes du monde économique afin de trouver la solution qui apporte le meilleur compromis.

Face au besoin de faire des compromis par rapport aux objectifs environnementaux et économiques qui sont poursuivis lors du choix d'un procédé, des outils d'aide à la décision sont nécessaires pour exploiter les critères économiques et environnementaux de façon simultanée. Sur cette thématique, un seul travail de recherche qui propose un tel outil dans le cadre des matériaux composites a été détecté dans la littérature. Ce travail de Gouveia *et al.* utilise un indicateur unique qui agrège les informations environnementales et économiques pour réduire la complexité de faire un choix sur plusieurs indicateurs [44]. Dans cet article, les auteurs ont travaillé dans le cadre de la comparaison de deux alternatives (un procédé en autoclave et un procédé sous presse) pour la polymérisation d'un panneau composite sandwich aéronautique en résine époxy renforcée par des fibres de carbone et de PE. L'évaluation environnementale, menée avec la méthode ACV dans un périmètre « cradle-to-gate », se base sur des données d'inventaire issues de mesures expérimentales et de données de la littérature pour calculer les impacts environnementaux des procédés étudiés traduits dans un single-score avec la méthode ReCiPe. D'un point de vue économique, le coût de production est calculé comme la somme des coûts des matériaux, de l'énergie et de la main d'œuvre. Les indicateurs environnementaux et économiques sont alors exploités simultanément pour construire un indicateur d'éco-efficacité  $E$  calculé comme le ratio entre la valeur de service de la pièce, définie comme le prix de vente de la pièce moins le coût de fabrication, et son impact environnemental (*single score* en Pt) :

$$E = \frac{\text{prix de vente} - \text{coût de fabrication}}{\text{single score}}$$

L'évaluation de cet indicateur d'efficacité pour les deux procédés étudiés a alors montré la supériorité de la consolidation en autoclave.

Dans cette section, l'analyse des travaux de la littérature a démontré que le choix du procédé de fabrication était une opportunité de réduire l'impact environnemental de la fabrication de pièces en composites. La mise en œuvre de cette stratégie nécessite cependant de disposer de plusieurs procédés différents, ce qui n'est pas toujours le cas en pratique dans les entreprises industrielles. De ce fait, une stratégie visant à réduire l'impact environnemental d'un procédé composite particulier est légitime.

#### 2.4.1.2. Amélioration d'un procédé composite en particulier

##### 2.4.1.2.1. Influence des réglages du procédé sur son impact environnemental

Une approche développée dans la littérature pour la réduction de l'impact environnemental de la phase de fabrication de pièces en composites consiste à s'intéresser à un procédé en particulier dans le but d'en diminuer les impacts environnementaux. À ce titre, des travaux d'évaluation environnementale de procédés particuliers ont été réalisés. Certains de ces travaux ont alors montré que les résultats d'inventaire et, par conséquent, les impacts environnementaux des procédés composites sont dépendant du réglage de ses paramètres (températures, pressions de consolidation par exemple) :

- Müller *et al.* ont travaillé sur un procédé de fabrication de profils creux fonctionnalisés en PA6 renforcé par des fibres de verre pour une application automobile [45]. Utilisant la méthode ACV avec une approche « gate-to-gate », les auteurs se sont focalisés sur la collecte de données de consommation d'énergie en utilisant différents réglages des paramètres du procédé. Pour une étape de chauffage infrarouge du matériau, des relevés de consommation

d'énergie ont été réalisés en fonction de la température de départ. Ces résultats montrent alors que la consommation d'énergie de la phase de chauffage infrarouge (IR) peut varier de 30 % en fonction des réglages du four.

- Hohmann *et al.* se sont intéressés à un procédé RTM de fabrication de pièces en résine époxy renforcées par des fibres de carbone pour une application automobile [46]. L'évaluation environnementale de ce procédé est réalisée avec la méthode ACV dans un périmètre « cradle-to-gate » et avec comme unité fonctionnelle la fabrication d'1 kg de pièce composite. Avec cette définition d'unité fonctionnelle, les auteurs ont choisi de négliger les potentielles variations de la qualité technique des pièces produites que peut engendrer l'utilisation de différentes configurations de production. Cela limite alors l'analyse des résultats qui peut être faite ainsi que leur exploitation pour faire des choix dans un contexte de production. Dans ces travaux, l'analyse d'inventaire est réalisée grâce à des relevés expérimentaux de consommation d'énergie, d'air comprimé et d'eau complétés par des données de la littérature. En particulier, différents jeux de paramètres du procédé sont utilisés lors des relevés électriques : 20 paramètres, tels que la pression d'injection ou encore la température du moule lors de l'étape RTM, sont étudiés en les faisant varier un à la fois dans une fenêtre procédé. Pour chacune des configurations de paramètres testées, les impacts environnementaux sont calculés avec la méthode CML en se concentrant sur deux indicateurs : PED et GWP. Les résultats obtenus montrent que les réglages du procédé peuvent avoir une très grande influence sur son impact environnemental : des variations de - 77 % et de + 700 % sont en effet observées pour l'indicateur PED.

Ce constat montre la nécessité d'intégrer la dépendance aux réglages des paramètres lors des travaux d'analyse environnementale de procédés composites, en proposant par exemple des valeurs d'impacts liées à ces réglages plutôt que des valeurs fixes. Par conséquent, la réduction de l'impact environnemental des procédés composites peut passer par le choix des réglages de leurs paramètres. Cette tactique de réduction des impacts environnementaux du procédé demande cependant de tenir compte de l'influence qu'ont aussi les réglages des paramètres sur la qualité technique des pièces produites. En effet, le choix des configurations de réglages étudiées doit se faire sous la contrainte du respect des critères techniques définis dans le cahier des charges de la pièce produite. **Il semble ainsi qu'il n'existe pas une valeur unique d'impact environnemental pour la fabrication d'une pièce avec un couple matériau-procédé donné mais plutôt une plage de valeurs d'impacts associée à l'ensemble des configurations des réglages du procédé qui permettent de produire des pièces conformes aux attentes techniques.**

#### 2.4.1.2.2. Etudes multicritères de procédés composites

Pour les mêmes raisons que celles évoquées précédemment, la réduction des impacts environnementaux des procédés composites doit être conjuguée avec les critères économiques du monde industriel. Plusieurs travaux de la littérature répondent à cette nécessité en proposant des évaluations environnementales de procédés composites particuliers couplées à des évaluations économiques. Les résultats de ce type de travaux sont alors exploités afin de proposer des actions pour réduire l'impact environnemental du procédé.

La première exploitation de ce type de résultats consiste à identifier les causes majeures d'impacts environnementaux et de coût afin d'établir un plan d'actions. Cette stratégie a été adoptée par Al-Lami *et al.* dans leur étude de la fabrication d'une nervure d'aile d'avion par un procédé d'infusion avec polymérisation en autoclave de matériau époxy renforcé par des fibres de carbone [47]. Dans ces travaux, les auteurs ont réalisé une ACV « cradle-to-gate » en s'appuyant sur des données mesurées

au laboratoire afin de calculer les impacts du procédé avec un indicateur d'empreinte carbone. Le coût de production est quant à lui calculé comme la somme du coût de l'énergie, des matériaux et de la main d'œuvre. Le coût des équipements est également intégré et calculé en fonction de la durée d'utilisation des machines. Les résultats ainsi obtenus ont alors permis de déterminer que, d'un côté, la main d'œuvre et les fibres de carbone consommées étaient responsables des coûts les plus importants alors que, d'un autre côté, les fibres de carbone consommées et l'énergie consommée par l'autoclave causaient les plus grands impacts environnementaux. L'identification de la main d'œuvre comme poste de coût important s'explique ici par le fait que le taux horaire utilisé est élevé (82 €/heure). Au vu de ces résultats, les auteurs ont finalement proposé des pistes d'action pour l'amélioration du procédé : réduction des chutes de matériau et réduction de la consommation d'énergie de l'étape de polymérisation en autoclave, par exemple en réalisant des cycles plus courts et en augmentant le nombre de pièces produites par cycle d'utilisation. D'autres actions sur le procédé sont également envisageables, comme par exemple des modifications des lignes de production. Cette approche a par exemple été développée par Alemam et Li qui ont ainsi travaillé sur le procédé de Diaphragm Forming [48]. Dans ces travaux, les différentes étapes du procédé sont vues comme des fonctions qui peuvent être remplies par différentes technologies. Le choix de la technologie est alors considéré comme une opportunité de réduction de l'impact environnemental du procédé.

Une autre approche pour répondre à l'objectif de réduction des impacts environnementaux consiste à gérer les réglages des paramètres des procédés composites. Comme évoqué dans la partie précédente, cette stratégie nécessite de considérer l'évolution de la qualité technique des pièces produites pour s'assurer de leur conformité. Des travaux de la littérature ont ainsi intégré des évaluations techniques des pièces produites aux évaluations environnementales des procédés dans le but d'étudier l'influence du réglage des paramètres des procédés de fabrication :

- Brecher *et al.*, du Fraunhofer Institute for Production Technology d'Aachen, ont étudié le procédé de dépose de fibre automatisé assistée par laser [49]. L'influence du paramètre de vitesse de dépose, en lien avec la puissance du laser, a été évaluée grâce à la comparaison de la fabrication d'éprouvettes d'essais mécaniques avec cinq jeux de paramètres différents. Pour deux des scénarios étudiés, une étape de thermoformage est ajoutée de façon à assurer une bonne consolidation. L'impact environnemental de chaque scénario est évalué avec la méthode ACV « gate-to-gate » en se basant sur des relevés expérimentaux de consommation d'énergie pour calculer l'impact environnemental GWP. Le coût de production est aussi calculé comme la somme des coûts des machines, de l'énergie et de la main d'œuvre, excluant le coût du matériau puisqu'il est égal dans tous les scénarios comparés. La résistance mécanique des pièces produites est enfin caractérisée par des essais mécaniques de flexion 3 points pour mesurer la résistance au cisaillement interlaminaire, la résistance en flexion et le module de flexion du matériau. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation de la vitesse de dépose permet de réduire le coût et l'impact environnemental du procédé mais engendre également une diminution des propriétés mécaniques des pièces produites. L'addition d'une étape de thermoformage permet cependant de pallier cette diminution de propriétés mécaniques, montrant l'intérêt environnemental d'une stratégie de dépose à grande vitesse avec l'ajout d'une étape supplémentaire de thermoformage.
- Un article de l'équipe de recherche de l'Universita Polytécnica delle Marche d'Ancône s'est intéressé à l'influence des paramètres d'un procédé de fabrication additive de composite sur l'impact environnemental et les propriétés mécaniques des pièces fabriquées [50]. Bianchi *et al.* ont étudié le procédé de dépôt de fil fondu pour la fabrication de composites PA renforcés par des fibres courtes de carbone et de verre. L'objectif poursuivi par les auteurs est d'évaluer

l'influence des paramètres de température d'extrusion, de l'épaisseur des couches déposées et de la vitesse de dépose sur l'impact environnemental du procédé et les propriétés des pièces fabriquées. Pour cela, une ACV est réalisée dans un périmètre « cradle-to-gate » incluant également la phase de fin de vie. En utilisant des données de consommation d'énergie et de matériau composite mesurées lors de l'étape de fabrication ainsi que des données secondaires issues de la littérature et de bases de données, les impacts environnementaux CED et GWP sont calculés. Par ailleurs, des essais de flexion et de traction ont aussi été réalisés sur des éprouvettes imprimées en 3D afin de quantifier leurs propriétés mécaniques. Les résultats de ces travaux analysés séparément ont permis d'établir des règles d'évolution des indicateurs environnementaux et techniques utiles pour le réglage du procédé. Les auteurs ont ainsi montré qu'à une vitesse de dépose donnée, il était intéressant d'un point de vue environnemental d'augmenter l'épaisseur des couches déposées car cela permet de réduire la consommation d'énergie du procédé. Une réduction des consommations d'énergie est également accessible en augmentant la vitesse de dépose, pour une épaisseur de couche fixée. Enfin, la température d'extrusion optimale, évaluée à 260 °C a été identifiée par les auteurs puisqu'à plus faible température des problèmes d'adhésion sont rencontrés alors qu'à plus haute température la consommation d'énergie augmente sans amélioration claire de la qualité des pièces.

Dans ces travaux, la stratégie d'analyse des résultats environnementaux, techniques et économiques consiste à étudier de façon séparée ces différents aspects. Ce genre d'analyse dissociée ne permet cependant pas toujours d'aller au bout de la démarche en déterminant les réglages à utiliser. C'est ce qu'ont montré Rani *et al.* dans leurs travaux sur l'influence des réglages du procédé d'infusion avec polymérisation micro-onde sur l'énergie consommée (choisie comme indicateur environnemental) et les propriétés mécaniques des pièces en époxy renforcé par des fibres de verre [51]. Dans ces travaux, sept plaques de matériau ont été produites : six plaques ont été polymérisées par micro-ondes en utilisant différents réglages de puissance et une plaque a été polymérisée dans un autoclave. Durant la fabrication de ces plaques, la consommation d'énergie a été mesurée expérimentalement à l'aide d'un énergimètre. Une fois fabriquées, les propriétés des plaques ont été testées : la densité des matériaux a été évaluée, de même que les propriétés mécaniques de résistance en traction, en flexion et de dureté. De plus, des essais DSC ont été réalisés pour déterminer le degré de conversion de la résine. La fraction volumique de fibres a aussi été mesurée par analyse thermogravimétrique en atmosphère inerte (N<sub>2</sub>) et une étude des faciès de rupture des éprouvettes des essais mécaniques a été menée pour identifier les mécanismes en jeu. Les résultats obtenus montrent la réduction significative de la consommation d'énergie que permet l'utilisation de micro-ondes pour la production de pièces aux propriétés mécaniques équivalentes : en termes d'ordre de grandeur, le procédé en autoclave consomme jusqu'à environ 36 fois plus d'énergie électrique que le procédé micro-onde pour la transformation d'1 kg de matériau. Les résultats montrent également que les meilleures propriétés mécaniques sont obtenues pour le niveau de puissance de 540 W alors que d'un point de vue énergétique, la consommation minimale est associée à un réglage de puissance de 180 W. Comme ces deux solutions de réglage ne coïncident pas, il est alors complexe de choisir le réglage de puissance à utiliser puisqu'un arbitrage entre le besoin de hautes propriétés mécaniques et l'objectif de réduction de la consommation d'énergie doit être réalisé. **Dans ce type de situations, il existe donc un besoin d'outils d'aide au choix des réglages des procédés.**

### 2.4.1.2.3. Outils d'analyse multicritères pour le choix de réglages de paramètres

Dans la littérature, quelques travaux de recherche ont proposé des outils permettant d'aider dans le choix de paramètres à utiliser afin de répondre à des objectifs environnementaux, économiques et techniques :

- Un outil graphique a été proposé par Le Gentil *et al.* afin de faciliter ce choix parmi un nombre fini de configurations de réglages du procédé de fabrication additive de composites par dépôt de fil fondu de PA12 renforcé par des fibres de carbone [52]. Dans ces travaux, l'influence de la température de la tête d'impression et de la stratégie de chauffage du plateau support sur le coût et la consommation d'énergie du procédé ainsi que sur la résistance en traction de pièces composites a été étudiée. Pour cela, un plan d'expérience factoriel complet à deux paramètres et à trois niveaux a été établi (9 expériences) pour la fabrication d'éprouvettes de traction. Durant la fabrication des pièces, des relevés électriques ont permis d'établir la consommation d'énergie relative à chaque scénario de production. Le coût de production de chaque pièce a également été calculé comme la somme des coûts des matériaux, de l'énergie électrique consommée et des consommables. Après la fabrication, les pièces ont été testées en traction afin d'évaluer leur module d'Young et leur résistance ultime à la traction (UTS). Les résultats de ces travaux ont alors permis d'aboutir à des informations environnementales (traduite par la consommation d'énergie), économiques et techniques (traduite par leur UTS) pour chacune des 9 configurations de paramètres étudiées. Afin de faciliter l'étude simultanée de ces trois aspects et donc d'aider dans le choix de la configuration de paramètres à employer, les auteurs proposent une représentation des résultats sous la forme d'un diagramme radar sur lequel sont tracées les valeurs normalisées des trois indicateurs (énergie, coût et UTS) pour chaque configuration de paramètres étudiée (Figure 14).

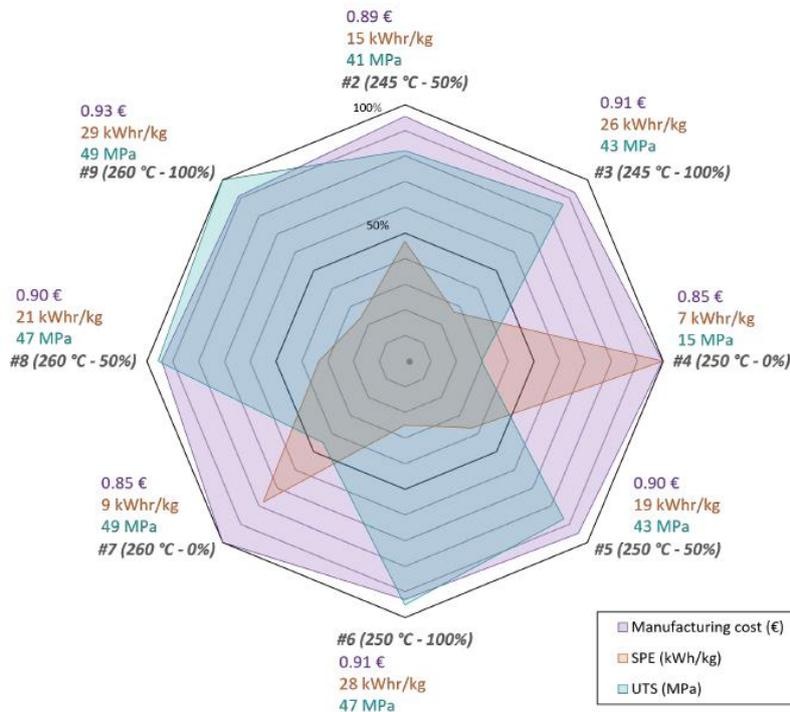


Figure 14 : Représentation sur un diagramme radar des résultats économiques, mécaniques et énergétiques des différentes configurations de paramètres testés pour aider à la décision [52].

- Des travaux de Katsiropoulos et Pantelakis de l'équipe de recherche de l'université de Patras en Grèce, proposent la définition d'un indicateur global qui intègre les dimensions techniques des pièces fabriquées, l'impact environnemental du procédé associé et le coût de la production [53]. Cet indicateur  $P$  est défini comme la somme pondérée avec des facteurs  $K_i$  de trois indicateurs normalisés de performance technique  $Q$ , environnementale  $E$  et économique  $C$  :

$$P = K_Q Q - K_{\text{coût}} C - K_{\text{env}} E$$

Afin de normaliser les indicateurs, la valeur de chaque indicateur est divisée par celle évaluée pour le procédé en autoclave choisi comme référence. L'idée développée dans ces travaux consiste alors à exprimer cet indicateur comme une fonction des réglages du procédé étudié. Cette expression peut ensuite être utilisée de façon à identifier les valeurs des réglages qui maximisent cet indicateur. Ces valeurs de réglages seront considérées comme celles à adopter.

Dans leurs travaux, les auteurs ont appliqué cette approche au procédé de placement de fibres automatisé de matériau PEEK renforcé par des fibres de carbone pour la fabrication d'un panneau de fuselage de Boeing 747. L'objectif recherché consiste alors à identifier la meilleure configuration pour quatre paramètres : la température de la buse, la vitesse de dépose, l'effort de compaction et la position de la buse. Le critère mécanique de résistance au cisaillement interlaminaire a alors été choisi pour exprimer la qualité technique des pièces produites. Des résultats d'essais issus de travaux de la littérature sont utilisés pour modéliser cet indicateur en fonction des quatre paramètres du procédé évoqués précédemment. Par ailleurs, l'évaluation environnementale a été réalisée avec la méthode ACV dans un périmètre comprenant la phase d'extraction, de fabrication et de fin de vie (recyclage par pyrolyse) pour calculer les impacts environnementaux du procédé avec la méthode ReCiPe à partir de données d'inventaire issues de la littérature et indépendantes des quatre paramètres du procédé étudié. Enfin, le coût du procédé a été calculé comme la somme du coût du matériau, de la main d'œuvre, de l'énergie consommée et de la fin de vie (recyclage). Afin de déterminer les facteurs de pondération  $K_i$ , une méthode basée sur des comparaisons par paires, qui évalue l'importance d'un critère par rapport à un autre, a ensuite été employée. Les facteurs de pondération sont alors dépendants de l'ordre de priorité choisi par celui qui mène l'étude. Cette approche est appliquée dans un exemple de scénario qui définit comme priorité les enjeux techniques et environnementaux. Les facteurs de pondération établis pour ce scénario ont permis d'exprimer complètement l'indicateur de performance agrégé  $P$ . Par un processus d'optimisation réalisée sous contrainte de qualité mécanique des pièces fabriquées, les auteurs ont finalement établi les valeurs des quatre paramètres du procédé qui maximisent  $P$ . Ces valeurs sont alors définies par les auteurs comme les réglages à utiliser pour la mise en œuvre du procédé de placement de fibres étudié.

L'approche proposée dans cet article se positionne sur la problématique d'optimisation d'un procédé de placement de fibres automatisé en choisissant ses meilleurs réglages parmi un ensemble important de configurations, contrairement aux travaux visant à faire un choix parmi un nombre fini de solutions. Par contre, cette méthodologie n'explique pas comment établir les modèles. L'utilisation d'un indicateur agrégé pour la prise de décision rend aussi plus opaque la prise de décision comparée par exemple à une approche graphique. On peut aussi se demander l'intérêt d'intégrer les critères de qualité dans la définition de l'indicateur puisqu'en réalité il s'agit uniquement d'une contrainte. Enfin, les motivations du choix de normaliser les indicateurs par rapport au procédé en autoclave ne sont pas décrites alors que ce choix peut influencer les résultats obtenus. D'autres méthodes de normalisation

existent comme par exemple une normalisation par rapport aux extremums des indicateurs du procédé étudié.

## 2.4.2. Synthèse des méthodologies d'analyse environnementale, économique et d'exploitation multicritère déployées pour le cas des procédés composites

### 2.4.2.1. Mise en œuvre de l'ACV pour l'évaluation environnementale

Dans les différents travaux de la littérature qui évaluent les impacts environnementaux des procédés de fabrication de pièces en composites, la méthode ACV est systématiquement employée. Néanmoins, cette méthode est générale, ce qui se manifeste par une hétérogénéité des choix d'application à chaque étape. Un bilan des approches utilisées dans la littérature pour chacune des étapes de l'ACV est présenté dans cette partie.

#### 2.4.2.1.1. Définition de l'unité fonctionnelle et du périmètre de l'étude

Dans la plupart des travaux, l'unité fonctionnelle est définie comme la fabrication d'une pièce particulière dont les secteurs d'application sont souvent l'automobile ou l'aéronautique. Cette définition impose des critères de qualité technique relatifs au cahier des charges de la pièce qui restent néanmoins implicites dans les différents travaux de la littérature puisque non détaillés. En pratique, ces critères de qualité induisent des contraintes sur la mise en œuvre du procédé et par conséquent sur ses réglages. Ils exercent donc une influence sur les valeurs d'impacts environnementaux du procédé de fabrication. Il existe ainsi une dépendance des résultats environnementaux au choix de la pièce étudiée qui pose des limites à la généralisation des résultats sur le cas d'autres pièces. Nos travaux viseront alors à proposer une approche différente pour l'étape de définition de l'unité fonctionnelle qui explicite les critères de qualité technique des pièces produites et vise à se soustraire au maximum à la dépendance au choix de la pièce.

Différents périmètres d'étude sont employés dans les travaux de la littérature, comme présenté dans le Tableau 3. Selon les études, d'autres phases du cycle de vie sont ajoutées à la phase de fabrication de la pièce, comme par exemple l'étape d'extraction des matières premières (périmètre « cradle-to-gate »), des étapes du cycle de vie des outillages employés ou encore l'étape de fin de vie de la pièce. **Dans nos travaux, il sera ainsi nécessaire de se pencher sur la question de la définition du périmètre de l'étude à considérer par rapport à l'objectif de réduction de l'impact environnemental de la fabrication de pièces en composites.**

#### 2.4.2.1.2. Analyse d'inventaire :

Pour l'étape d'analyse d'inventaire de la méthode ACV, plusieurs méthodes de collecte de données ont été utilisées dans la littérature. On note ainsi l'utilisation fréquente de données existantes qui proviennent de bases de données ou bien de la littérature. Certains travaux réalisent également des relevés expérimentaux pour la collecte de données d'inventaire telles que les consommations d'énergie des machines. En plus de ces méthodes de collecte de données, une autre approche proposée consiste à utiliser des outils de simulation des procédés. Cette approche est soutenue par Dér *et al.* qui ont développé une évaluation de la consommation d'énergie lors d'un procédé SMC en se basant sur une modélisation des phénomènes thermiques et mécaniques [54]. Il existe donc plusieurs solutions possibles parmi lesquelles il faut choisir pour collecter les données d'inventaire. Ce choix doit alors tenir compte de son influence sur le niveau de confiance dans la valeur des données collectées en lien avec des incertitudes sur les résultats environnementaux finaux. Par exemple, la réalisation de mesures assure une bonne corrélation entre la donnée et le système étudié et peut donc être associée à un haut niveau de confiance. L'utilisation de données existantes évaluées sur un

système qui peut présenter des différences avec le système étudié (machine, technologie utilisée, conditions d'utilisation ...) sera potentiellement associée à un niveau de confiance plus faible.

Tableau 3 : Synthèse des choix d'application de la méthode ACV des travaux d'évaluation de l'impact environnemental des procédés composites étudiés dans la section précédente.

Référence	Matériau	Procédés étudiés	Périmètre	Indicateurs d'impacts regardés
[35]	PA6/GF	RTM	Cradle-to-grave	Climate change (kg CO <sub>2</sub> eq) Ecosystem quality (PDF.m <sup>2</sup> .yr) Resources (MJ primary) de la méthode Impact 2002+
	Epoxy/GF			
	Epoxy /CF			
	PC/GF	Thermoformage-estampage		
[36], [37]	Epoxy /CF	RTM	Cradle-to-gate + fabrication de l'outillage	Indicateurs <i>midpoints</i> de la méthode ReCiPe Global Warming Potential (kg CO <sub>2</sub> eq) Cumulative Energy Demand (MJ)
		PBM		
		Consolidation en autoclave		
[38]	PC	Moulage par injection	Cradle-to-gate + cycle de vie complet de l'outillage	Single score endpoint (mPt) de la méthode ReCiPe Global Warming Potential (kg CO <sub>2</sub> eq) Cumulative Energy Demand (MJ)
	Epoxy /CF	Moulage par compression		
[39]	TD/CF	AFP	Gate-to-gate + utilisation du site de production	Global Warming Potential (kg CO <sub>2</sub> eq) Primary Energy Demand (MJ)
		Drapage manuel		
[40], [41]	PEEK/CF	Consolidation en autoclave	Cradle-to-gate + fin de vie	Global Warming Potential-100 (kg CO <sub>2</sub> eq)
	Epoxy /CF			
	PEEK/CF			
		CDF		
[43]	Epoxy /CF	Consolidation en autoclave	Cradle-to-gate + cycle de vie complet de l'outillage	Climate change (kg CO <sub>2</sub> eq) Single score endpoint (kPt) de la méthode ReCiPe
		PBM		
[42]	Epoxy /CF	Prepreg ou infusion + consolidation autoclave Prepreg ou infusion + consolidation micro-ondes Prepreg ou infusion + consolidation four traditionnel	Cradle-to-gate	Indicateurs endpoint de la méthode Impact 2002+
[44]	PE/CF	Consolidation sous-presse	Cradle-to-gate	Indicateurs midpoint, endpoint et single score de la méthode ReCiPe
		Consolidation en autoclave		
[45]	PA6/GF	Formage + moulage par injection	Gate-to-gate	Consommation d'énergie (kWh)
[46]	Epoxy /CF	RTM	Cradle-to-gate	Global Warming Potential (kg CO <sub>2</sub> eq) Primary Energy Demand (MJ) de la méthode CML
[47]		Infusion + consolidation en autoclave	Cradle-to-gate	Carbon footprint (kg CO <sub>2</sub> eq)
[51]	Epoxy /GF	Infusion + consolidation micro-ondes	Gate-to-gate	Consommation d'énergie (kWh)
[49]	PA6/CF	AFP	Gate-to-gate	Global Warming Potential (kg CO <sub>2</sub> eq)
[53]	PEEK/CF		Cradle-to-gate + fin de vie	Indicateurs midpoint de la méthode ReCiPe
[50]	PA/CF	FFF	Cradle-to-gate + fin de vie	Global Warming Potential (kg CO <sub>2</sub> eq) Cumulative Energy Demand (MJ)
[52]	PA12/CF		Gate-to-gate	Specific Energy Consumption (kWh/kg)

Comparaison de procédés ; CF : fibres de carbone ; GF : fibres de verre.

Pour répondre à la problématique du choix de la méthode de collecte des données d'inventaire de procédés composites, une seule approche a été proposée dans la littérature à notre connaissance. Lindner et Schmitt [55] ont développé une stratégie d'évaluation environnementale et économique qui est présentée sur la Figure 15. Cette approche repose sur deux étapes : une première évaluation rapide dont l'exploitation des résultats permet d'établir des recommandations pour, dans un second temps, la réalisation d'un travail plus détaillé. L'idée de la première étape est d'utiliser le plus possible des données disponibles en acceptant les incertitudes associées à l'utilisation de données génériques issues de la littérature et de bases de données. Des mesures expérimentales sont réalisées uniquement dans le cas où aucune donnée n'est disponible.

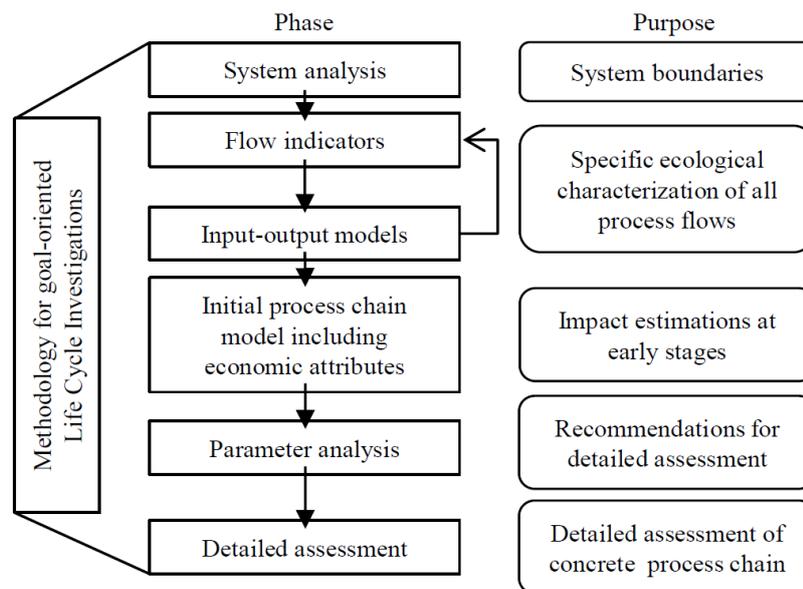


Figure 15 : Méthodologie d'évaluation environnementale et économique proposée par Lindner et Schmitt [55].

Pour illustrer cette méthodologie, les auteurs l'ont appliquée à l'évaluation environnementale d'un procédé développé lors du projet européen Stellar pour la production de panneaux intérieurs automobiles en PA6 renforcés par des fibres de carbone. Dans cette application, les impacts environnementaux du système sont calculés pour l'indicateur GWP en utilisant des données issues de la littérature et de bases de données, complétées par des relevés expérimentaux pour la consommation d'énergie d'une étape de dépose de fibre automatisée. Les résultats de cette première évaluation sont ensuite exploités afin de définir les recommandations pour l'étape d'évaluation détaillée. Plus concrètement, une analyse de sensibilité est réalisée pour évaluer l'influence sur le GWP d'une variation de 10 % des données d'inventaire censée représenter les incertitudes relatives à chacune d'entre elles. Les résultats obtenus montrent alors la nécessité de préciser les données de consommation de matériaux composite en priorité, par l'intermédiaire par exemple de relevés expérimentaux. Cependant, cette méthode reste perfectible car elle ne fait aucune distinction de niveaux de confiances entre les différentes données d'inventaire. Un point à améliorer consisterait alors à évaluer et prendre en compte les différents niveaux de confiance associés à chaque donnée d'inventaire pour pondérer l'identification des données à préciser. **Finalement, la question du choix de la méthode de collecte des données d'inventaire pour les procédés composites reste un axe de travail de cette thèse.**

Une fois la méthode de collecte des données choisie, il est ensuite nécessaire de la mettre en œuvre pour compléter l'étape d'analyse d'inventaire de la méthode ACV. Dans les travaux d'évaluation environnementale des procédés composites, peu d'informations sont disponibles quant à l'application pratique des différentes méthodes de collecte de données d'inventaire. En particulier, les approches expérimentales sont très peu détaillées [56]. Par ailleurs, l'analyse des travaux de la littérature a montré l'importante dépendance des données d'inventaire et donc des impacts environnementaux aux réglages des paramètres des procédés. Par conséquent, les travaux d'analyse d'inventaire doivent tenir compte des réglages des paramètres des procédés. **Un enjeu de nos travaux sera donc de déterminer comment appliquer les méthodes de collecte de données pour réaliser une analyse d'inventaire qui tient compte de l'influence des réglages procédé.**

#### 2.4.2.1.3. Calcul d'impact environnemental :

Des méthodes de calcul d'impacts environnementaux différentes, listées dans le Tableau 3, sont utilisées pour traduire les résultats des évaluations environnementales des procédés composites. On y remarque une utilisation fréquente d'indicateurs d'impacts relatifs au changement climatique, sans que des explications sur ce choix soient données et bien qu'il semble logique. On observe aussi une cohérence dans les choix de ces méthodes de calcul d'impact au sein des différentes équipes de recherche qui se sont penchées sur le sujet de l'évaluation environnementale des procédés composites. Par exemple, l'équipe de l'Universita Polytecnica delle Marche d'Ancône semble privilégier la méthode de calcul d'impact ReCiPe. Finalement, le choix des méthodes de calcul d'impact et des indicateurs environnementaux à exploiter n'est pas bien guidé pour le cas des procédés composites. Un autre enjeu de nos travaux sera de proposer une approche pour répondre à ce verrou.

#### 2.4.2.2. Méthode d'évaluation économique

Les travaux d'analyse environnementale des procédés composites ont été régulièrement couplés à des analyses économiques. Le coût de production a alors été défini comme la somme des coûts associés à chaque étape de fabrication. Selon les travaux, les périmètres pris en compte diffèrent, ce qui influence les postes de coûts qui sont intégrés. Un bilan des postes de coûts considérés dans les travaux proposant des évaluations environnementales et économiques des procédés composites est présenté dans le Tableau 4. On constate que les coûts directs de main d'œuvre ainsi que ceux associés à la consommation d'énergie, de matériau et de consommables sont la base de la majorité des évaluations économiques.

Avec ce type de définition, le coût du procédé est lui aussi dépendant des réglages du procédé puisqu'il est en partie calculé à partir de résultats d'inventaire comme la consommation d'énergie ou de matériau. Par conséquent, cette dépendance devra être prise en compte dans nos travaux d'analyse économique. D'autres coûts directs sont quelquefois pris en compte : le coût des machines et des outillages utilisés qui est distribué grâce à une notion d'amortissement sur la durée d'utilisation des équipements ou encore quelquefois le recyclage en fin de vie des pièces. Les postes de coûts indirects relatifs à la maintenance des systèmes et aux infrastructures ont également été pris en compte dans une étude de Witik *et al.* [42]. Face à l'hétérogénéité des ensembles de postes de coûts considérés dans la littérature, **il sera important de déterminer dans nos travaux quels sont les postes de coût à prendre en compte par rapport à l'objectif de maîtrise du coût du procédé poursuivi dans ce mémoire.**

Tableau 4 : Postes de coûts pris en compte dans les travaux d'analyse environnementale et économique de la littérature.

	[40], [41]	[43]	[42]	[44]	[49]	[47]	[51]	[52]	[53]
<b>Coûts directs</b>	Main d'œuvre	X	X	X	X	X			X
	Energie consommée	X	X	X	X	X	X	X	X
	Matériau	X	X	X	X		X		X
	Consommables	X	X	X	X		X		X
	Machines			X		X	X		
	Moule		X	X					
	Recyclage	X							X
<b>Coûts indirects</b>	Infrastructure			X					
	Maintenance			X					

X : Coût pris en compte ; Coût non pris en compte.

#### 2.4.2.3. Prise en compte de la qualité technique des pièces produites

Dans la plupart des travaux d'évaluation environnementale des procédés composites, les critères de qualité technique des pièces produites sont exprimés de façon implicite au moment de la définition de l'unité fonctionnelle. Dans le but de réduire l'impact environnemental de la fabrication de pièces composites, il faut opérer des modifications du système de production, comme par exemple des changements des réglages des paramètres. Ces changements entraînent alors des répercussions sur les propriétés techniques des pièces produites en plus d'influer sur l'impact environnemental de la phase de fabrication. Par conséquent, il est nécessaire d'évaluer de façon plus explicite les propriétés des pièces produites durant la mise en œuvre de ces stratégies.

Dans la littérature, certains travaux d'évaluation environnementale ont alors également étudié les propriétés techniques des pièces fabriquées en fonction des réglages du procédé. Pour cela, des essais de caractérisation de différents indicateurs présentés dans le Tableau 5 ont été réalisés sur les pièces produites, avec souvent l'utilisation d'approches standardisées. En plus de ces indicateurs, il existe un nombre important d'autres façon de quantifier la qualité technique de pièces composites (respect de la géométrie recherchée, autres propriétés mécaniques). En pratique, le choix des indicateurs de qualité technique peut dépendre des attentes formulées dans le cahier des charges des pièces. Dans nos travaux, on cherchera à intégrer des critères de qualité technique des pièces produites.

Tableau 5 : Indicateurs de qualité technique des pièces fabriquées intégrés dans les analyses environnementales des procédés composites.

Référence	Indicateur de qualité technique évalué (méthode standardisée utilisée)
[49]	Résistance au cisaillement interlaminaire (ISO 14130)
	Résistance en flexion
	Module de flexion (ISO 14125)
[50]	Densité
	Résistance en traction et en flexion (ASTM D3039 et ASTM D790-17)
	Dureté
	Degré de conversion de la résine
[52]	Fraction volumique de fibres
	Module d'Young (ISO 527-1:2012)
[53]	Résistance au cisaillement interlaminaire

#### 2.4.2.4. Méthode d'exploitation multicritères

Pour être applicable au monde de l'entreprise, l'objectif de réduction de l'impact environnemental de la phase de fabrication de pièces en composites doit être accompagné d'un objectif de maîtrise des coûts de production et d'une contrainte de respect de la qualité technique des pièces produites. Cela implique alors d'exploiter de façon simultanée les résultats d'évaluations environnementales, économiques et techniques. Dans la littérature, l'approche la plus employée consiste à analyser les trois résultats indépendamment les uns des autres. Cette approche a permis d'identifier les meilleurs couples matériau-procédé ou les meilleures configurations de paramètres procédés lorsque les meilleures solutions d'un point de vue environnemental coïncidaient avec les meilleures solutions d'un point de vue économique ou technique [40]–[42], [49]. Cette approche a cependant montré ses limites dans le cas où cette coïncidence des meilleures solutions n'était pas assurée [43], [51] démontrant par conséquent le besoin d'outils d'aide à la décision permettant de trouver des compromis sur les enjeux économiques, environnementaux et techniques. Dans cette perspective, quelques travaux se sont penchés sur la question et ont proposé des outils. Un outil graphique d'aide à la décision a ainsi pu être proposé : il permet de visualiser de façon simultanée des indicateurs environnementaux, économiques et techniques de façon à choisir parmi un nombre réduit de solutions possibles [52]. D'autres outils ont également été développés avec comme motivation la réduction du nombre d'indicateurs pour traduire la problématique multicritère en un problème monocritère [44], [53]. L'idée qui est alors développée consiste à définir un indicateur qui agrège les informations environnementales, économiques et techniques. Ce type d'indicateur peut alors être utilisé pour la comparaison d'un nombre fini de solutions ou bien pour la recherche d'une solution optimale par un processus de minimisation de l'indicateur.

Finalement, très peu d'outils d'aide à la décision multicritère ont été proposés pour les procédés composites, que ce soit pour appliquer une stratégie de choix incluant les considérations environnementales pour les procédés ou pour les configurations de paramètres. Pourtant, un certain nombre d'outils d'aide à la décision multicritère ont déjà été développés dans le domaine plus large de la production manufacturière et ont été recensés par Gupta et Ilgin [57]. Dans leur ouvrage, les auteurs différencient deux principales approches : les méthodes qualitatives et les méthodes quantitatives. Les méthodes qualitatives tout d'abord sont utiles pour choisir parmi un nombre fini de solutions et sont par conséquent adaptées à la stratégie de choix de couple matériau-procédé. Par ailleurs, les méthodes quantitatives sont intéressantes pour trouver une solution dans des espaces continus de possibilités, comme par exemple pour identifier une configuration optimale de paramètres. Ces méthodologies peuvent ainsi être adaptées à la problématique de réduction de l'impact environnemental des procédés composites. **Un des enjeux des travaux présentés dans ce mémoire réside par conséquent dans l'adaptation d'outils existants et la proposition de nouvelles approches afin de répondre à l'objectif multicritère de réduction de l'impact environnemental des procédés composites sous les contraintes technico-économiques du monde industriel.**

## 2.5. Conclusion

Dans ce chapitre, l'analyse de la littérature montre l'existence de deux principales stratégies pour répondre à l'objectif de réduction des impacts environnementaux de l'étape de fabrication de pièces composites : le choix d'un couple matériau-procédé ou bien l'amélioration d'un procédé choisi. Bien que ces deux approches ne soient jamais associées, elles sont complémentaires puisque l'idéal serait d'améliorer le procédé qui a d'abord été choisi comme le plus adapté, après comparaison avec d'autres systèmes de production.

La mise en place de l'une ou de l'autre des stratégies qui viennent d'être évoquées doit s'appuyer sur une évaluation environnementale des procédés composites. Pour cela, la méthode ACV semble être la plus adaptée puisque c'est la méthode standardisée qui est systématiquement appliquée dans la littérature. C'est donc cette méthode qui est utilisée dans nos travaux. Cependant, cette méthode laisse des latitudes dans son application qui n'ont pour le moment pas fait l'objet d'un consensus de la part de la communauté scientifique dans le cadre de l'analyse environnementale des procédés composites. Par conséquent, une contribution visée par nos travaux est d'apporter, pour le cas des procédés composites, des précisions méthodologiques d'application de l'ACV permettant de répondre aux différentes configurations matériau-procédé qui peuvent être rencontrées. Pour cela, nos travaux s'appuieront sur le procédé de thermoformage-estampage de pièces en C/PPS, choisi comme cas d'étude car il est représentatif d'applications industrielles de fabrication de pièces aéronautiques en composites thermoplastiques qui ont été identifiées comme particulièrement pertinentes d'un point de vue environnemental. Ces contributions concernent :

- La définition de l'unité fonctionnelle et du périmètre de l'étude à considérer ;
- La réalisation de l'analyse d'inventaire, avec d'abord le choix de la méthode de collecte des données puis sa mise en œuvre en prenant en compte l'influence des réglages des paramètres ;
- Le calcul des impacts environnementaux.

Afin d'être applicables dans l'industrie, les actions menant à la réduction de l'impact environnemental des procédés composites doivent respecter des critères économiques et de qualité technique des pièces produites. A ce titre, des évaluations économiques et techniques doivent être réalisées parallèlement à l'analyse environnementale du procédé. Plusieurs façons de définir le coût de production ont été proposées dans la littérature, sans pour autant s'accorder sur la liste des postes de coûts à considérer. Par conséquent, nos travaux viseront à apporter des précisions sur la définition du coût de production à utiliser dans le cadre de l'étude d'un procédé composite. Afin de s'assurer le respect des critères de qualité technique des pièces composites produites, plusieurs indicateurs peuvent être caractérisés avec des méthodes déjà éprouvées, comme par exemple des propriétés mécaniques évaluées avec des approches standardisées. Ce type d'approche sera donc appliqué dans nos travaux. Après ce triple travail d'évaluation, les résultats obtenus doivent être exploités simultanément pour piloter le choix des actions à mener pour réduire l'impact environnemental des procédés composites. La plupart du temps, des analyses indépendantes des résultats environnementaux, économiques et techniques ont été réalisées. Cependant cette approche a montré ses limites dans le cas où la meilleure solution diffère selon l'indicateur regardé, montrant la nécessité d'outils d'aide à la décision. Un très petit nombre de ce type d'outils a alors été développé dans la littérature. Ces travaux de thèse viseront donc à développer ce sujet en adaptant des outils développés dans d'autres domaines et en proposant de nouveaux outils.

## Chapitre 3

# Définition des objectifs et du périmètre de travail de l'analyse environnementale

---

3.1. Introduction .....	50
3.2. Définition de l'unité fonctionnelle .....	50
3.2.1. Démarche générale.....	50
3.2.2. Application au cas du thermoformage-estampage .....	50
3.3. Définition du périmètre de l'étude .....	51
3.3.1. Démarche générale.....	51
3.3.2. Description détaillée du procédé de thermoformage-estampage.....	51
3.4. Détermination des contraintes techniques du procédé de thermoformage-estampage .....	56
3.4.1. Influence des paramètres du thermoformage-estampage sur les propriétés mécaniques des pièces produites.....	56
3.4.2. Evaluation expérimentale de l'influence des paramètres procédés sur la résistance mécanique.....	58
3.5. Conclusion.....	65

---

### 3.1. Introduction

Afin de réaliser l'analyse environnementale de procédés de fabrication de pièces composites, la méthodologie proposée dans ces travaux suit la trame générale de l'ACV. Par conséquent, la première étape de la méthodologie consiste à définir le champ de l'étude. Pour cela l'objectif de l'étude et le système étudié doivent être décrits en détail. C'est également lors de cette étape que l'unité fonctionnelle est définie. Ce chapitre propose donc des précisions méthodologiques concernant la réalisation de cette première étape de définition du champ d'étude sur les procédés de fabrication de pièces en composites. La description de cette méthodologie s'appuiera sur son application au cas du thermoformage-estampage.

Pour établir le périmètre de travail, la méthodologie présentée dans ce chapitre s'appuie sur l'objectif de diminution de l'impact environnemental des procédés composites qui est poursuivi dans cette thèse. Le périmètre est alors défini comme l'ensemble des étapes qui permettent de transformer du matériau brut en pièce finie et il est représenté de façon graphique par l'intermédiaire d'un arbre des processus qui liste l'ensemble des étapes du procédé et les flux d'inventaire associés. Pour ensuite définir l'unité fonctionnelle, la prise en compte de critères de qualité technique des pièces composites produites est nécessaire. Dans ce chapitre, la méthode proposée assure le respect de critères de qualité des pièces produites en imposant la mise en œuvre du procédé dans une plage de réglage de ses paramètres qui permet la production de pièces conformes aux attentes du cahier des charges.

### 3.2. Définition de l'unité fonctionnelle

#### 3.2.1. Démarche générale

L'unité fonctionnelle est l'unité de référence sur laquelle est construite l'analyse environnementale. Sa définition dépend de l'objectif de l'étude. Dans ces travaux de thèse, l'objectif visé consiste à diminuer l'impact environnemental de la fabrication de pièces en composites. À ce titre, l'unité fonctionnelle sera définie comme **la fabrication d'une pièce par le procédé étudié**. Cependant, la notion de qualité technique des pièces produites doit absolument être intégrée à la définition de l'unité fonctionnelle. En effet, la fonction des procédés de fabrication que l'on souhaite étudier est de produire des pièces composites conformes aux attentes d'un cahier des charges. Dans le cas contraire, la production de pièces non conformes finissant en rebuts de production serait responsable d'impacts environnementaux et de coûts inutiles puisque ne générant aucune valeur ajoutée. L'objectif de diminution de l'impact environnemental de la fabrication de pièces n'a donc de sens que si le procédé de fabrication continue de produire des pièces conformes aux spécifications techniques.

Du point de vue de la production, les critères de qualité technique peuvent être vus comme des contraintes qui encadrent la mise en œuvre du procédé puisqu'ils imposent de travailler dans certaines plages de paramètres. Par exemple, la température de mise en forme d'un matériau à matrice thermoplastique doit être supérieure à la température de fusion de cette dernière mais rester suffisamment basse pour ne pas le dégrader et par conséquent diminuer ses propriétés. Dans mes travaux de thèse, l'approche proposée pour prendre en compte les enjeux de qualité technique des pièces produites consiste alors à identifier les plages de réglage des paramètres du procédé qui permettent d'atteindre les niveaux de performance technique recherchés. Ces critères techniques sont généralement définis au moment de la conception de la pièce, avec par exemple la spécification de niveaux de résistance mécanique minimaux dans le cahier des charges des pièces.

#### 3.2.2. Application au cas du thermoformage-estampage

Pour le cas du thermoformage-estampage de C/PPS, l'unité fonctionnelle a été définie comme :

## La transformation par le procédé de thermoformage-estampage de semi-produit C/PPS en une pièce composite qui respecte des critères de qualité technique fixés.

### 3.3. Définition du périmètre de l'étude

#### 3.3.1. Démarche générale

Ces travaux de thèse se positionnent dans le contexte de production industrielle de pièces sur des procédés existants. Par conséquent, le périmètre de l'étude doit comprendre l'ensemble des étapes qui permettent de transformer le matériau brut en pièce finie. Ce périmètre peut alors être vu de deux façons différentes, selon que l'on considère le cycle de vie des pièces composites fabriquées ou bien celui du procédé de fabrication. Comme exposé sur la Figure 16, le périmètre de travail peut être défini au croisement de la phase de fabrication des pièces composites avec la phase d'utilisation du procédé étudié. Avec cette définition, les autres phases du cycle de vie du procédé, comme par exemple les étapes de fabrication des machines, ne sont pas considérées. Ce choix est motivé par le fait qu'aucune action n'est possible sur ces phases du cycle de vie du procédé dans le contexte de production industrielle sur un procédé déjà en place. Des actions sur ces autres étapes du cycle de vie du procédé seraient plutôt possibles dans un autre contexte de conception de machines et de procédés.

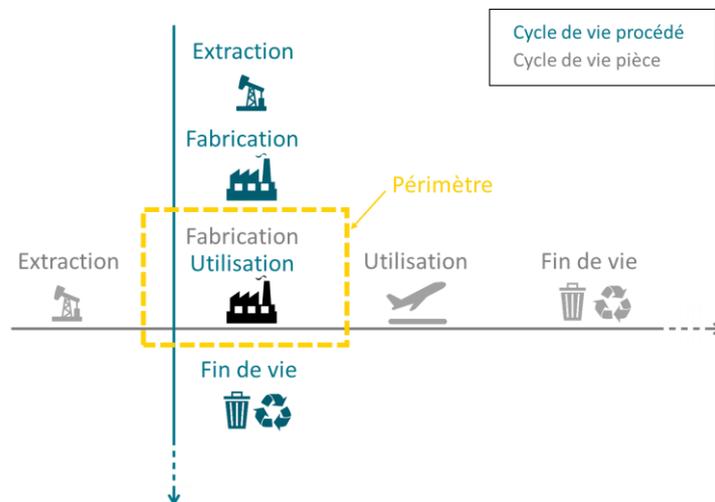


Figure 16 : Représentation des deux visions du périmètre à considérer.

Avec les grandes lignes du périmètre à considérer ainsi définies, une description plus fine du périmètre de l'étude doit ensuite être réalisée afin d'établir très distinctement les frontières du système étudié. Pour cela, le procédé étudié est d'abord décomposé en une succession d'étapes, appelées étapes unitaires du procédé. Une étape unitaire représente le plus petit élément pris en compte dans l'analyse environnementale du procédé. Pour chacune des étapes unitaires, une liste des consommations et rejets d'énergie et de matières (appelés flux d'inventaire) est ensuite établie. Enfin, le périmètre de l'étude ainsi détaillé est résumé de façon graphique grâce à la construction d'un arbre des processus. Afin d'illustrer l'application de cette méthodologie, une description détaillée du périmètre d'étude du procédé de thermoformage-estampage de C/PPS est ensuite présentée dans ce chapitre.

#### 3.3.2. Description détaillée du procédé de thermoformage-estampage

Le procédé de thermoformage-estampage de pièces composites en C/PPS a été défini de façon à être le plus représentatif possible des pratiques industrielles. Pour cela, des discussions avec les industriels du secteur aéronautique et la visite d'une ligne de production opérationnelle ont permis d'apporter

les précisions nécessaires en termes de technologies utilisées et de pratiques industrielles. Les machines des laboratoires ont ensuite été utilisées pour mettre en œuvre ce procédé.

Dans ces travaux de thèse, le matériau mis en forme par le procédé de thermoformage-estampage étudié est du PPS renforcé par un tissu d'armure satin de fibres de carbone. Il s'agit du matériau de référence Cetex® TC1100 (Toray) qui est notamment employé dans l'industrie aéronautique. Ce matériau se présente sous la forme de plaques de 14 plis consolidés d'une épaisseur totale d'environ 4,3 mm. La séquence d'empilement de ce matériau n'est pas connue dans ces travaux car il s'agit de chutes de production collectées chez notre partenaire industriel DAHER.

Afin de mettre en forme ce matériau, le procédé de thermoformage-estampage étudié est décrit comme l'enchaînement de plusieurs étapes unitaires, auxquelles sont associées à chaque fois une liste de flux d'inventaire :

#### Découpe de la préforme :

Une préforme est découpée dans une plaque de semi-produit composite. Bien que plusieurs technologies de découpe puissent être employées pour réaliser cette étape (découpe laser, jet d'eau, usinage, couteaux...), la technique de découpe jet d'eau a été choisie suite à des échanges avec des industriels car c'est celle qu'ils utilisent. Pour cette étape, la machine de découpe jet d'eau ProtMAX (OMAX) disponible au LTeN et qui est représentée sur la Figure 17 a été utilisée.

Durant cette étape, de l'énergie électrique, de l'eau et des abrasifs (habituellement du grenat) sont consommés. Cette étape génère également des chutes de matériau C/PPS ainsi que des émissions de particules fines. Ce dernier flux n'est pas considéré dans nos travaux.



Figure 17 : Machine de découpe jet d'eau ProtoMAX (OMAX) utilisée pour l'étape de découpe de préforme.

#### Transfert vers le four :

La préforme constituée du semi-produit est transportée jusqu'à un four infrarouge (Four IR). Cette étape est réalisée industriellement par un bras robotisé. Différents systèmes de préhension du matériau existent. Dans le procédé étudié, on considère un système de ventouse et d'aiguilles positionnées sur la tête du robot afin de saisir le matériau à l'état solide par aspiration puis par piquage lorsque la matrice thermoplastique est fondue. Un exemple de ce type de système, disponible à l'IRT Jules Verne, est présenté sur la Figure 18. Dans le cas du procédé du laboratoire, les transferts sont réalisés manuellement car la cellule de thermoformage-estampage n'est pas équipée de bras robotisé.

Durant cette étape de transfert, le bras robot consomme de l'énergie électrique.

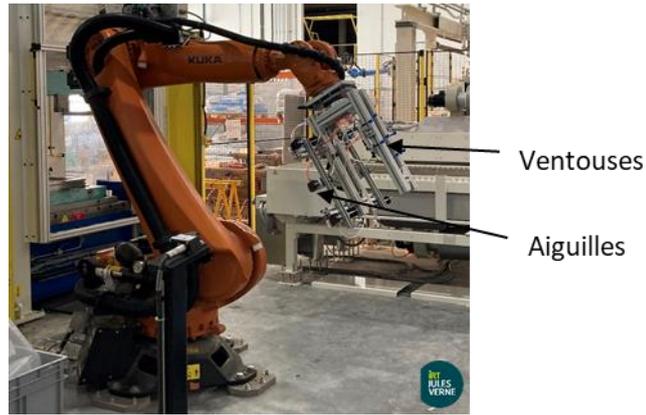


Figure 18 : Système de préhension de matériau par ventouses et aiguilles selon que le matériau soit à l'état solide ou bien fondu.

### Chauffage de la préforme :

Le matériau est chauffé dans un four infrarouge (IR) afin de faire fondre sa matrice thermoplastique. Le four IR SOPARA représenté sur la Figure 19 et disponible à l'école Centrale de Nantes est employé pour cette étape. Ce four est composé de 24 panneaux radiants de 2 kW chacun. Sur cet appareil, la puissance de chauffage (en % de la puissance maximale de chauffage du four) et la température de consigne peuvent être réglées. Afin de piloter l'asservissement du four en température lors du chauffage, deux pyromètres mesurent la température sur les surfaces supérieure et inférieure du matériau durant sa chauffe. Ces pyromètres permettent également de collecter ces données de température à la surface de la préforme au cours de son chauffage.

Durant cette étape, le four consomme de l'énergie électrique. Comme le matériau thermoplastique est chauffé à haute température pour fondre la matrice polymère, des émissions gazeuses peuvent aussi être relâchées dans l'atmosphère à cause de mécanismes de dégradation et/ou des additifs contenus dans le matériau [58]. Ces émissions dans l'air ont donc été intégrées à la liste des flux d'inventaire considérés, révélées aussi par la présence d'odeurs lors des essais de chauffage de matériau.

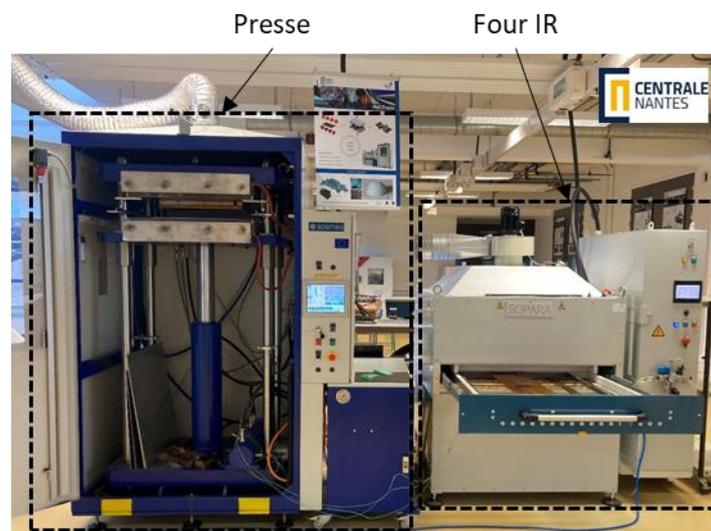


Figure 19 : Cellule de thermoformage-estampage de l'école Centrale de Nantes : Four IR SOPARA utilisé pour l'étape de chauffage et Presse SCAMEX de 75T utilisée pour l'étape d'emboutissage.

### Transfert vers la zone d'emboutissage :

Une fois que le matériau fondu est à la température souhaitée lors de l'étape de chauffage dans le four IR, il est transféré rapidement vers la presse pour être estampé. Comme pour l'étape de transfert précédente, cette étape est réalisée industriellement par un bras robotisé. Pour le procédé du laboratoire, cette étape de transfert est là aussi réalisée à la main.

Durant cette étape, le bras robot consomme de l'énergie électrique. Le matériau étant toujours à haute température durant le transfert, des émissions dans l'air sont aussi considérées.

### Emboutissage :

Une fois le matériau à l'état fondu placé dans la presse, il est mis en forme rapidement par emboutissage puis maintenu sous pression dans le moule un certain temps afin de consolider et de solidifier la pièce en la refroidissant. Tout au long du procédé, le moule de la presse est donc maintenu à une température « froide », inférieure à la température de fusion de la fraction thermoplastique du matériau. Pour cette étape, la presse SCAMEX de 75T présentée sur la Figure 19 et disponible à l'école Centrale de Nantes a été utilisée. Cette presse se décompose en deux sous-systèmes : un système mécanique (presse) et un système thermique (plateaux chauffants). L'asservissement de ce système thermique est piloté par des thermocouples situés dans les plateaux chauffants. Ce système permet également de collecter des informations de température au cours du procédé. Sur cette presse, la force de fermeture et la température de consigne des plateaux sont les paramètres qui peuvent être réglés.

Durant le procédé, la presse consomme de l'énergie électrique afin de faire fonctionner ses deux sous-systèmes. De plus, une étape de préparation du moule est nécessaire pour faciliter le démoulage de la pièce après sa mise en forme. Cette étape implique l'utilisation d'un agent chimique (agent démoulant).

### Transfert hors de la zone d'emboutissage :

Une fois la pièce solidifiée à l'issue de l'étape d'emboutissage, elle est démoulée et transportée hors de la presse. Comme les autres étapes de transfert, cette étape de transport est réalisée industriellement par un bras robotisé. Au laboratoire, cette étape est toujours réalisée manuellement.

Durant cette étape, le bras robot consomme de l'énergie électrique.

### Finition :

Une fois la pièce mise en forme et démoulée, une étape de parachèvement est nécessaire. Comme pour l'étape de découpe de la préforme, plusieurs technologies permettent de détourer la pièce. Les échanges avec les industriels nous ont alors permis de choisir un détourage par une technologie d'usinage.

La réalisation de cette dernière étape d'usinage consomme alors de l'énergie électrique. Cette étape génère aussi des chutes de matériau C/PPS sous la forme de copeaux. Des particules fines peuvent également être émises mais ce flux d'inventaire n'est pas considéré dans ces travaux.

### Consommation de matériau C/PPS :

Pour produire une pièce, le procédé de thermoformage-estampage consomme du matériau C/PPS. Cette consommation de matériau peut être divisée en deux catégories : une partie du matériau consommé est directement contenue dans la pièce fabriquée alors qu'une seconde

partie finit en chutes de matière au moment de la découpe de la préforme et de la finition. Cette quantité de matériau qui est utilisée par le procédé mais qui n'est pas utilisée dans la pièce sera appelée la surconsommation de matière. Elle sera considérée comme un flux d'inventaire entrant du procédé. Le matériau utilisé dans la pièce sera par contre exclu des analyses environnementales puisqu'aucune action n'est possible sur ce flux du fait du positionnement de cette thèse sur l'étape de production. **Pour synthétiser toutes les informations qui viennent d'être présentées, une description graphique du procédé étudié est proposée sur la Figure 20 sous la forme d'un arbre des processus.** Elle représente l'enchaînement des différentes étapes unitaires du procédé de thermoformage-estampage ainsi que les différents flux d'inventaire qui ont été listés.

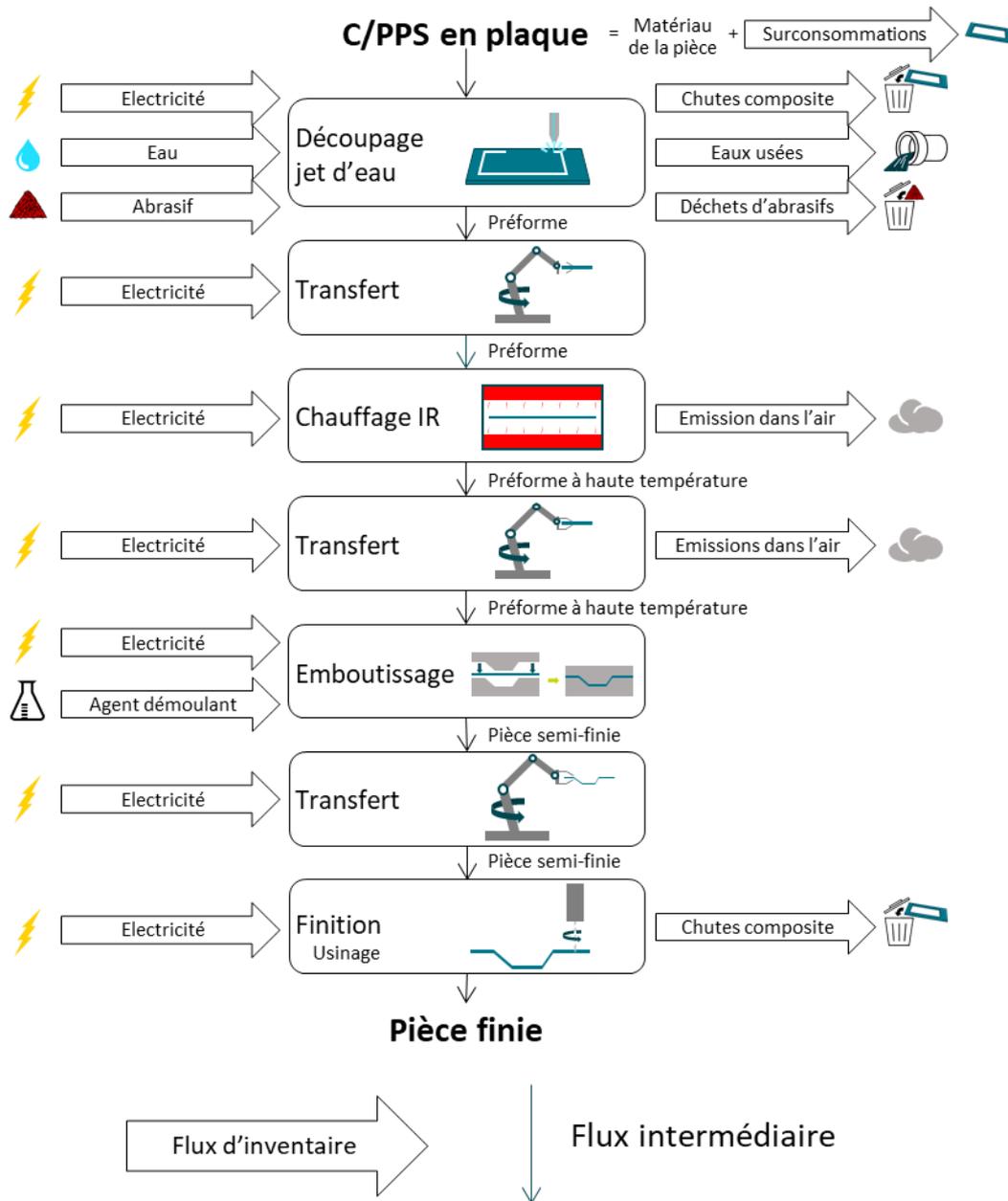


Figure 20 : Arbre des processus du procédé de thermoformage-estampage de C/PPS.

Lors de l'étude du procédé de fabrication de pièces par thermoformage-estampage, d'autres étapes peuvent être intégrées au périmètre décrit sur la Figure 20. Une phase de séchage du matériau dans

une étuve permet par exemple de contrôler le taux d'humidité dans le matériau, qui peut avoir une influence sur les propriétés mécaniques de la pièce fabriquée. Une étape de surmoulage peut également être réalisée au moment de la mise en forme du composite dans la presse. Il s'agit en fait d'un ajout de matière thermoplastique par moulage par injection qui sert par exemple à réaliser des nervures de renfort sur la pièce finale. Dans les travaux de cette thèse, ces étapes n'ont pas été prises en compte dans le périmètre d'étude.

### 3.4. Détermination des contraintes techniques du procédé de thermoformage-estampage

Dans cette partie, les critères techniques évoqués lors de l'étape de définition de l'unité fonctionnelle sont intégrés pour l'étude du procédé de thermoformage-estampage de matériau C/PPS. Pour cela, l'analyse de la littérature existante est d'abord réalisée pour identifier une plage de paramètres procédé qui permet la mise en forme par thermoformage-estampage de matériau C/PPS. Dans un second temps, la résistance au cisaillement interlaminaire est choisie comme indicateur de performance technique pour étudier et valider expérimentalement la plage de paramètres du procédé précédemment identifiée.

#### 3.4.1. Influence des paramètres du thermoformage-estampage sur les propriétés mécaniques des pièces produites

Dans la littérature, plusieurs travaux ont étudié l'influence des paramètres du procédé de thermoformage-estampage de matériau C/PPS sur les propriétés techniques des pièces fabriquées. McCool *et al.* ont par exemple étudié l'influence du choix de la température de moule, de la température de mise en forme et de l'effort d'estampage [34]. Dans ces travaux, les auteurs ont d'abord réalisé des essais d'analyse mécanique dynamique en température pour déterminer les plages de températures adaptées au procédé. Les résultats de ces essais ont alors permis d'identifier la fenêtre de température de mise en forme [310 °C ; 370 °C] et la fenêtre de température de moule [50 °C ; 230 °C]. Bien que la température de fusion du PPS soit de 285 °C, les auteurs expliquent alors qu'il est nécessaire de chauffer jusqu'à une température de 310 °C car le matériau reste trop rigide pour être formé en dessous de cette température. Après cela, les auteurs ont alors produit des pièces dans différentes configurations de paramètres en respectant ces plages de température. Ils les ont ensuite testées selon sept indicateurs de performance, comme par exemple le taux volumique de fibres, la résistance à la flexion ou encore le degré de cristallinité. L'analyse des résultats obtenus a ainsi montré que l'identification du paramètre le plus influent dépendait de l'indicateur de qualité technique regardé. La température de moule est par exemple le paramètre qui joue le plus sur la résistance en flexion du matériau et sur la cristallinité du matériau alors que la rugosité des pièces est principalement pilotée par la température de mise en forme. Comme on pouvait s'y attendre, ces résultats signifient par conséquent que le choix des indicateurs de performance est déterminant dans la perspective du choix des réglages du procédé.

Dans un autre article, Han *et al.* ont exclusivement étudié l'influence de la température du moule pour aider au réglage de ce paramètre [59]. A ce titre-là, des plaques en C/PPS pliées en V ont été fabriquées par thermoformage-estampage pour différentes températures de moule, comprises entre 110 °C et 230 °C. Les paramètres de température de chauffage et de pression de consolidation ont été respectivement fixés à 320 °C et 3,3 MPa. L'utilisation de ces configurations a alors permis la fabrication de pièces de bonne qualité, validant le choix des plages de paramètres de mise en forme établi par les auteurs. Pour identifier la température de moule optimale, les auteurs ont ensuite testé la qualité des pièces produites selon trois indicateurs : la cristallinité ainsi que l'épaisseur et l'angle de

la pièce. L'analyse des résultats obtenus a alors permis aux auteurs d'identifier une température de moule optimale de 170 °C.

Dans d'autres travaux, Joppich *et al.* se sont intéressés à l'influence des températures de moule sur la formabilité par thermoformage-estampage de matériau C/PPS sur un moule parallélépipédique [60]. Durant ces essais, le matériau est chauffé à 340 °C puis estampé sous une pression de 6 MPa dans un moule à une température comprise entre 140 °C et 160 °C. Les résultats de cette étude ont alors montré la bonne formabilité du matériau dans les conditions expérimentales testées, validant par conséquent l'utilisation des réglages du procédé étudié dans ces travaux.

Jamin *et al.* ont eux aussi étudié l'influence de la température de moule mais également de la pression d'estampage sur plusieurs indicateurs de qualité de pièces fabriquées en C/PPS par thermoformage-estampage [61]. Dans un premier temps, des pièces de section en S ont été fabriquées en utilisant des valeurs de pression de consolidation comprises entre 2,2 MPa et 4,4 MPa et des températures de moule comprises entre 180 °C et 220 °C. La qualité de ces pièces a ensuite été caractérisée par la mesure de l'épaisseur, du degré de cristallinité, des porosités et des performances mécaniques (essais de flexion 4 points). Les résultats obtenus ont alors montré que la variation de température de moule dans la plage utilisée n'a pas d'incidence sur les propriétés mécaniques et la cristallinité des pièces obtenues. Cela peut s'expliquer par le fait que l'amplitude des températures testées est relativement faible par rapport à la plage de température du procédé proposée par McCool *et al.* [34]. Les résultats montrent par contre qu'une pression de consolidation minimale de 3,3 MPa est nécessaire pour fabriquer les pièces de section en S étudiées.

D'autres travaux se sont particulièrement concentrés sur le lien entre la cinétique de refroidissement de pièces en C/PPS (directement liée à la température du moule pendant le procédé de thermoformage-estampage), le taux de cristallinité des pièces produites et leurs propriétés mécaniques. Sacchetti *et al.* ont ainsi étudié l'influence de la vitesse de refroidissement de matériau C/PPS lors de sa mise en forme sur sa résistance à la rupture interlaminaire [62]. Pour cela, les auteurs ont fabriqué par thermoformage-estampage des éprouvettes en C/PPS similaire au matériau utilisé dans nos travaux de thèse (Toray TC 1100). Des températures de moule de 25 °C, 100 °C et 200 °C ont alors été utilisées. L'étude de la cristallinité et de la résistance à la rupture interlaminaire par des essais DCB (*Double Cantilever Beam*) a ensuite montré que l'augmentation de la température de moule permet d'accroître la cristallinité du matériau. Les auteurs expliquent finalement que l'accroissement de la cristallinité est corrélé à une diminution de la ténacité du matériau. Dans des travaux plus récents, Oshima *et al.* ont également étudié l'influence de la vitesse de refroidissement sur la cristallisation et les propriétés mécaniques de PPS et de C/PPS similaire à celui utilisé dans nos travaux de thèse (Toray TC 1100) [63]. Dans leurs travaux, plusieurs vitesses de refroidissement sont utilisées pour fabriquer des pièces en C/PPS par thermoformage dans une presse. Ces travaux ne sont cependant pas tout à fait représentatifs du procédé de thermoformage-estampage car les vitesses de refroidissement utilisées sont plus faibles : de l'ordre de 10 °C/min alors qu'elles sont de l'ordre de 1 000 °C/min pour le thermoformage-estampage [61]. Une fois les pièces produites, les auteurs ont ensuite caractérisé leurs propriétés mécaniques (essais de traction, cisaillement, DCB et ENF – *End Notch Failure*) ainsi que leur cristallinité. Comme dans les travaux de Sacchetti *et al.* [62], les résultats montrent qu'une diminution de la vitesse de refroidissement permet d'augmenter la cristallinité du matériau produit. **Cette augmentation de la cristallinité a alors un effet positif sur la rigidité mais a également pour conséquence de diminuer la ténacité du matériau. Sur le procédé de thermoformage-estampage, la vitesse de refroidissement de la pièce est pilotée par la température du moule.** Par conséquent, les résultats de ces travaux montrent que selon l'indicateur de performance technique regardé (ténacité ou bien rigidité), le choix du réglage de la température de moule pourra être différent.

En résumé, l'analyse des travaux de la littérature sur l'influence des paramètres du procédé de thermoformage-estampage sur la qualité technique de pièces en C/PPS montre que la méthodologie employée est toujours identique. Cette méthode consiste d'abord à fabriquer plusieurs pièces en C/PPS par thermoformage-estampage en faisant varier les réglages du procédé. **Trois paramètres sont particulièrement étudiés dans la littérature : la température de chauffage ou de mise en forme, la température du moule et la pression de consolidation du matériau.** La seconde étape de la méthodologie consiste à étudier les propriétés des pièces fabriquées avec différentes configurations de paramètres du procédé. Différentes propriétés sont étudiées comme le taux de cristallinité, des propriétés de résistance mécanique ou encore le respect de la géométrie de la pièce. L'analyse de ces travaux fait alors ressortir que **le choix du ou des indicateurs de performance des pièces fabriquées est très important car il peut influencer le choix de la valeur des paramètres procédés permettant de fabriquer des pièces aux performances optimales.** Par exemple, la température de moule permettant de maximiser la ténacité des pièces n'est pas la même que celle qui favorise la cristallinité du matériau et donc sa raideur.

Lors des travaux d'évaluation de l'influence des paramètres du procédé de thermoformage-estampage de C/PPS, les valeurs des paramètres testés sont choisies dans des gammes adaptées à la mise en forme de C/PPS par thermoformage-estampage. Par conséquent, **l'analyse de ces travaux a permis de dresser la fenêtre des paramètres de mise en œuvre du procédé qui est représentée dans le Tableau 6.** Pour compléter ces informations, des discussions avec des industriels fabricants de pièces en C/PPS par thermoformage-estampage ont également été menées.

Tableau 6 : Paramètres de fabrication pour la mise en forme de pièces en C/PPS par thermoformage-estampage.

<b>Température de mise en œuvre</b>	310 °C – 370 °C	[34], [59]–[62]
<b>Température de moule</b>	50 °C – 230 °C	[34], [59]–[62]
<b>Pression de consolidation</b>	2,2 MPa - 6 MPa	[60], [61]
<b>Durée de la phase de chauffage IR</b>	environ 90 s max.	Expertise industrielle
<b>Durée de la phase de transfert</b>	environ 5 s	Expertise industrielle

### 3.4.2. Evaluation expérimentale de l'influence des paramètres procédés sur la résistance mécanique

Dans cette partie, l'objectif est de valider la plage de réglages du procédé de thermoformage-estampage identifiée dans la littérature et présentée dans le Tableau 6. Pour cela, une étude de l'influence des paramètres de température de moule, de température de chauffage et de pression de consolidation sur la résistance au cisaillement interlaminaire (ILSS) est proposée. La résistance au cisaillement interlaminaire a été choisie comme indicateur de performance technique des pièces fabriquées car c'est un des critères les plus fréquemment utilisés pour traduire la qualité des pièces produites par thermoformage-estampage [64]. Cette propriété est très sensible aux problèmes de cohésion entre les couches de préimprégné ou à la présence de porosités dans le matériau, ce qui est particulièrement important pour des pièces de structure dans des secteurs comme l'aéronautique. La méthodologie adoptée pour ce travail s'inspire de celle identifiée dans la littérature : dans un premier temps des éprouvettes ont été fabriquées par thermo-estampage, puis la résistance mécanique de ces éprouvettes a été testée.

#### 3.4.2.1. Méthode de fabrication des plaques et des éprouvettes

Dans ces travaux, la ligne d'estampage disponible au laboratoire (Figure 21-a.) a été utilisée pour fabriquer des pièces en forme de plaques. Cette ligne d'estampage ne disposant pas de système de

transfert automatisé (bras robot) comme c'est habituellement le cas dans l'industrie, il a été nécessaire de mettre au point un système pour réaliser cette étape de façon manuelle. Un système de cadre (Figure 21-c.) et de glissières (Figure 21-b.) a donc été développé afin de faciliter le transfert du matériau fondu du four vers la presse. Pour maintenir le matériau dans le cadre de transfert, des bandes de film polyimide sont disposées sur le cadre comme présenté sur la Figure 21-c. L'utilisation d'un tel système pour réaliser l'étape de transfert a deux conséquences. Tout d'abord, il ne permet pas de respecter les pratiques industrielles de temps de transfert inférieur à 5 secondes. Dans le cas du procédé du laboratoire, les temps de transfert sont plus longs ce qui implique un refroidissement plus important de la pièce entre sa sortie du four et son emboutissage dans la presse. Une autre conséquence de la réalisation manuelle de l'étape de transfert par rapport à l'utilisation d'un système automatisé est qu'il faut gérer la reproductibilité de ces opérations qui joue notamment sur les temps de transfert. En effet, il faut s'assurer lors de la fabrication des pièces que les temps de transfert sont constants pour éviter de biaiser l'étude de l'influence des paramètres de température de moule, de température de chauffage et de pression de consolidation. Pour contrôler cela, les temps de transfert ont été mesurés durant la fabrication des pièces et ont finalement montré une faible variabilité, avec des durées entre 27 secondes et 35 secondes, soit une moyenne de durée de transfert de 28,6 secondes et un écart type de 2,7 secondes.

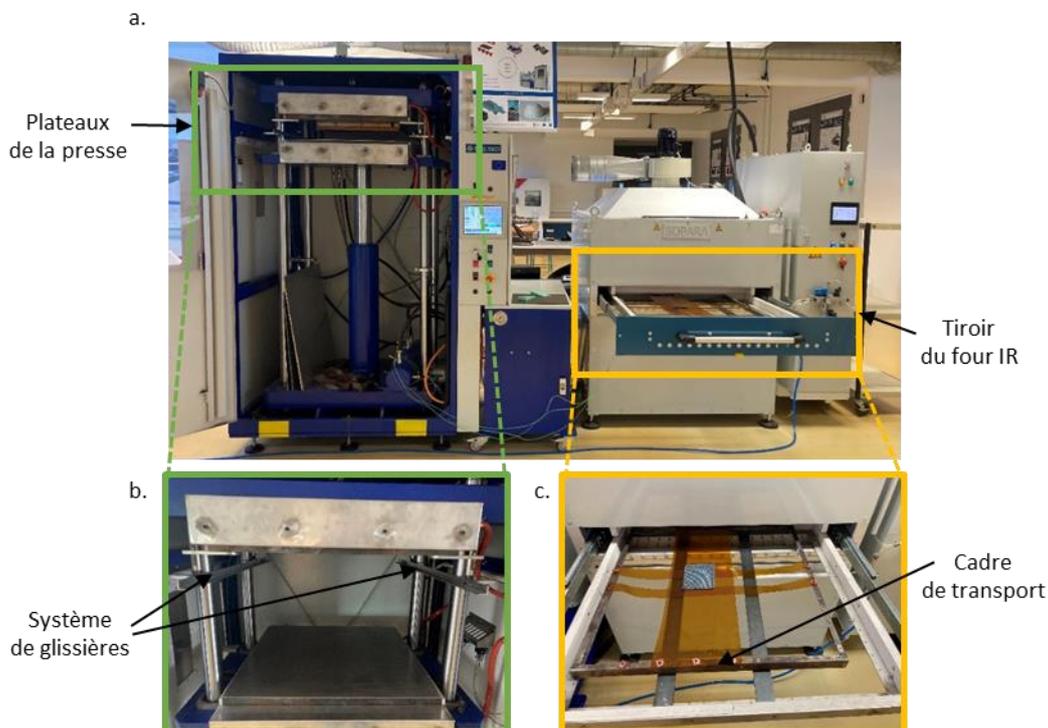


Figure 21 : a. Cellule d'estampage du laboratoire composée du four IR et de la presse ;  
b. Plateaux de la presse avec système de glissières; c. Cadre de transport de matière dans le tiroir du four IR.

Pour la fabrication des pièces, la puissance de chauffage du four infrarouge est réglée à son maximum, c'est-à-dire 100 %. Lors de la phase de chauffage, les températures des surfaces supérieures et inférieures de la préforme sont suivies en temps réel grâce à l'affichage des relevés des deux pyromètres sur la console du four infrarouge. Afin d'assurer l'homogénéité de la température dans l'épaisseur de la pièce, une phase de maintien en température des préformes est imposée une fois que la température de consigne est atteinte en surface. En pratique, la durée de cette phase de maintien a été fixée à 30 secondes en s'appuyant sur les résultats d'essais de chauffage avec des pièces instrumentées qui sont présentés plus en détails au chapitre 6.

Dans le but d'étudier l'influence des paramètres du procédé, plusieurs configurations de température de moule, de température de chauffage et de pression de consolidation ont été utilisées pour la fabrication des pièces. Les configurations testées sont présentées dans le Tableau 7. Elles ont été définies par un plan d'essai factoriel complet à trois paramètres et à deux niveaux. Les valeurs des paramètres ont été choisies dans la fenêtre procédé identifiée d'après la littérature (Tableau 6). Pour chacune de ces configurations, une pièce a été fabriquée.

Tableau 7 : Plan d'essai pour la fabrication des pièces lors de l'étude de l'influence des paramètres du procédé de thermoformage-estampage et résultats des mesures de résistance au cisaillement interlaminaire.

N° pièce	Température de chauffage (en °C)	Pression de consolidation (en MPa)	Température du moule (en °C)	ILSS (en MPa)
1	310	2,2	50	57,9 ± 2,1
2	310	6	50	60,9 ± 0,9
3	370	2,2	50	63,5 ± 0,8
4	370	6	50	61,8 ± 0,4
5	310	2,2	230	67,7 ± 0,4
6	310	6	230	67,5 ± 0,3
7	370	2,2	230	67,8 ± 0,3
8	370	6	230	67,3 ± 0,3
Matériau vierge	X	X	X	70,1 ± 0,1

Pour produire les pièces, deux géométries de préforme ont été découpées par jet d'eau avec la machine du laboratoire (Figure 17). Pour le niveau de pression de consolidation de 6 MPa, des plaques de 120 mm x 150 mm sont embouties avec un effort de fermeture de la presse réglé à 108 kN. Pour le niveau de pression de consolidation de 2,2 MPa, des plaques de 160 mm x 150 mm sont embouties avec un effort de fermeture de la presse réglé à 53 kN. Durant les essais de fabrication, le chauffage du moule est assuré par les plateaux chauffants de la presse. La fabrication des pièces est alors engagée une fois la température des plateaux stabilisée au niveau de consigne. Les pièces ainsi réalisées sont présentées sur la Figure 22.



Figure 22 : Pièces fabriquées par thermoformage-estampage avec différentes configurations de paramètres.

#### 3.4.2.2. Méthode de caractérisation des propriétés mécaniques

Afin de caractériser la propriété mécanique de résistance au cisaillement interlaminaire des pièces produites, des essais de flexion trois points ont été réalisés selon la norme ISO 14130 [65]. Pour cela, une machine de traction-compression Instron 68FM-300 munie d'un capteur de force Instron de 150 kN a été utilisée (Figure 23).



Figure 23 : Machine de traction-compression Instron 68FM - 300 équipée du montage de flexion trois points utilisés.

Pour ces essais, les éprouvettes sont découpées par jet d'eau (Figure 17) dans les plaques fabriquées par le procédé de thermoformage-estampage du laboratoire. Les dimensions de ces éprouvettes sont définies par la norme ISO 14130 et présentées dans le Tableau 8. Les éprouvettes de flexion ont toutes été découpées dans le même sens par rapport à l'orientation des fibres du matériau composite. Les éprouvettes sont ensuite testées en flexion trois points en utilisant le banc expérimental présenté en détail sur la Figure 24. L'avantage de ce montage est que la portée entre les appuis est réglable. Cela permet de réduire si nécessaire la portée afin de favoriser le mode rupture par cisaillement interlaminaire, selon les préconisations de la norme ISO 14130.

Tableau 8 : Dimensions des éprouvettes de flexion et du montage de flexion trois points.

<b>Epaisseur</b>	h =	4,34	mm
<b>Longueur</b>	l =	44	mm
<b>Largeur</b>	b =	22	mm
<b>Portée</b>	L =	16	mm

Dans ces essais, un minimum de 5 éprouvettes est testé pour chaque plaque fabriquée par thermoformage-estampage. En plus de cela, 5 éprouvettes en matériau vierge sont également testées pour servir de témoin du bon fonctionnement du procédé de thermoformage-estampage. Une attention particulière a également été portée au positionnement des éprouvettes sur le banc de flexion. Pour tous les essais, les éprouvettes ont été positionnées de façon que la panne appuie sur la face des éprouvettes qui était en contact avec la partie supérieure du moule lors de leur fabrication par thermoformage-estampage.

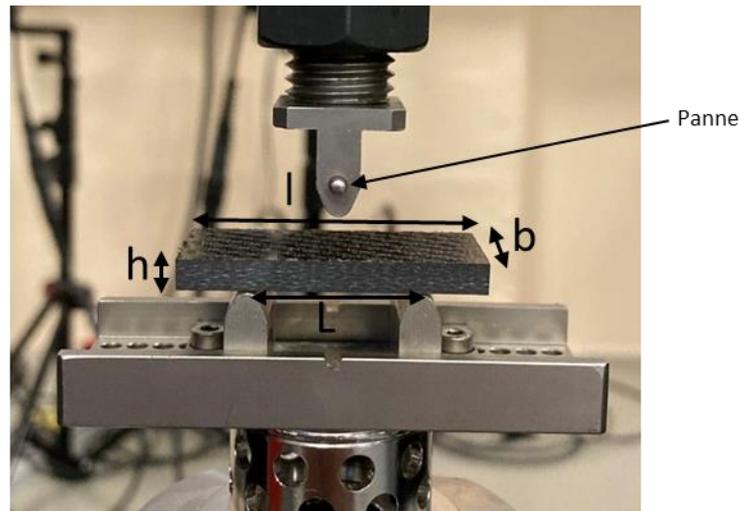


Figure 24 : Banc de flexion trois points utilisé.

Durant les essais, un déplacement constant de la traverse de 1 mm/mn conforme à la norme permet de solliciter en flexion les éprouvettes jusqu'à la rupture. L'effort mesuré par le capteur de force est alors enregistré avec une fréquence d'acquisition de 10 Hz. Les données ainsi collectées permettent de calculer la résistance au cisaillement interlaminaire des éprouvettes, notée *ILSS*, grâce à la formule donnée par la norme ISO 14130 :

$$ILSS = \frac{3}{4} \cdot \frac{F}{bh}$$

Avec :

*F* : La force à rupture ou force maximale, en Newtons ;

*b* : la largeur de l'éprouvette, en millimètres ;

*h* : l'épaisseur de l'éprouvette, en millimètres.

#### 3.4.2.3. Résultats

Un exemple des courbes contrainte-déplacement obtenues lors des essais de flexion est présenté sur la Figure 25. L'allure de ces courbes indique que le mode de rupture des éprouvettes induit des phénomènes de plasticité. Ce mode de rupture est différent du mode pur de rupture en cisaillement interlaminaire recherché. Afin de favoriser ce mode de rupture, la portée entre appuis a pourtant été réduite à 16 mm au vu des premiers résultats. Cependant, cela n'a pas permis de favoriser le mode de rupture en cisaillement interlaminaire. Par conséquent les valeurs calculées à partir de ces essais ne sont pas exactement les valeurs de résistance au cisaillement interlaminaire. D'après la norme ISO 14130, ces valeurs peuvent néanmoins être utilisées pour des comparaisons de même matériau par exemple pour comparer l'influence des paramètres du procédé de thermoformage-estampage.

L'analyse de tous les essais de flexion réalisés a permis de calculer les valeurs de résistance au cisaillement interlaminaire de toutes les plaques fabriquées par thermoformage-estampage ainsi que du matériau vierge. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 7. Les valeurs de résistance au cisaillement interlaminaire mesurées sont comprises entre 57,9 MPa et 67,8 MPa. En comparaison, la résistance au cisaillement interlaminaire du matériau vierge a été évaluée à 70,1 MPa. La plage de paramètres procédé identifiée dans la littérature (Tableau 6) a donc été utilisée de façon concluante pour mettre en forme des pièces plaques avec des propriétés mécaniques de résistance au cisaillement interlaminaire que l'on considérera comme satisfaisantes par rapport au niveau de référence du matériau vierge. Par conséquent, cette fenêtre de paramètres du procédé sera systématiquement

utilisée dans nos travaux de thèse car elle permet d'intégrer les attentes de qualité technique de l'unité fonctionnelle. L'unité fonctionnelle étudiée est donc définie comme **la transformation de semi-produit C/PPS en une pièce composite par le procédé de thermoformage-estampage mis en œuvre avec des paramètres choisis dans les plages définies dans le Tableau 6.**

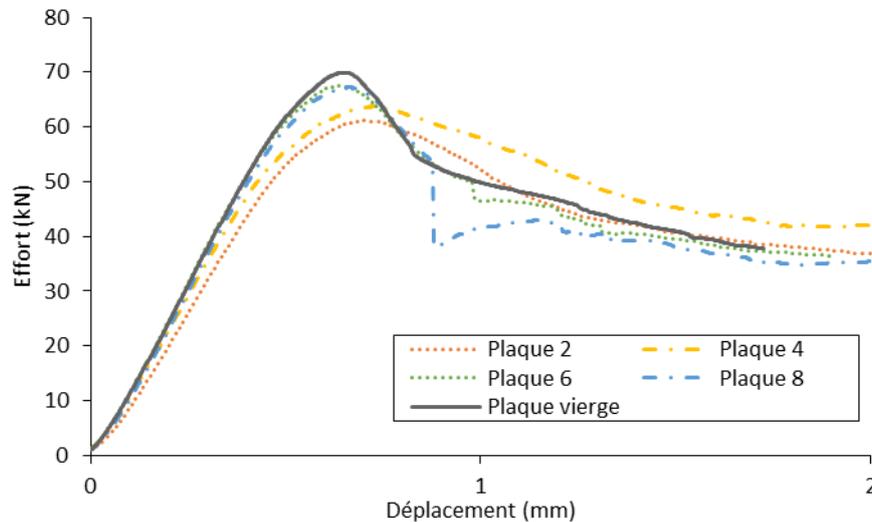


Figure 25 : Exemple de résultats d'essais de flexion pour des éprouvettes prises dans les plaques n°2, 4, 6, 8 et dans le matériau vierge.

Les résultats de résistance au cisaillement interlaminaire obtenus dans cette plage de paramètres montrent une dépendance au choix des réglages du procédé. L'analyse statistique de ces résultats a permis d'établir une expression de cette propriété mécanique en fonction des trois paramètres étudiés en utilisant une modélisation affine avec interaction double :

$$ILSS = m + \sum_{i=1}^3 a_i P_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{i,j} P_i P_j$$

Avec :

$m$  : constante

$P_1$  : La pression de consolidation  $P_{consolidation}$  (en MPa) normalisée :

$$P_1 = -1 + 2 * \frac{P_{consolidation} - 2,2MPa}{6 MPa - 2,2 MPa}$$

$P_2$  : La température de chauffage dans le four infrarouge  $T_{IR consigne}$  (en °C) normalisée :

$$P_2 = -1 + 2 * \frac{T_{IR consigne} - 310 °C}{370 °C - 310 °C}$$

$P_3$  : La température du moule dans la presse  $T_{presse consigne}$  (en °C) normalisée :

$$P_3 = -1 + 2 * \frac{T_{presse consigne} - 50 °C}{230 °C - 50 °C}$$

$a_{i,j}$  : Les coefficients associés aux paramètres normalisés du modèle  $P_i$  et  $P_j$ .

Cette expression reste cependant discutable car elle utilise un modèle très simple avec seulement trois paramètres et repose sur un faible nombre de données. Néanmoins, elle permet des premières interprétations de l'influence des paramètres du procédé de thermoformage-estampage. En

considérant les coefficients du modèle (Figure 26) comme des indicateurs de l'influence de chacun des paramètres, on constate que la température du moule est le paramètre qui joue le plus sur la résistance au cisaillement interlaminaire des pièces fabriquées. Un premier groupe constitué des pièces 1, 2, 3 et 4, qui ont été mises en forme avec un moule à 50 °C, présente des propriétés inférieures aux pièces 5, 6, 7 et 8 fabriquées avec un moule à 230 °C. Cette différence est cohérente avec les résultats de la littérature car elle pourrait être expliquée par la différence de cristallinité de la matrice PPS qu'engendrent les différences de températures de moule [62], [63].

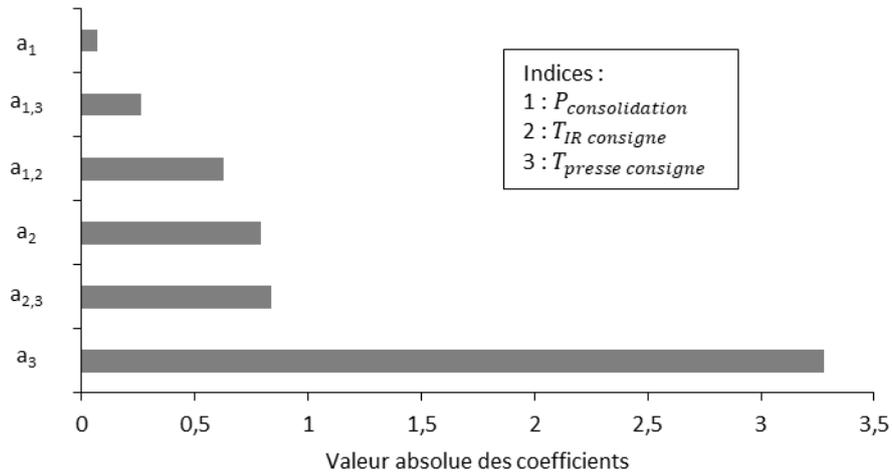


Figure 26 : Coefficients de l'expression de la résistance au cisaillement interlaminaire des pièces produites en fonction de la température du moule ( $T_{\text{presse consigne}}$ ), pression de consolidation ( $P_{\text{consolidation}}$ ) et de la température de chauffage infrarouge ( $T_{\text{IR consigne}}$ ).

### 3.5. Conclusion

Dans ce chapitre, l'étape de définition des objectifs et du champ d'étude de la méthodologie proposée dans ce travail de thèse a été détaillée en s'appuyant sur le cas du thermoformage-estampage de pièces en C/PPS. Des précisions sur le périmètre à étudier ont été présentées, en lien avec l'objectif de diminution des impacts environnementaux des procédés composites poursuivi dans ces travaux. De façon générale, ce périmètre doit comprendre toutes les étapes qui permettent de transformer du matériau brut en pièce finie grâce au procédé étudié. Pour illustrer cela, une description détaillée du procédé de thermoformage-estampage de pièces en C/PPS est présentée. Ce procédé est alors décomposé en étapes unitaires qui sont chacune associées à une liste de flux d'inventaire. Afin de faire le bilan de ce travail, un arbre des processus a été construit et permet de présenter de façon graphique les limites du système étudié.

Un enjeu important également traité dans ce chapitre est la définition de l'unité fonctionnelle. Pour l'étude des procédés composites, l'unité fonctionnelle proposée est définie comme la production d'une pièce par le procédé de fabrication étudié. Cependant, cette définition n'est pas suffisante et un critère de qualité technique des pièces produites doit être intégré pour traduire les exigences de performance du procédé de fabrication. Pour intégrer les critères de qualité technique des pièces fabriquées, la stratégie proposée dans ces travaux consiste à restreindre la mise en œuvre du procédé à une plage de réglage de ses paramètres qui est adaptée à la mise en forme de pièces avec un niveau de qualité qui correspond aux attentes. Par conséquent, les critères de qualité technique des pièces produites encadrent les actions qui peuvent être mises en place sur le procédé de fabrication pour diminuer son impact environnemental. Afin de mieux expliquer cette démarche, elle a été appliquée dans ce chapitre sur le cas du thermoformage-estampage de C/PPS, pour lequel une fenêtre de réglages du procédé a d'abord été définie grâce à une analyse de la littérature. Une fois cette fenêtre identifiée, elle a été validée par une étude expérimentale de la résistance au cisaillement interlaminaire de pièces produites par thermoformage-estampage. Dans ce chapitre, des précisions sur la première étape de la méthode ACV ont donc été proposées pour une application aux procédés de fabrication de pièces en composites. En s'appuyant sur la trame de méthode ACV, l'étape suivante de la méthodologie consiste à réaliser l'analyse d'inventaire. Cette étape est développée dans le chapitre suivant.



# Chapitre 4

## Analyse d'inventaire pour la construction de modèles de flux dépendants des paramètres de réglage du procédé

---

4.1.	Introduction .....	68
4.2.	Méthodes de collecte des données .....	68
4.2.1.	Choix des méthodes de mesures des différents flux d'inventaire .....	68
4.2.2.	Modélisation des consommations électriques à partir de relevés expérimentaux ....	71
4.2.3.	Évaluation des émissions dans l'air .....	73
4.3.	Résultats d'inventaire et modélisations associées .....	78
4.3.1.	Consommation C/PPS .....	78
4.3.2.	Découpe jet d'eau de la préforme .....	79
4.3.3.	Chauffage infrarouge .....	81
4.3.4.	Transferts par le bras robotisé .....	85
4.3.5.	Estampage .....	87
4.3.6.	Finition par usinage .....	91
4.3.7.	Emissions dans l'air .....	91
4.4.	Bilan des modélisations des flux d'inventaire.....	95
4.5.	Mise en perspective des résultats de laboratoire par rapport à la consommation électrique d'une ligne de thermoformage-estampage à échelle industrielle.....	97
4.5.1.	Unité fonctionnelle et périmètre de l'étude .....	97
4.5.2.	Montage expérimental .....	98
4.5.3.	Résultats des mesures électriques .....	99
4.5.4.	Comparaison des résultats avec le procédé à l'échelle du laboratoire.....	102
4.6.	Conclusion.....	104

---

## 4.1. Introduction

Pour avoir une vision complète de l'analyse d'inventaire des procédés composites, il est nécessaire de considérer la dépendance des données d'inventaire aux paramètres du procédé. Pour cela, la solution proposée dans le cadre de cette thèse consiste à exprimer les données d'inventaire comme des fonctions des paramètres du procédé. De cette façon, les modèles d'inventaire peuvent être exploités pour l'étude environnementale de différents scénarios de production relatifs à différentes configurations de paramètres et différents réglages du procédé. Dans ce chapitre, l'objectif est donc d'établir comment construire ces modèles d'inventaire dans le cas des procédés composites. Afin de répondre à cet objectif, il a d'abord été nécessaire de déterminer comment évaluer les données pour chaque flux d'inventaire. Il s'agit en fait d'identifier par quels moyens obtenir ces données puis de préciser comment mettre en œuvre ces moyens. Le traitement de ces données est ensuite précisé pour permettre de construire les modèles d'inventaire recherchés.

Dans ce chapitre, la méthodologie proposée est décrite sur la base du procédé de thermoformage-estampage de C/PPS. Dans une première partie, les méthodes de collecte de données d'inventaire développées durant la thèse sont décrites. Ces méthodes sont ensuite appliquées au cas du thermoformage-estampage et une modélisation complète des flux d'inventaire du procédé est présentée. Enfin, les données d'inventaire relevées sur le procédé à l'échelle du laboratoire sont comparées à des données mesurées sur un procédé d'estampage de l'IRT Jules Verne, plus représentatif d'applications industrielles.

## 4.2. Méthodes de collecte des données

### 4.2.1. Choix des méthodes de mesures des différents flux d'inventaire

Dans la littérature [17]–[19], plusieurs méthodes de collecte de données ont été identifiées : réalisation de relevés expérimentaux, utilisation de données de la littérature et de résultats de bases de données, exploitation des données issues des spécifications des machines. Chacune de ces méthodes présente des avantages et des inconvénients qui sont présentés dans le Tableau 9.

La mesure expérimentale de données d'inventaire permet par exemple d'obtenir des données représentant fidèlement le procédé étudié. Cependant, la collecte expérimentale de données d'inventaire peut être longue à mettre en œuvre car elle nécessite de développer un protocole expérimental, de le réaliser puis d'exploiter les données collectées. L'utilisation de données existantes dans les spécifications des machines, dans la littérature ou dans des bases de données permet quant à elle une analyse d'inventaire rapide, dans le cas où les données existent et sont disponibles. Néanmoins, le problème lié à l'utilisation des données existantes est qu'elles ne correspondent pas toujours aux spécificités du procédé étudié. En effet, ces données sont basées sur d'autres travaux et donc des procédés qui utilisent des machines et des réglages qui peuvent être plus ou moins différents de la configuration étudiée ainsi que des méthodes de mesure des données qui peuvent varier selon les études, ce qui justifie les travaux de standardisation réalisés pour les mesures de données environnementales des procédés d'usinage (série de normes ISO 14955 [20]–[24]). Par conséquent, le niveau de confiance relatif à l'utilisation de ces données dépend de la correspondance entre le procédé étudié et celui sur lequel les données ont été collectées.

Tableau 9 : Méthodes de collecte de données d'inventaire avec leurs avantages et inconvénients.

	Avantages	Inconvénients
<b>Relevés expérimentaux</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Correspondent aux spécificités du procédé étudié</li> <li>+ Possibilité de diminuer l'incertitude en augmentant le nombre de relevés</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Longs à obtenir : nécessitent le développement et le déploiement de campagnes expérimentales</li> </ul>
<b>Données existantes : Spécifications machines, bases de données &amp; littérature</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Rapidement accessibles car ne nécessitent pas la conception puis la mise en œuvre d'essais</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas toujours adaptées aux spécificités du cas étudié (machine, matériau, réglages, spatio-temporalité...)</li> <li>- Incertitudes difficiles à quantifier</li> <li>- Pas toujours disponibles ou faciles à collecter</li> </ul>

Pour réaliser l'analyse d'inventaire du procédé étudié, il est nécessaire de choisir une technique de collecte des données pour chaque flux d'inventaire listé lors de l'élaboration de l'arbre des processus. Une stratégie idéale pour obtenir des données parfaitement adaptées au cas étudié serait de réaliser des mesures pour chaque flux d'inventaire. Cependant, la réalisation de telles campagnes d'essais puis l'exploitation des données collectées vont être un processus long et coûteux. Il est donc très souvent nécessaire de trouver un compromis entre la disponibilité de données et la précision des données que réclame leur exploitation dans l'analyse environnementale du procédé. **L'idée consiste donc à prioriser les efforts de quantification des données d'inventaire en précisant en priorité les données d'inventaire qui ont l'influence la plus importante sur les résultats de l'étude environnementale.**

Afin de choisir une stratégie de collecte des données d'inventaire, la méthodologie proposée dans ces travaux (Figure 27) se base sur le jugement de la personne qui réalise l'étude environnementale concernant la disponibilité de données existantes ainsi que l'influence de chaque flux d'inventaire sur les résultats de l'analyse environnementale globale. Cette méthode favorise la réalisation de relevés expérimentaux pour les flux d'inventaire jugés les plus importants par la personne qui réalise l'étude environnementale et les flux d'inventaire peu ou pas documentés. Une critique possible de cette méthodologie est liée à la possibilité d'une erreur de jugement. Afin de pallier les problèmes que pourraient engendrer une telle erreur, il est nécessaire de vérifier la validité des jugements de la personne qui réalise l'étude à partir des résultats de l'analyse environnementale. Il s'agit en fait de vérifier que les flux d'inventaire initialement considérés comme peu influant sur les résultats environnementaux sont effectivement responsables d'impacts environnementaux faibles relativement aux impacts des autres flux d'inventaire du procédé. Dans le cas contraire, d'autres modes de collecte devront être développés pour préciser les données d'inventaire déjà récoltées, par exemple par la réalisation de campagnes de mesures expérimentales complémentaires. Pour répondre à cette problématique, une approche de ce type est proposée dans le chapitre 5.

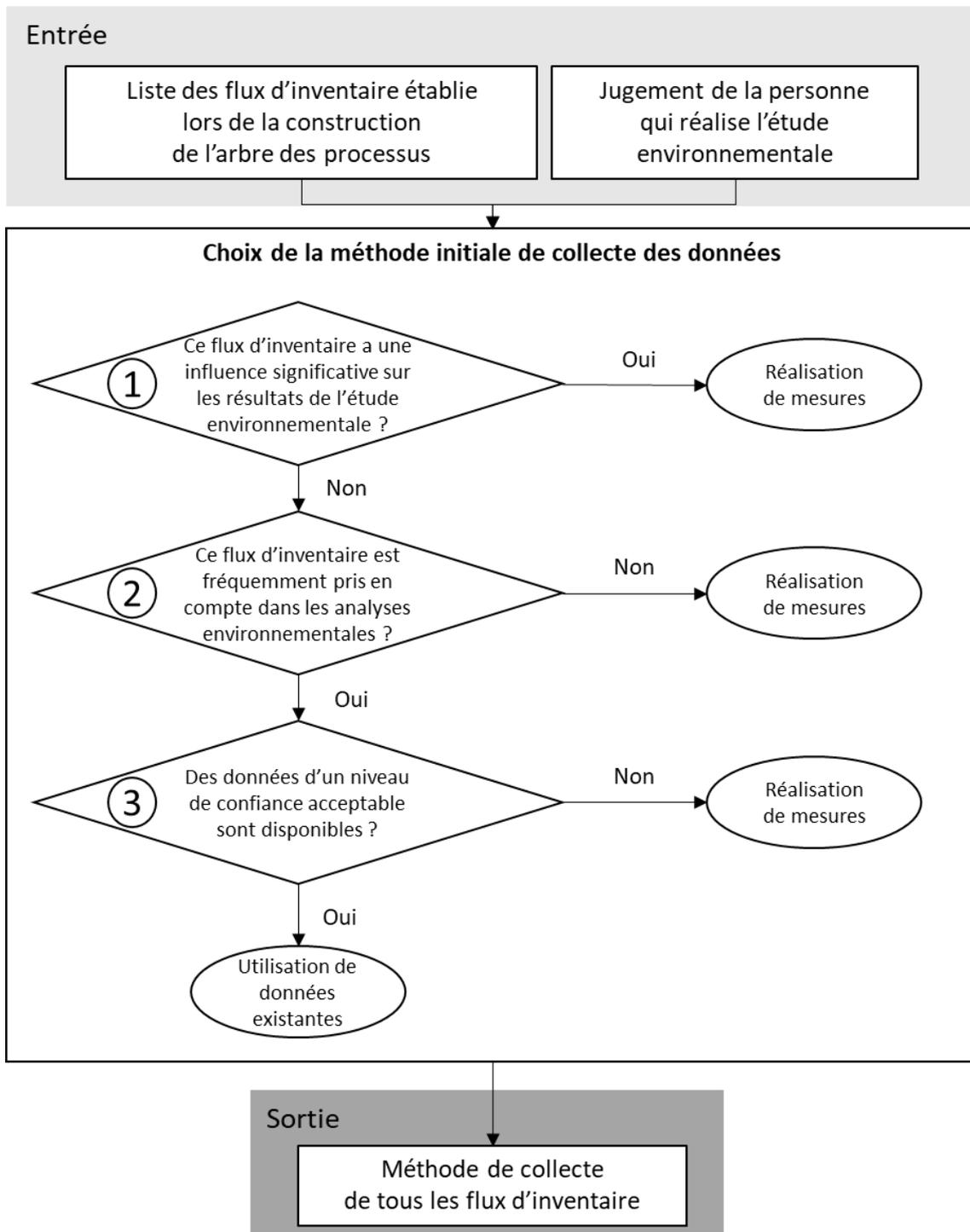


Figure 27 : Méthodologie de choix de la technique de quantification des flux d'inventaire à partir du jugement de la personne qui réalise l'étude environnementale.

En appliquant cette méthodologie au cas du thermoformage-estampage de C/PPS, une technique de collecte de données d'inventaire a pu être assignée à chaque flux d'inventaire listé. Ces informations sont présentées sur la Figure 28.

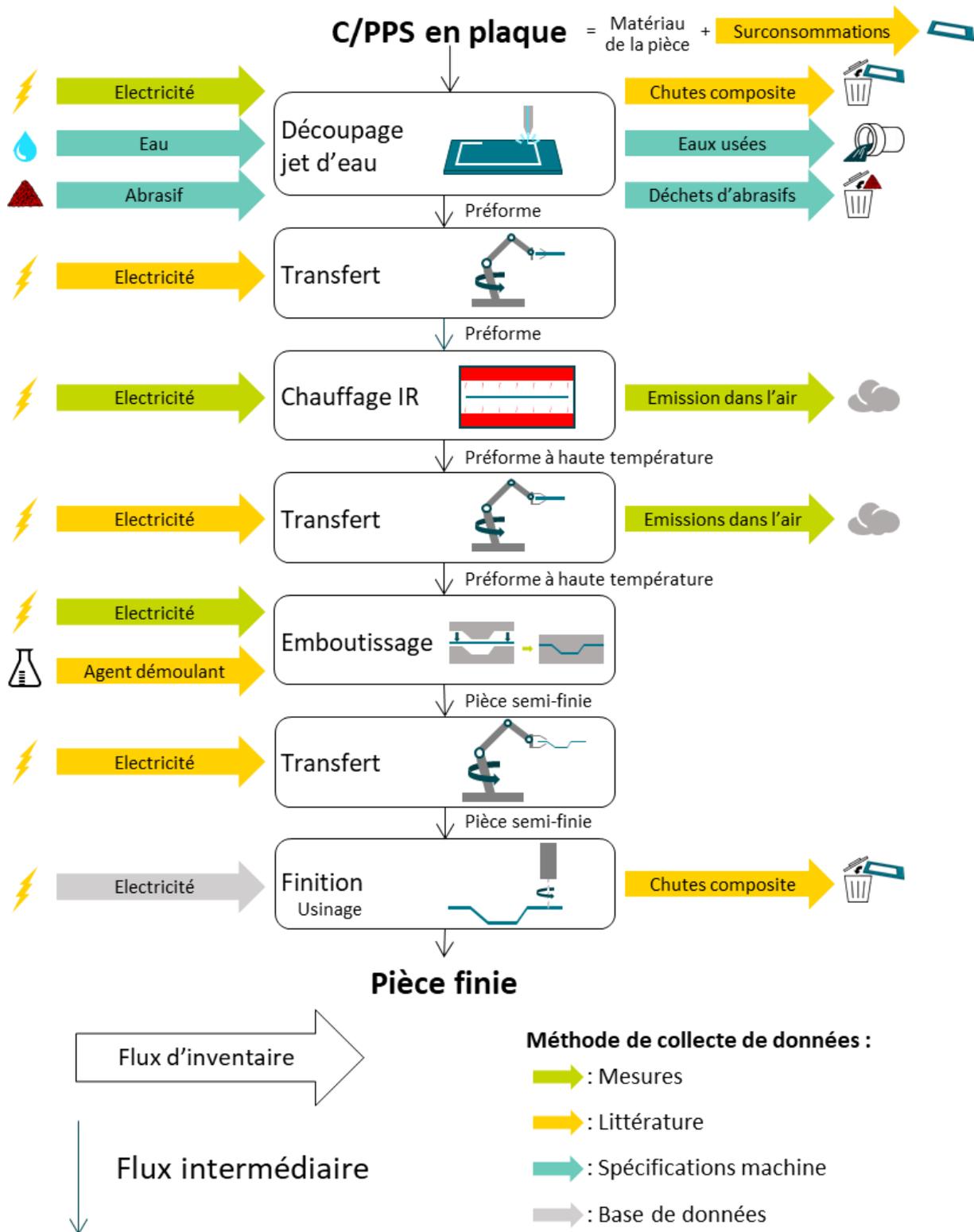


Figure 28 : Techniques de collectes des données d'inventaire pour l'étude du thermoformage-estampage de C/PPS.

#### 4.2.2. Modélisation des consommations électriques à partir de relevés expérimentaux

##### 4.2.2.1. Matériel de mesure

Afin d'évaluer la consommation d'énergie du procédé de thermoformage-estampage de C/PPS, des relevés de consommation de puissance électrique ont été réalisés. Cette méthode de collecte a été

choisie car l'influence de ces flux d'inventaire sur les résultats environnementaux est jugée significative (étape 1 de la méthode proposée en Figure 27). Pour réaliser ces mesures, deux énergimètres différents disponibles au laboratoire et présentés sur la Figure 29 ont été utilisés : Fluke 434 II couplé à des pinces ampèremétriques i30s capable de mesurer des courants jusqu'à 30 A et Fluke 1736 couplé à des pinces ampèremétriques Fluke iFlex 1500-12 capable de mesurer des courants jusqu'à 1 500 A.



Figure 29 : Matériel de mesure électrique utilisé :  
a. Fluke 434 II avec pinces ampèremétriques Fluke i30s ;  
b. Fluke 1736 avec pinces ampèremétriques Fluke iFlex 1500-12.

#### 4.2.2.2. Méthode de modélisation

A partir des relevés électriques expérimentaux de consommation de puissance électrique des différentes machines impliquées sur une chaîne de production, l'objectif est d'exprimer la consommation d'énergie électrique comme une fonction des paramètres des machines étudiées. Pour cela, une méthodologie en trois étapes a été développée. Cette méthodologie est illustrée sur la Figure 30.

##### **Étape 1 :** Relevés de la puissance électrique consommée

Les données de consommation de puissance électrique sont mesurées expérimentalement pour différentes configurations de paramètres machine. Sur la Figure 30-a., la consommation de puissance électrique pour trois configurations de paramètres machine est représentée.

##### **Étape 2 :** Proposition d'un modèle de consommation de puissance électrique au cours du temps constant par morceau et identification des coefficients de puissance $P_i$

En fonction de l'allure des relevés de puissance électrique consommée, un modèle de consommation de puissance électrique est proposé. Dans nos travaux, en cohérence avec nos relevés expérimentaux, ce modèle est choisi constant par morceaux. Dans ce modèle, le fonctionnement de la machine étudiée est décomposé en différents états de fonctionnement. L'exemple représenté sur la Figure 30 montre un modèle à deux états de fonctionnement : ralenti et marche pleine puissance. Une fois le modèle établi, les coefficients du modèle sont identifiés grâce aux relevés expérimentaux pour chaque jeu de paramètres testé. Sur la Figure 30-b., ces coefficients qui sont notés  $P_i$  représentant la puissance consommée lors des phases de fonctionnement de la machine.

##### **Étape 3 :** Modélisation des coefficients en fonction des paramètres du procédé

Une fois les coefficients du modèle identifiés pour toutes les configurations de paramètres machine testés lors de l'étape 2, on cherche à modéliser l'évolution de ces coefficients en fonction de l'évolution des paramètres du procédé. Une expression de ces coefficients comme une fonction de ces paramètres est développée par des méthodes d'interpolation. Sur l'exemple de la Figure 30-c., cette interpolation est linéaire.

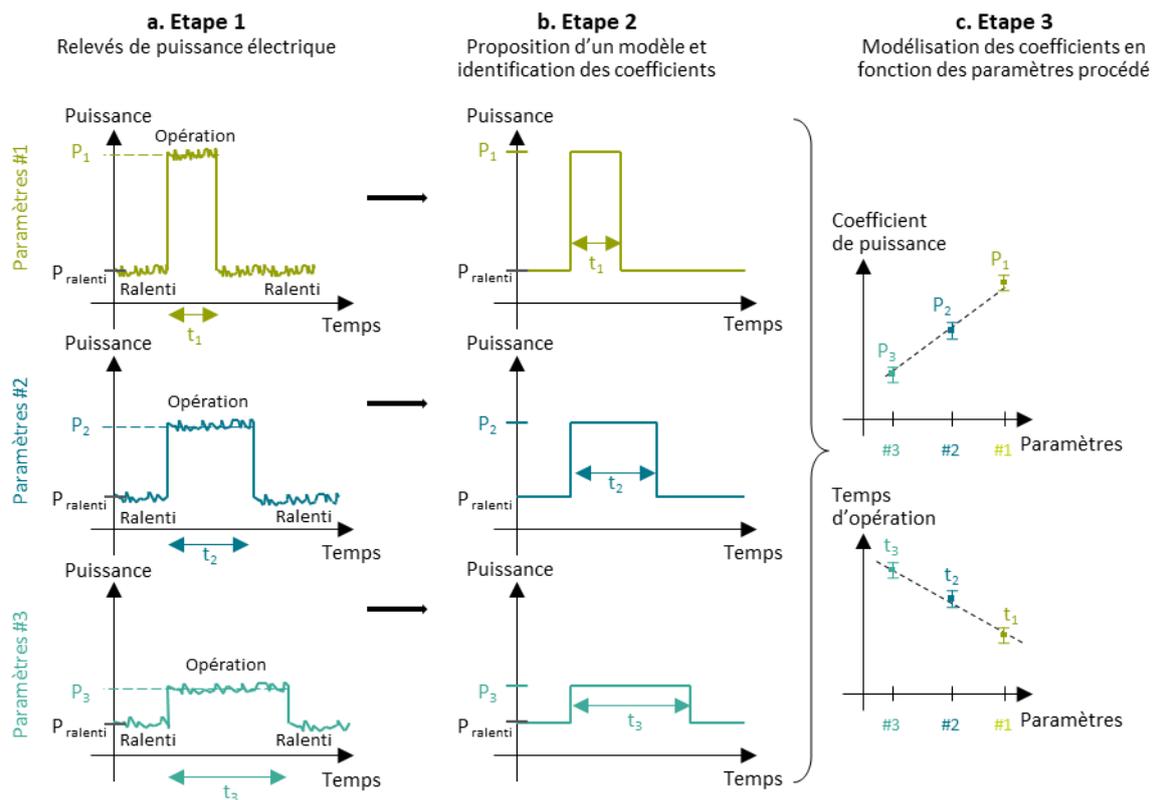


Figure 30 : Méthodologie de modélisation de la consommation électrique des machines comme une fonction de leurs réglage à partir de relevés expérimentaux.

#### 4.2.3. Évaluation des émissions dans l'air

##### 4.2.3.1. Motivations des approches expérimentales

Lors de la mise en œuvre de matériaux à base de matrice thermoplastique, des additifs volatils et des mécanismes de dégradation du matériau peuvent être à l'origine d'émissions de composés gazeux et de particules fines dans l'air [58]. La présence d'odeurs lors de la mise en œuvre du procédé de thermoformage-estampage de C/PPS a également motivé les travaux visant à quantifier et qualifier les émissions dans l'air liées au procédé. Faisant l'hypothèse que ce flux d'inventaire a peu d'influence sur les résultats de l'analyse environnementale, des recherches dans la littérature ont été menées pour déterminer la fréquence de prise en compte de ce flux d'inventaire en lien avec la première étape de la méthodologie proposée sur la Figure 27.

À notre connaissance, il n'existe pas dans la littérature de travaux sur les émissions dans l'air durant le thermoformage-estampage de C/PPS. Cependant, différents travaux se sont intéressés aux mécanismes de dégradation en température du PPS. Nous nous sommes donc intéressés à ces travaux pour évaluer si des données d'un niveau de confiance acceptable étaient disponibles, conformément à la troisième étape de la méthode proposée en Figure 27. Afin de comprendre et d'étudier ces mécanismes, la stratégie qui a souvent été adoptée dans la littérature a consisté à analyser les composés chimiques émis lors du chauffage de matériau PPS. Ehlers *et al.* ont étudié la dégradation d'un PPS produit par l'entreprise Dow Chemical. Des analyses thermogravimétriques (ATG) couplées à des analyses par spectrométrie de masse (MS) ont été réalisées sur les gaz émis pour différentes conditions d'atmosphère (sous vide, sous air et sous  $N_2$ ) et avec des vitesses de chauffage de  $2,5\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  et de  $3\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  [66]. Pour les températures inférieures à  $450\text{ }^\circ\text{C}$ , cohérentes avec les températures du procédé de thermoformage-estampage, les auteurs ont identifié le sulfure d'hydrogène comme le

composé émis prédominant. D'autres composés ont également été détectés en faible quantité : méthane, benzène, CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>. En utilisant des techniques d'ATG-MS et de pyrolyse en ligne avec un chromatographe en phase gazeuse couplé à un spectromètre de masse (GC-MS), Perng a également étudié les phénomènes de décomposition du PPS avec la température sous une atmosphère hélium et donc dans une configuration pas tout à fait représentative de l'atmosphère oxydante (air) du procédé de thermoformage-estampage [67]. Dans ses travaux, il a identifié que la dégradation du matériau débutait de façon significative autour de 400 °C, avec comme principaux mécanismes de dégradation la rupture aléatoire de la chaîne principale (liée à la formation de H<sub>2</sub>S) et la dépolymérisation (liée à la formation de benzénethiol C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>S). Walter *et al.* ont travaillé sur les émissions dans l'air durant le procédé de découpe laser de composite C/PPS [68]. La concentration totale en composés gazeux émis a été mesurée in situ durant le procédé, grâce à un détecteur à ionisation de flamme. La quantité de gaz inorganiques (NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>) a été mesurée par spectrométrie. Pour compléter ces mesures in situ, une analyse des composants gazeux émis par le matériau a été réalisée en utilisant un laser pour la pyrolyse du matériau, en ligne avec une analyse par GC-MS des gaz émis. Plus récemment, Kumagai *et al.* ont étudié la dégradation par thermo-oxydation d'un matériau PPS de Sumitomo Chemical [69]. Afin de mieux comprendre la dégradation en atmosphère oxydante de polymères sulfurés, les auteurs ont utilisé des techniques d'analyse classiques (ATG et spectrométrie photo-électronique X) ainsi qu'un montage de pyrolyse en ligne avec une GC-MS modifiée pour pallier les problèmes de diminution de la sensibilité et de la durée de vie du détecteur liés au travail sous une atmosphère oxydante comme l'air. Grâce à ce système, les émissions lors du chauffage du matériau PPS en atmosphère neutre (N<sub>2</sub>) et dans l'air sont analysées dans une plage de température allant de 50 °C à 900 °C avec une vitesse de 10 °C/min.

L'analyse de la littérature sur les émissions lors du chauffage de PPS a permis d'identifier les composés pouvant être émis lors du procédé de thermoformage-estampage. Le sulfure d'hydrogène et le benzénethiol semblent être les composés principalement émis dans la plage de température du procédé. D'autres composés potentiels ont également été identifiés et sont listés dans le Tableau 10. Cependant les données collectées ne sont pas totalement adaptées au cas du thermoformage-estampage étudié puisque les relevés sont réalisés dans des conditions de températures, d'atmosphères et de vitesses de chauffage différentes. **Par conséquent, la collecte de ces données par des mesures expérimentales a été choisie, conformément à la troisième étape de la méthodologie proposée sur la Figure 27.**

Dans la littérature, deux approches ont été identifiées comme adaptées pour étudier les émissions lors du chauffage de matériau PPS : une approche in-situ pour détecter les émissions du procédé et une approche de caractérisation centrée sur le matériau utilisant des méthodes d'analyses plus ou moins standard (ATG-MS, GC-MS). Dans nos travaux, ces deux approches sont déployées. Dans un premier temps, une campagne de mesures in-situ a été réalisée à l'aide d'un détecteur à photo ionisation et d'un compteur de particules optiques. Une campagne de caractérisation des émissions du matériau par ATG-MS a également été réalisée.

Tableau 10 : Composés chimiques potentiellement émis lors du chauffage de matériau PPS.

Référence	Composé chimique		Masse molaire (g/mol)
[66]	dihydrogène	H <sub>2</sub>	2,0
[66]	méthane	CH <sub>4</sub>	16,0
[66]	eau	H <sub>2</sub> O	18,0
[66]	monoxyde de carbone	CO	28,0
[66], [67]	sulfure d'hydrogène	H <sub>2</sub> S	34,1
[66]	dioxyde de carbone	CO <sub>2</sub>	44,0
[66], [69]	dioxyde de soufre	SO <sub>2</sub>	64,1

[67]	disulfure de carbone	CS <sub>2</sub>	76,1
[66], [67]	benzène	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78,1
[67]–[69]	benzènethiol	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> S	110,2
[67]	4-méthylbenzènethiol	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> S	124,2
[68]	1,2,3,4,5-tetraméthyl-benzène	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	134,2
[67], [69]	1,4-benzènedithiol	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> S <sub>2</sub>	142,2
[67]	biphényl	C <sub>12</sub> H <sub>10</sub>	154,2
[67], [69]	dibenzothiophène	C <sub>12</sub> H <sub>8</sub> S	184,3
[67]–[69]	diphényl sulfide	C <sub>12</sub> H <sub>10</sub> S	186,3
[68]	1,2,3,4-tetrahydro-1-phenyl-naphtalene	C <sub>16</sub> H <sub>16</sub>	208,3
[69]	thianthrène	C <sub>12</sub> H <sub>8</sub> S <sub>2</sub>	216,3
[68], [69]	diphényl disulfide	C <sub>12</sub> H <sub>10</sub> S <sub>2</sub>	218,4
[68]	bisphénol A	C <sub>15</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	225,3
[67]	4-(phényl)-diphénylsulfide	C <sub>18</sub> H <sub>14</sub> S	262,0
[69]	1,4-bis(phénylthiol)benzène	C <sub>22</sub> H <sub>14</sub>	278,4
[67]	2-(phénylthio)-dibenzothiophène	C <sub>18</sub> H <sub>14</sub> S <sub>2</sub>	292,0
[67]	4-(phénylthio)-diphénylsulfide	C <sub>18</sub> H <sub>12</sub> S <sub>2</sub>	294,0
[68]	1-cicosanol	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub> O	298,6

#### 4.2.3.2. Mesures in-situ

Pour quantifier les émissions dans l'air lors du thermoformage-estampage de C/PPS, un compteur de particules optique et un détecteur à photo ionisation ont été utilisés dans ces travaux de thèse pour réaliser des mesures in-situ durant la mise en œuvre du procédé. Le compteur de particules optique DUSTTRAK (TSI) (Figure 31-a.) a servi pour évaluer le nombre de particules émises en fonction de leur taille : les particules sont comptées et catégorisées en fonction de leur diamètre aérodynamique (PM<sub>1</sub> : diamètre < 1 µm, PM<sub>2,5</sub> : diamètre < 2,5 µm et PM<sub>10</sub> : diamètre < 10 µm). Le détecteur à photo ionisation Q-TRAK (TSI) (Figure 31-b.), équipé d'une sonde COV 987, a été utilisé pour mesurer les composés gazeux émis. Ce détecteur à photo ionisation est équipé d'une lampe de 10,6 eV qui permet de détecter le sulfure d'hydrogène et le benzènethiol, identifiés précédemment comme les principaux gaz émis lors de la dégradation de PPS. Le principe de fonctionnement de ce détecteur consiste à ioniser le gaz à caractériser en le bombardant de photons. Les molécules ionisées génèrent alors un courant proportionnel à la concentration d'espèces ionisées qui est détecté par des électrodes. Le détecteur permet donc d'identifier une quantité totale de composés gazeux émis, mais ne permet pas d'identifier la nature de ces composés.



Figure 31 : Appareils de mesure d'émissions dans l'air : a. DUSTTRAK ; b. Q-TRAK.

Afin d'évaluer les émissions dans l'air lors du procédé de thermoformage-estampage de C/PPS, plusieurs montages expérimentaux ont été réalisés :

- Une approche développée pour évaluer les émissions dans l'air lors du procédé a consisté à réaliser des mesures au niveau du système d'extraction du four IR lors de cycles de chauffage de C/PPS. Le montage est présenté sur la Figure 32.

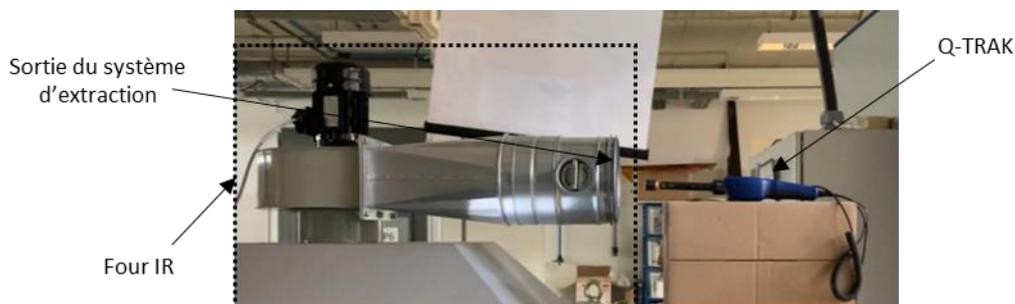


Figure 32 : Montage expérimental pour la détection de composés gazeux émis lors du chauffage de matériau C/PPS dans le four IR : positionnement du Q-TRAK dans le flux d'air du système d'extraction du four IR.

- Une approche a consisté à faire chauffer du matériau C/PPS sur une plaque chauffante. Le système est confiné sous une cloche permettant de concentrer les différentes émissions. Périodiquement, le couvercle bouchant la zone de mesure est ouvert pour permettre des relevés d'émission de particules fines et de composés gazeux. Ce montage est décrit sur la Figure 33. Un thermocouple à la surface supérieure de l'échantillon a été utilisé pour mesurer la température du matériau.

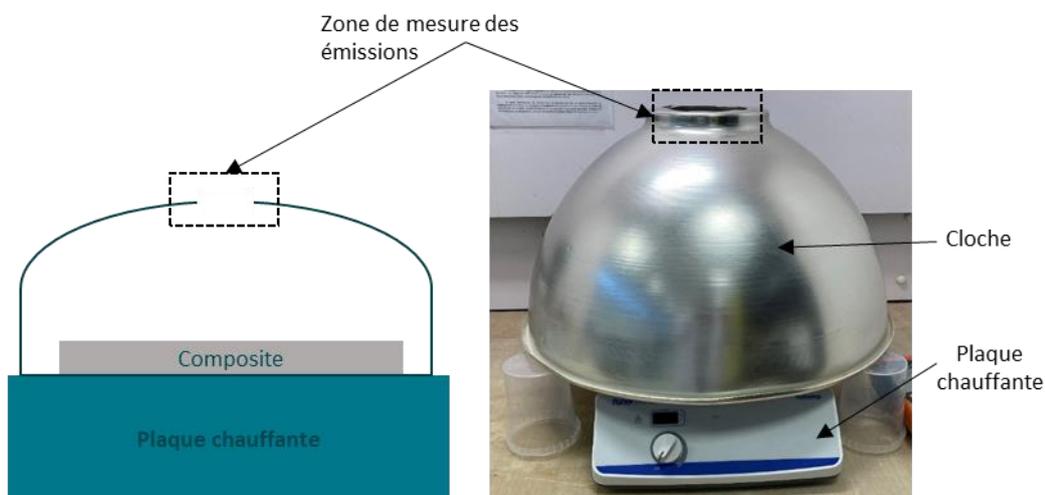


Figure 33 : Montage expérimental utilisé pour mesurer les émissions lors du chauffage de matériau C/PPS sur une plaque chauffante.

- Dans une autre approche, du matériau C/PPS a été chauffé dans un four de calcination Nabertherm LT 15/11 (Figure 34-a.). Ce four possède une chambre non ventilée et une unique sortie d'effluent sur sa face arrière (Figure 34-b.). Des mesures d'émissions ont été réalisées à ce niveau, en continu d'abord puis périodiquement avec un bouchage de la sortie d'effluent entre les mesures.

En étudiant les émissions dans l'air lors du chauffage et de la fusion de différents thermoplastiques, Yamashita *et al.* ont montré que la quantité de composés gazeux émis augmentait avec la température [70]. Afin de maximiser les émissions lors des différents essais, la température de chauffage du

matériau a été choisie comme la température maximale atteinte par le matériau C/PPS lors du procédé de thermoformage-estampage, soit 370 °C.

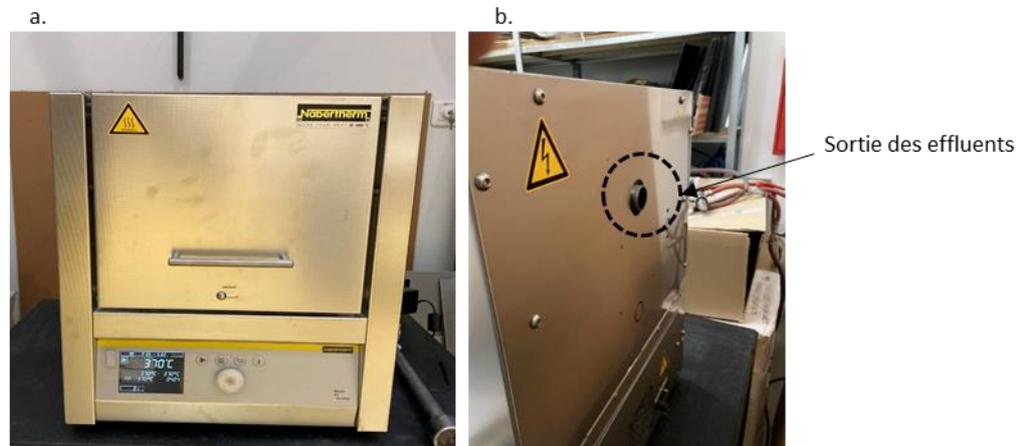


Figure 34 : Four de calcination Nabertherm utilisé pour évaluer les émissions dans l'air lors du chauffage de C/PPS :  
a. Face avant du four ; b. Face arrière du four avec l'unique sortie d'effluents.

#### 4.2.3.3. Mesures ATG/DSC-MS sur le matériau

Pour évaluer les émissions lors du chauffage de matériau C/PPS, des essais ont été réalisés dans ces travaux de thèse avec un système d'analyse thermogravimétrique (ATG) Setsys Evolution couplé à un spectromètre de masse (MS) Omnistar (Pfeiffer Vacuum) fonctionnant avec un système SEM (*Secondary Electron Multiplier*) (Figure 35). Un capillaire Omnistar thermo-régulé maintenu à 180 °C a servi à transmettre les gaz émis durant l'ATG jusqu'au MS. Dans le même temps, des essais de calorimétrie différentielle à balayage (DSC) ont pu être réalisés grâce à l'utilisation d'une canne spéciale utilisée dans l'ATG. Ces essais ont été réalisés sur des équipements de l'IMT Atlantique avec l'aide d'Eric Chevrel que je remercie chaleureusement pour son aide.

Les essais ont été réalisés en atmosphère oxydante pour reproduire des conditions similaires à celles du procédé. Pour cela, un flux d'air est introduit à proximité de l'échantillon à 16 mL/min. Afin de protéger la balance, un flux de N<sub>2</sub> est introduit également à proximité de cet appareil à un débit de 24 mL/min. Un essai en atmosphère inerte, sous azote (N<sub>2</sub>) a aussi été réalisé.

Deux scénarios thermiques différents ont été utilisés durant ces essais :

- Cycle 1 : un chauffage continu à 10 °C/min a été réalisé sur un premier échantillon dans la gamme de température 20 °C - 450 °C.
- Cycle 2 : un chauffage de 20 °C à 370 °C à 10 °C/min puis un maintien de 20 minutes à 370 °C suivi par la reprise du chauffage à 10 °C/min jusqu'à 850 °C.

Ces scénarios ont été définis afin d'observer le comportement du matériau dans la plage procédé (entre 310 °C et 370 °C pour le chauffage). Afin de corriger les déviations des résultats ATG et DSC causées par le comportement de la machine, un essai de référence sans matériau a été réalisé pour le cycle 2.

L'analyse de la littérature nous a permis d'établir une liste de composés susceptibles de se dégager en plus ou moins grande quantité lors du chauffage de PPS (Tableau 10). Durant les essais, tous les composés identifiés dans la littérature sans distinction de quantité émise observée ont été recherchés par MS.

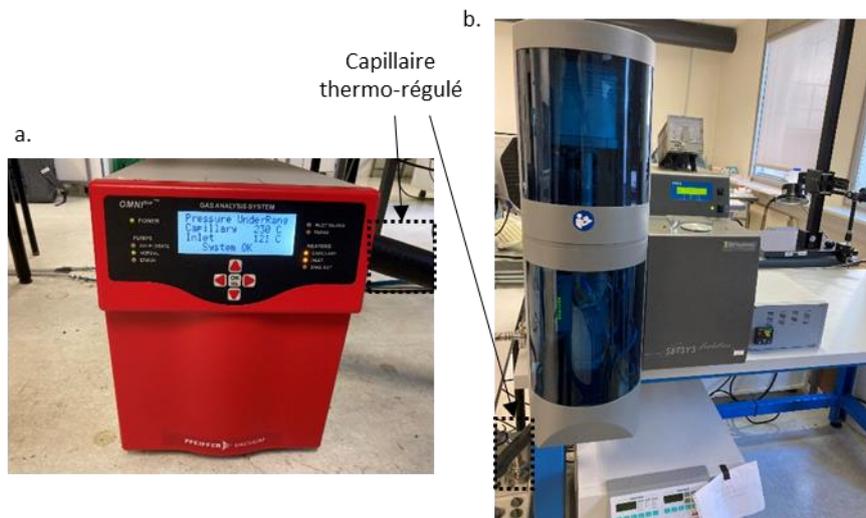


Figure 35 : Appareils de mesures : a. Spectromètre de masse Omnistar (Pfeiffer Vacuum) ; b) ATG Setsys Evolution.

Pour ces essais, les échantillons testés sont de très petite dimension (de l'ordre de 10 mg) ce qui pose le problème de la représentativité du taux de fibre de l'échantillon par rapport à celui du matériau calculé à une échelle plus grande. Afin de pallier ce problème, des essais ont été réalisés sur du matériau réduit en poudre ayant un taux de fibre se rapprochant de la valeur moyenne du matériau en plus d'essais sur du matériau massif. Les essais réalisés sont présentés dans le Tableau 11.

Tableau 11 : Essais ATG/DSC-MS réalisés.

N° essai	Cycle thermique	Matériau	Conditions environnementales	Masse de l'échantillon (mg)
1	Cycle 1	Poudre	Air	13,5
2	Cycle 2	Poudre	Air	14,7
3	Cycle 2	Massif	Air	14,8
4	Cycle 2	Poudre	N <sub>2</sub>	16,2

### 4.3. Résultats d'inventaire et modélisations associées

#### 4.3.1. Consommation C/PPS

La consommation du matériau composite du procédé considéré peut se diviser en deux fractions : une fraction de matière contenue dans la pièce finale et une fraction de matière nécessaire au procédé mais qui finit en chutes de production lors des étapes de découpe de la préforme ou bien de finition (détourage) de la pièce réalisée. La consommation de matière est un flux d'inventaire fortement dépendant de la géométrie de la pièce. Afin de le quantifier, on propose de le modéliser par un taux de chute permettant pour une pièce de masse donnée de calculer la quantité de matière nécessaire à sa fabrication.

Afin de quantifier le taux de chute de matière relatif au procédé de thermoformage-estampage, des données de taux de chute de matière lors de la mise en forme de composite ont été collectées (Tableau 12). En calculant la moyenne de ces données, un taux de chute égal à 34 % est proposé pour modéliser les chutes engendrées par le procédé de thermoformage-estampage. Cette moyenne concorde avec l'ordre de grandeur des taux de chute donné par les partenaires industriels de cette thèse. Lors de la quantification de la consommation totale de matière du procédé (flux d'inventaire entrant), le modèle évalue les chutes de matière qui sont un flux d'inventaire sortant du système. Afin de répartir la production de chutes entre l'étape de découpe de la préforme par jet d'eau abrasif et l'étape de

finition (détourage) de la pièce par usinage, des coefficients  $R_{DJE\ chutes}$  et  $R_{chutes\ finition}$ , dont la somme sera égale à 1, sont utilisés.

Tableau 12 : Taux de chute inhérents à divers procédés de mise en forme de composites.

Référence	Procédé de fabrication	Taux de chute
[41]	RTM et autoclave	80 %
[54]	SMC	60 %
[42]	Pré-imprégné et infusion, avec : Autoclave Four thermique Four micro-onde	30 %
[47]	Infusion avec polymérisation en autoclave	50 %
[71]	Pas de procédé spécifique : Valeur moyenne basée sur les réponses d'industriels en Afrique du Sud (SA) et au Royaume Unis (UK) à un questionnaire	5.7 % (SA) 11.3 % (UK)
[72]	Placement de fibre automatisé (industrie aéronautique)	27 %
[73]	Infusion	20 %
[43]	Autoclave et PBM	20 %
[74]	Pas de procédé spécifique	40 %
Industriels partenaires de la thèse	Pas de procédé spécifique	40 % - 70 %

L'approche proposée ici permet une évaluation rapide de la consommation de matériau du procédé qui ne nécessite pas l'emploi de méthode de simulation ou la réalisation d'essais de fabrication. Néanmoins, cette méthode d'évaluation ne prend pas en compte différents paramètres qui jouent sur la consommation de matière comme la géométrie de la pièce fabriquée ou les dimensions des plaques de semi-produit.

#### 4.3.2. Découpe jet d'eau de la préforme

##### 4.3.2.1. Consommation d'énergie électrique de la machine de découpe jet d'eau

Les relevés électriques sur la machine de découpe jet d'eau ont été réalisés avec le Fluke 434 II et les pinces ampèremétriques i30s lors de la découpe de pièces en C/PPS (Figure 36-b.). Pour ces essais, le courant a été mesuré au niveau de l'alimentation de la machine et la tension a été supposée égale à 230 V (Figure 36-a.).

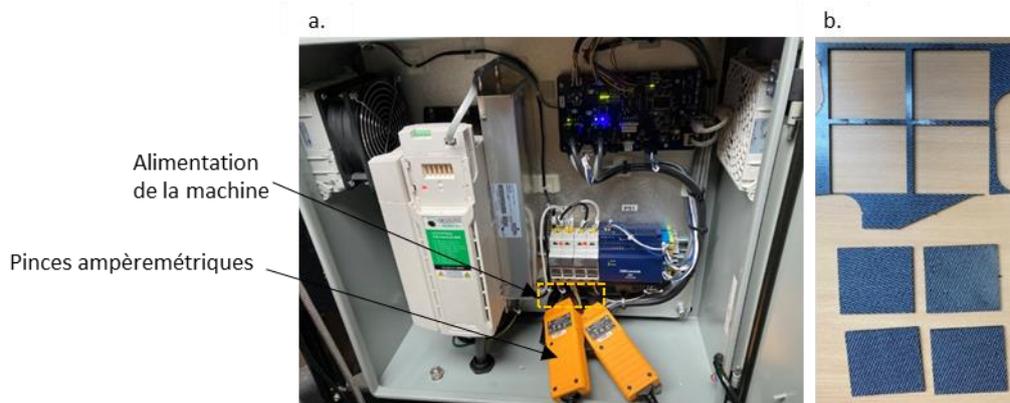


Figure 36 : a. Montage électrique pour les relevés de puissance active consommée par la machine de découpe jet d'eau ; b. Découpes réalisées lors des relevés électriques sur la machine de découpe jet d'eau.

Des relevés électriques réalisés sur la machine de découpe jet d'eau sont présentés sur la Figure 37-a. pour la découpe successive de quatre pièces identiques. En se basant sur la forme de ces relevés, une modélisation de la puissance électrique a été proposée sous la forme d'une fonction constante par morceau. Comme représentée sur la Figure 37-b., cette modélisation se base sur la division du fonctionnement de la machine de découpe jet d'eau en deux états : phase de ralenti et phase de découpe.

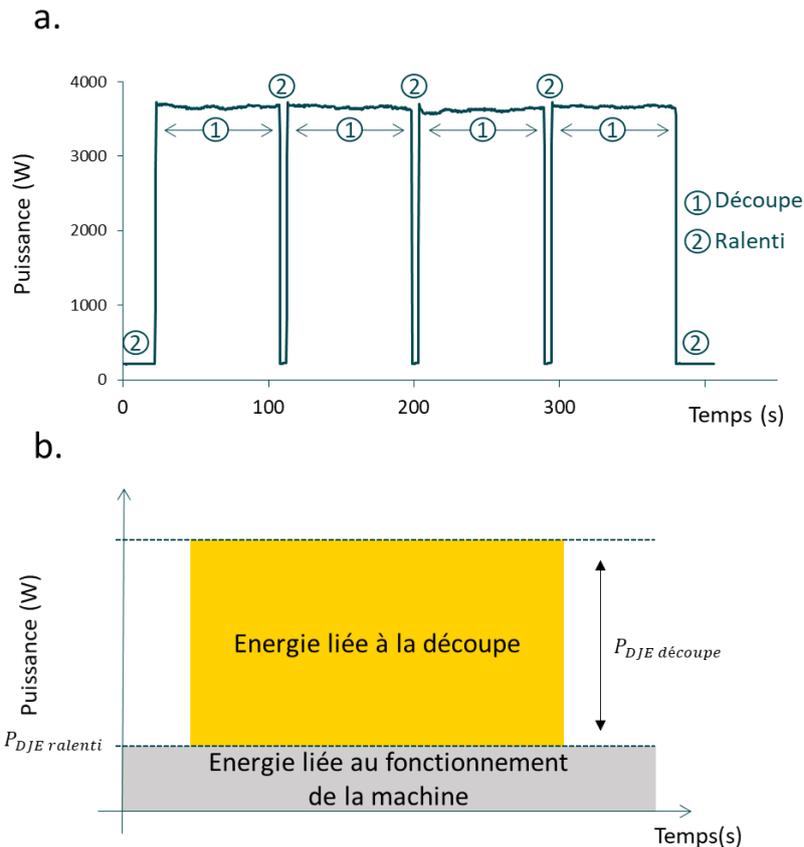


Figure 37 : Consommation électrique de la machine de découpe jet d'eau ProtoMAX (OMAX) :  
a. Relevés de puissance consommée lors de la découpe de 4 pièces ; b. Modèle de consommation de puissance proposé.

Le modèle proposé s'écrit donc :

$$E_{DJE\ découpe} = \frac{P_{DJE\ découpe}}{v_{DJE\ découpe}} \times L_{découpe} + P_{DJE\ ralenti} \times t_{DJE\ fonctionnement}$$

Avec :

$E_{DJE\ découpe}$  : Énergie consommée par la machine de découpe jet d'eau

$P_{DJE\ découpe}$  : Puissance consommée par la machine lors de la découpe jet d'eau

$v_{DJE\ découpe}$  : Vitesse de découpe (fixée à 4 mm/s dans les essais réalisés)

$L_{découpe}$  : Longueur découpée

$P_{DJE\ ralenti}$  : Puissance consommée par la machine de découpe jet d'eau au ralenti

$t_{DJE\ fonctionnement}$  : Durée de fonctionnement de la machine de découpe jet d'eau

L'analyse des données expérimentales a permis de déterminer les coefficients du modèle proposé. La puissance de ralenti a été évaluée à 212,7 W ( $\pm 8,5$  W) et la puissance de découpe à 3 612 W ( $\pm 40$  W).

#### 4.3.2.2. Consommations et rejets d'eau et d'abrasifs

Les consommations d'eau et d'abrasifs ont été modélisées en utilisant les spécifications de la machine de découpe jet d'eau ProtoMAX (OMAX). La consommation d'eau et la consommation d'abrasifs ont été modélisées respectivement par un débit de  $13,8 \text{ mL}\cdot\text{s}^{-1}$  et par un débit de  $1,9 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$  lors de la phase de découpe de la machine. Connaissant la vitesse de découpe ( $4 \text{ mm/s}$ ) et la longueur découpée, les consommations d'eau et d'abrasifs peuvent être calculées. Par conservation, les flux d'inventaire sortants lors de cette étape unitaire (déchets et eaux usées) sont considérés égaux aux flux d'eau et d'abrasifs entrants.

#### 4.3.3. Chauffage infrarouge

Pour modéliser la consommation électrique du four infrarouge durant la phase de chauffage, des relevés électriques de courant et de tension ont été réalisés lors de cycles de chauffage de pièces en C/PPS de  $4,3 \text{ mm}$  d'épaisseur avec différents réglages des paramètres de température de consigne et de puissance de chauffage présentés dans le Tableau 13. Des relevés au niveau de l'alimentation générale du four infrarouge ont été réalisés avec les énergimètres Fluke 434 II (pinces ampèremétriques i30s) et Fluke 1736 (pinces ampèremétriques iFlex 1500-12) (Figure 38-a. et b.). Des relevés au niveau d'un sous-système comprenant deux panneaux radiants ont également été réalisés avec les énergimètres Fluke 434 II (Figure 38-c.). En plus des relevés électriques, les données mesurées par les pyromètres du four sont collectées afin de connaître l'évolution de la température des pièces au cours du chauffage.

Tableau 13 : Paramètres machine utilisés lors des relevés électriques réalisés sur le four IR.

Paramètres	Stratégie de mesure de la puissance électrique
Puissance de chauffage : 70 % ; 85 % ; 100 % Température de consigne : 310 °C ; 335 °C ; 370 °C	Mesure des courants et tensions : <ul style="list-style-type: none"> <li>• au niveau de l'alimentation avec le Fluke 434 II et le Fluke 1736</li> <li>• au niveau d'un sous-système de deux panneaux radiants avec le Fluke 434 II</li> </ul>

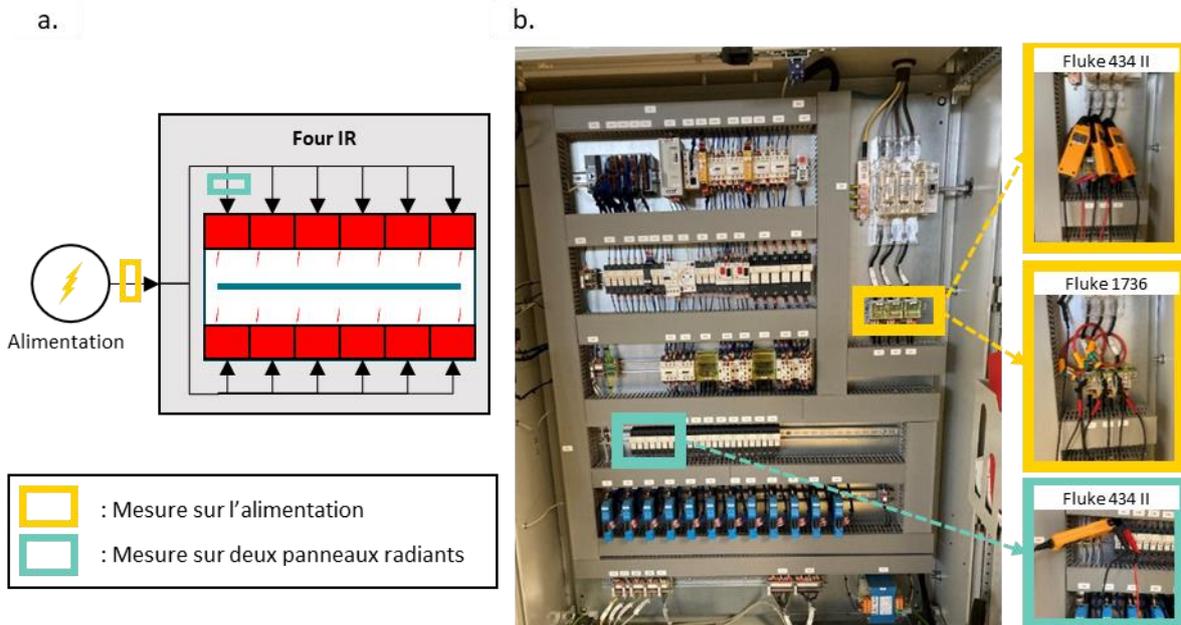


Figure 38 : Montage expérimental utilisé pour les relevés électriques sur le four IR : a. Représentation schématique des différents points de mesure ; b. Tableau électrique du four IR et emplacement des mesures électriques réalisées sur l'alimentation générale avec le Fluke 434 II (pinces i30s) et le Fluke 1736 (pinces iFlex 1500-12) ainsi que sur l'alimentation de deux panneaux radiants avec le Fluke 434 II (pinces i30s).

Un exemple de relevé électrique réalisé sur le four IR au niveau de deux panneaux radiants est présenté sur la Figure 39-a. Ces résultats ont été obtenus lors du chauffage de matériau C/PPS à 310 °C avec 70 % de la puissance de chauffage. En se basant sur la forme de ces relevés, un modèle de puissance consommée est proposé. Le fonctionnement du four est alors décomposé en deux phases : phase de ralenti et phase de fonctionnement (phase de chauffage du matériau). La phase de fonctionnement est divisée en une phase de montée en température de la surface du matériau et en une phase de maintien en température, nécessaire pour homogénéiser la température au cœur du matériau une fois la température de consigne atteinte en surface. La phase de montée en température en surface est modélisée par une puissance consommée constante par morceau. La phase de maintien est plus complexe à modéliser car elle décroît au cours du temps. On propose pour cette phase de plutôt établir une énergie consommée pour l'homogénéisation de la température dans la pièce. Pour compléter ce modèle, la puissance consommée lors du ralenti machine est intégrée comme une fonction constante. La Figure 39-b. représente le modèle de consommation de puissance proposé pour le four IR. Ce modèle s'écrit de façon mathématique :

$$E_{four\ IR} = P_{IR\ chauffage} \times t_{IR\ chauffage} + E_{IR\ maintien} + P_{IR\ ralenti} \times t_{IR\ fonctionnement}$$

Avec :

$E_{four\ IR}$  : Energie consommée par le four IR

$P_{IR\ chauffage}$  : Puissance consommée par le four lors de la phase de montée en température à la surface de la pièce

$t_{IR\ chauffage}$  : Durée nécessaire pour atteindre la température de consigne en surface de la pièce chauffée dans le four IR

$E_{IR\ maintien}$  : Energie consommée par le four IR lors de la phase de maintien en température

$P_{IR\ ralenti}$  : Puissance consommée par le four IR au ralenti

$t_{IR\ fonctionnement}$  : Durée de fonctionnement du four IR

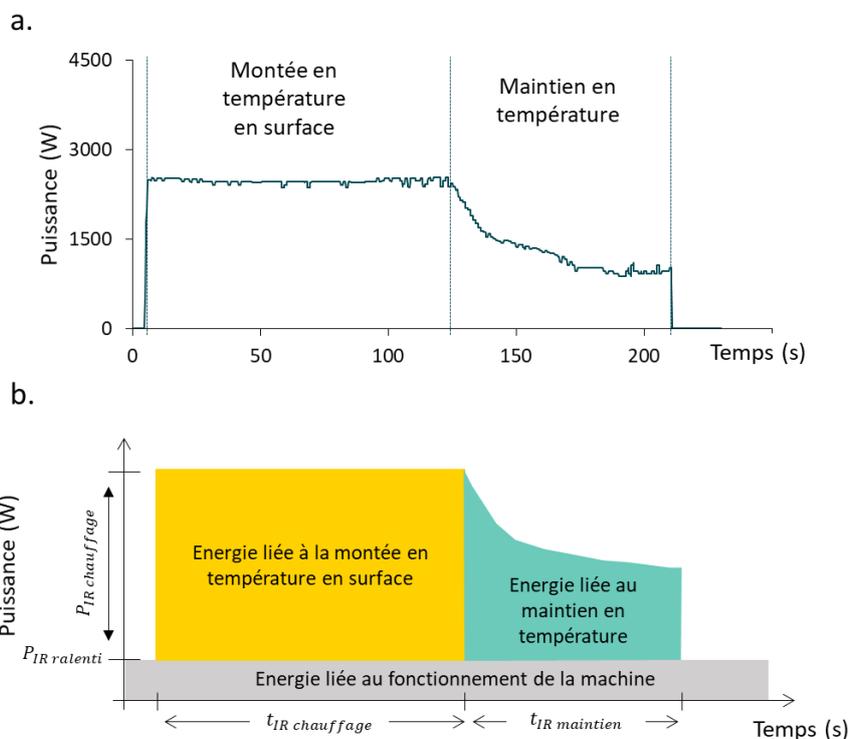


Figure 39 : Modélisation de la consommation d'énergie électrique du four IR : a. Puissance consommée par deux panneaux radiants lors du chauffage de C/PPS à 310 °C et une puissance de chauffage  $H_{paramètre} = 70\%$  ; b. Modèle de consommation de puissance proposé.

Le modèle proposé présente des paramètres de puissance électrique ( $P_{IR\ chauffage}$ ,  $E_{IR\ maintien}$  et  $P_{IR\ ralenti}$ ) mais aussi des paramètres temporels pour la durée de chacun des états de fonctionnement du four ( $t_{IR\ chauffage}$ ). Ces paramètres de durée sont directement liés à l'évolution thermique du système durant le processus de chauffage de la préforme. Afin de quantifier les paramètres du modèle, les données électriques mesurées mais également les données de température évaluées par les pyromètres du four sont traitées.

Tout d'abord, les relevés de consommations électriques ont permis de déterminer les coefficients du modèle électrique. La puissance constante associée au ralenti machine a été identifiée grâce aux mesures au niveau de l'alimentation machine. La puissance relative au ralenti machine a été évaluée à 296 W ( $\pm 10$  W).

La puissance consommée lors de la phase de montée en température ( $P_{IR\ chauffage}$ ) en surface a été évaluée pour les différents réglages de puissance de chauffage, noté  $H_{paramètre}$ . La fin de la phase de montée en température et le début de la phase de maintien en température a été définie comme l'instant où la température du matériau en surface mesurée par l'un des pyromètres (inférieur ou supérieur) atteint la température de consigne (à 10 °C près). Par régression linéaire, une loi décrivant le comportement de la puissance consommée lors de la phase de montée en température en fonction de ce paramètre a été calculée (Figure 40). Cette modélisation linéaire a été proposée car elle semble convenir dans la gamme de puissance de chauffage étudiée ([70 % ; 100 %]). Cependant, elle ne pourra pas être directement étendue en raison de la non-linéarité potentielle de la puissance consommée par le four sur une gamme plus large de réglage du four.

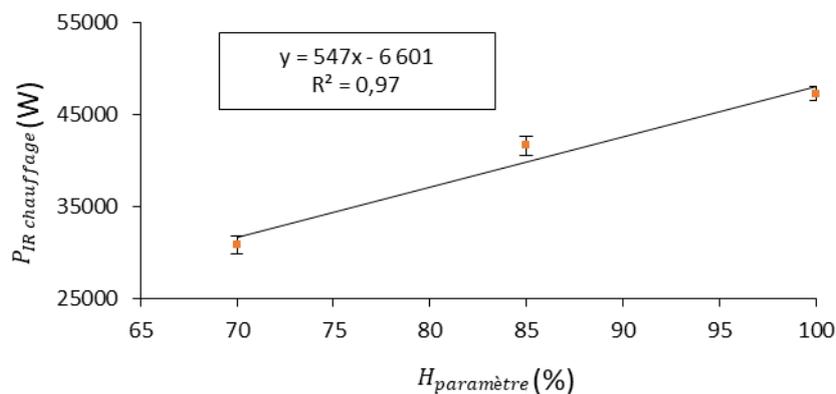


Figure 40 : Modélisation linéaire de la puissance consommée par le four lors de la phase de montée en température  $P_{IR\ chauffage}$  en fonction du réglage de puissance du four  $H_{paramètre}$ .

Afin d'évaluer l'énergie liée à la phase de maintien en température, il est nécessaire de connaître l'évolution de la puissance consommée au cours du maintien mais aussi la durée de cette phase. Ici, on estimera la durée de cette phase, nécessaire à homogénéiser la température dans l'épaisseur de la pièce, à 30 secondes. Cette valeur a été choisie à partir des résultats d'essais de chauffage infrarouge sur des pièces instrumentées avec des thermocouples qui sont présentés plus en détails dans le chapitre 6 de ce manuscrit. L'énergie de maintien  $E_{IR\ maintien}$  a ainsi pu être calculée pour différentes températures de consigne, comme présenté sur la Figure 41. En exploitant ces résultats avec une régression linéaire, le coefficient du modèle représentant l'énergie de maintien en température a ensuite pu être exprimé en fonction de la température de consigne du four (pour notre gamme de température).

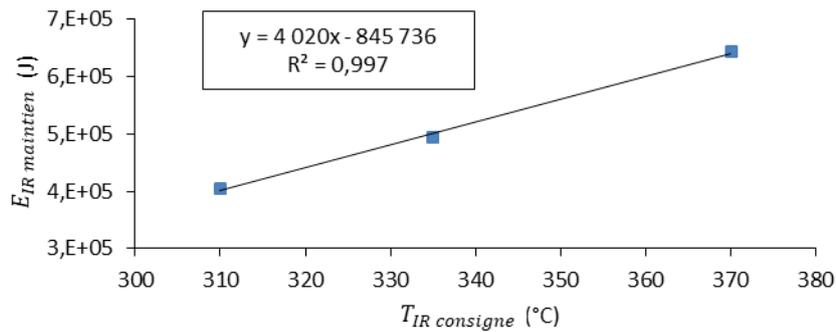


Figure 41 : Modélisation linéaire de l'énergie de maintien en température  $E_{IR\ maintien}$  consommée par le four en fonction de la température de consigne du four  $T_{IR\ consigne}$ .

Afin de modéliser le paramètre de durée de chauffage  $t_{IR\ chauffage}$  du modèle, les relevés de température des pyromètres du four ont été exploités. Un exemple de relevé de température en surface par les pyromètres est proposé sur la Figure 42. L'augmentation de température lors de la phase de montée en température étant très linéaire, les vitesses de chauffage correspondant aux essais réalisés ont été calculées par interpolation linéaire. Ces interpolations permettent une bonne modélisation de l'évolution de la température car les coefficients de corrélation associés sont tous supérieurs à 0,98.

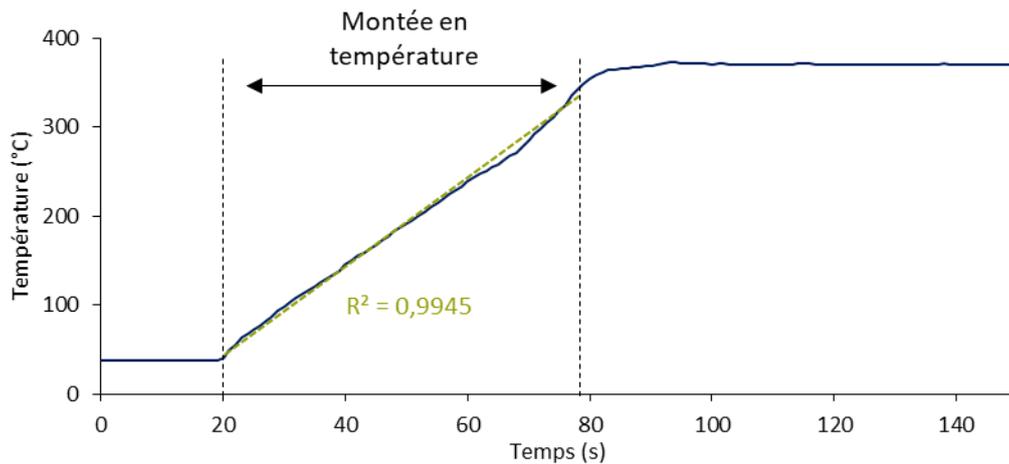


Figure 42 : Température en surface lors d'un essai de chauffage à 370 °C avec une puissance de chauffage de 100 %.

Au cours des essais, le four monte en température au fur et à mesure que les cycles de chauffage s'enchaînent. En regardant l'évolution de la vitesse de chauffage au cours d'une série de production, les résultats montrent que la vitesse de chauffage  $v_{IR\ chauffage}$  augmente lors des premiers cycles de production avant d'atteindre un régime permanent ou la vitesse se stabilise après environ 5 cycles de chauffage (Figure 43). Ceci s'explique par l'inertie thermique du four. Dans le cadre de cette étude, les vitesses de chauffage considérées sont celles mesurées en régime permanent, en conséquence les effets transitoires de la montée en température du four ont été négligés.

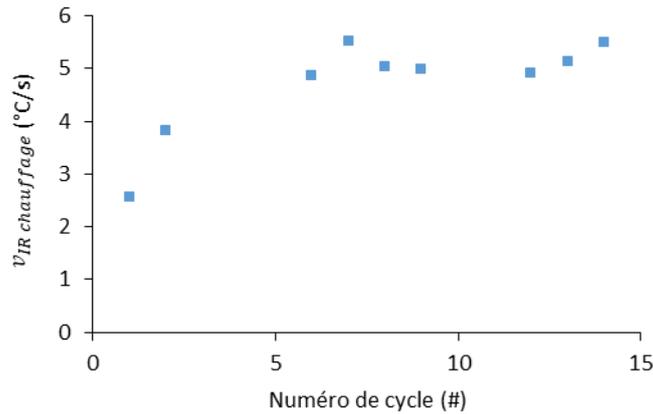


Figure 43 : Vitesses de chauffage  $v_{IR \text{ chauffage}}$  calculées pour des chauffages successifs pour une puissance de chauffage  $H_{\text{paramètre}} = 85 \%$ .

Les vitesses de chauffage évaluées en régime permanent sont présentées sur la Figure 44 pour trois valeurs de  $H_{\text{paramètre}}$ . Par régression linéaire, une expression de la vitesse de montée en température a été calculée en fonction du paramètre de puissance de chauffage. Cette expression permet ainsi de calculer la durée de la phase de montée en température  $t_{IR \text{ chauffage}}$  en fonction du réglage de puissance du four, de la température initiale du matériau et de la température de consigne.

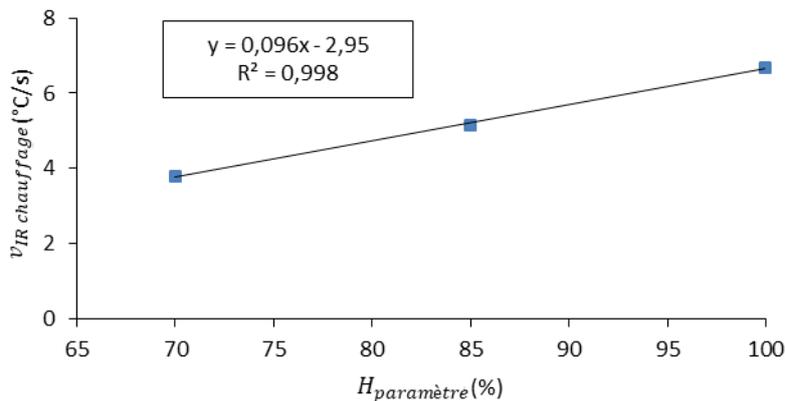


Figure 44 : Vitesse de montée en température en régime permanent  $v_{IR \text{ chauffage}}$  en fonction du réglage de puissance du four  $H_{\text{paramètre}}$ .

#### 4.3.4. Transferts par le bras robotisé

Plusieurs travaux de recherche se sont intéressés à la consommation d'énergie de bras robotisés, développant notamment plusieurs méthodes pour diminuer les consommations d'énergie électrique de ces systèmes [75], [76]. L'énergie consommée par différents bras robotisés a ainsi déjà été évaluée expérimentalement [77] et par calcul/simulation [78]. Par conséquent, l'utilisation de données issues de la littérature a été choisie suivant la méthodologie présentée sur la Figure 27 pour modéliser les consommations d'énergie lors des phases de transfert : ce flux est considéré comme peu influent sur les résultats environnementaux de notre étude (étape 1), il est souvent pris en compte (étape 2) et des données d'un niveau de confiance jugé acceptable sont disponibles (étape 3). Plus précisément, le modèle de consommation d'énergie électrique lors des phases de transfert a été construit à partir des résultats des travaux de Chemnitz *et al.* [77].

Dans leurs travaux, Chemnitz *et al.* ont mesuré la consommation d'énergie de deux bras robotisés industriels dont les spécifications correspondent à une utilisation dans des applications de thermoformage-estampage : un robot Comau SMART SiX et un robot Kuka KR 6 de charge utile de 6 kg et de portée respectives de 1,4 m et de 1,6 m [77]. L'influence des paramètres de vitesse et d'accélération des bras robotisés sur la consommation électrique des machines lors d'un mouvement spécifique a particulièrement été étudiée. Le mouvement étudié est représenté sur la Figure 45. Il consiste à se déplacer sur une portion de sphère de 90° d'azimut et d'angle d'élévation. Ce mouvement représente assez bien le déplacement du bras robotisé lors d'une séquence d'« attrape – dépose - mise en sécurité » exécutée durant le procédé de thermoformage-estampage.

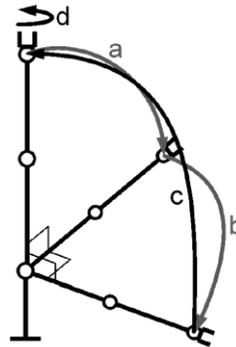


Figure 45 : Mouvement réalisé par les bras robotisés étudiés par Chemnitz *et al.* [77].

Utilisant les données électriques mesurées pour différents paramétrages des robots, la consommation d'énergie de ces robots a été modélisée en fonction de la durée du mouvement. Cette modélisation, présentée sur la Figure 46, permet de calculer l'énergie consommée pour réaliser un mouvement en fonction de la durée de ce mouvement par l'intermédiaire d'une fonction polynôme du second degré. La phase de ralenti des machines a également été étudiée en évaluant la puissance consommée par les deux bras robot dans ce régime de fonctionnement : 260 W pour le Comau et 355 W pour le Kuka.

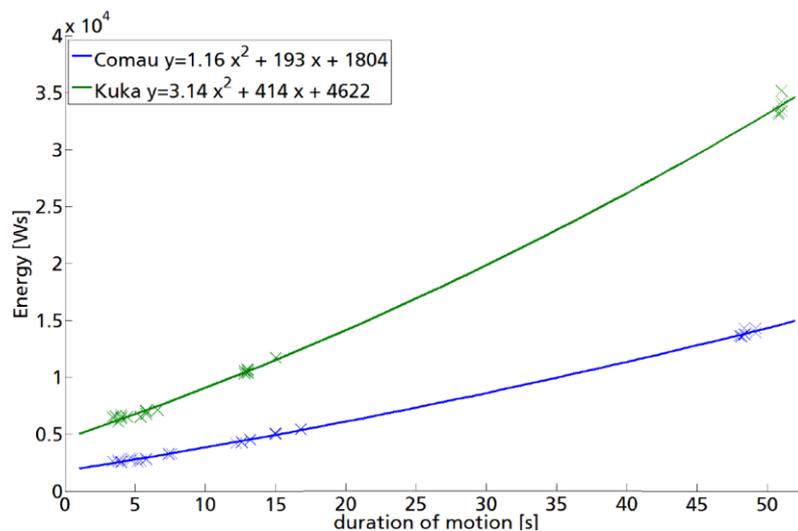


Figure 46 : Consommation d'énergie des bras robot pour réaliser un mouvement en fonction de la durée du mouvement [77].

En exploitant les résultats des travaux de Chemnitz *et al.* pour le robot Comau, le modèle de consommation d'énergie du bras robotisé lors des phases de transfert du procédé de thermoformage-estampage de C/PPS a été défini comme (Figure 47) :

$$E_{robot} = E_{robot \text{ déplacement}} + P_{robot \text{ ralenti}} \times t_{robot \text{ ralenti}}$$

Avec :

$E_{robot}$  : Energie consommée par le bras robot pour une étape de transfert lors du procédé de thermoformage-estampage.

$E_{robot\ déplacement}$  : Energie consommée par le bras robot pour réaliser un mouvement, calculée par l'intermédiaire du modèle développé par Chemnitz *et al.* [77].

$P_{robot\ ralenti}$  : Puissance consommée par le bras robot au ralenti.

$t_{robot\ ralenti}$  : Durée de fonctionnement au ralenti du bras robot.

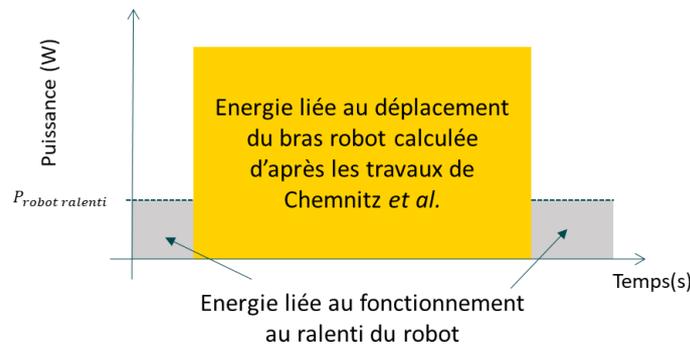


Figure 47 : Modèle proposé pour la consommation d'énergie électrique du bras robot d'après les travaux de Chemnitz *et al.* [77].

#### 4.3.5. Estampage

##### 4.3.5.1. Consommation d'énergie électrique de la presse

Afin de modéliser la consommation électrique de la presse, des relevés de consommation électrique ont été réalisés pour les différents réglages des paramètres de température de moule et d'effort de fermeture présentés dans le Tableau 14. Des relevés électriques de courant et de tension ont été réalisés en branchant les énergie-mètres Fluke 434 II et Fluke 1736 au niveau de l'alimentation de la presse SCAMEX (Figure 48). La presse se décompose en deux sous-systèmes : un sous-système thermique lié au chauffage et au maintien en température du moule et un autre sous-système mécanique lié à la mise en forme par emboutissage. Les deux sous-systèmes ont été traités séparément lors des essais. Une première série de mesures a servi à évaluer la consommation électrique lors de la sollicitation du système mécanique durant des cycles de fermeture, mise sous pression puis ouverture de la presse. Des essais de chauffage des plateaux chauffants ont ensuite permis d'évaluer la consommation électrique du sous-système thermique de la presse.

Tableau 14 : Paramètres presse utilisés lors des relevés électriques.

Paramètres	Stratégie de mesure de la puissance électrique
Température des plateaux : 50 °C ; 100 °C ; 230 °C Effort de fermeture : 200 kN	Mesure des courants et tensions au niveau de l'alimentation avec les Fluke 434 II et Fluke 1736

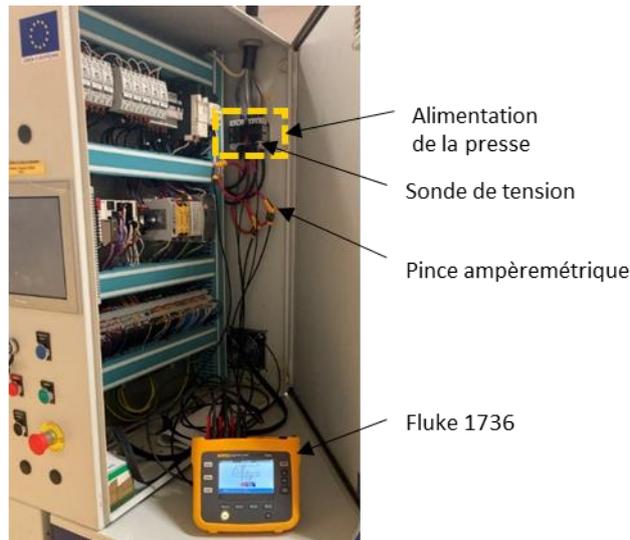


Figure 48 : Tableau électrique de la presse et emplacement des mesures électriques réalisées.

Travaillant sur le sous-système thermique, la forme des relevés électriques (Figure 49-a.) a permis de proposer une modélisation des consommations électriques de ce sous-système. Ce modèle divise le fonctionnement du système thermique en deux phases : une phase de montée en température et une phase de maintien en température (Figure 49-b). La première phase de montée en température est modélisée par une consommation d'énergie initiale. Lors de l'exploitation de ce modèle, une fraction de cette énergie, dont la valeur dépendra du nombre pièces produites, sera attribuée à la production de chaque pièce. Concernant la phase de maintien en température du moule, une puissance électrique constante est utilisée pour modéliser l'énergie électrique consommée pour maintenir le système en température une fois le régime permanent établi. Une puissance constante de ralenti machine (liée au fonctionnement de l'automate, de la ventilation...) est également considérée dans le modèle.

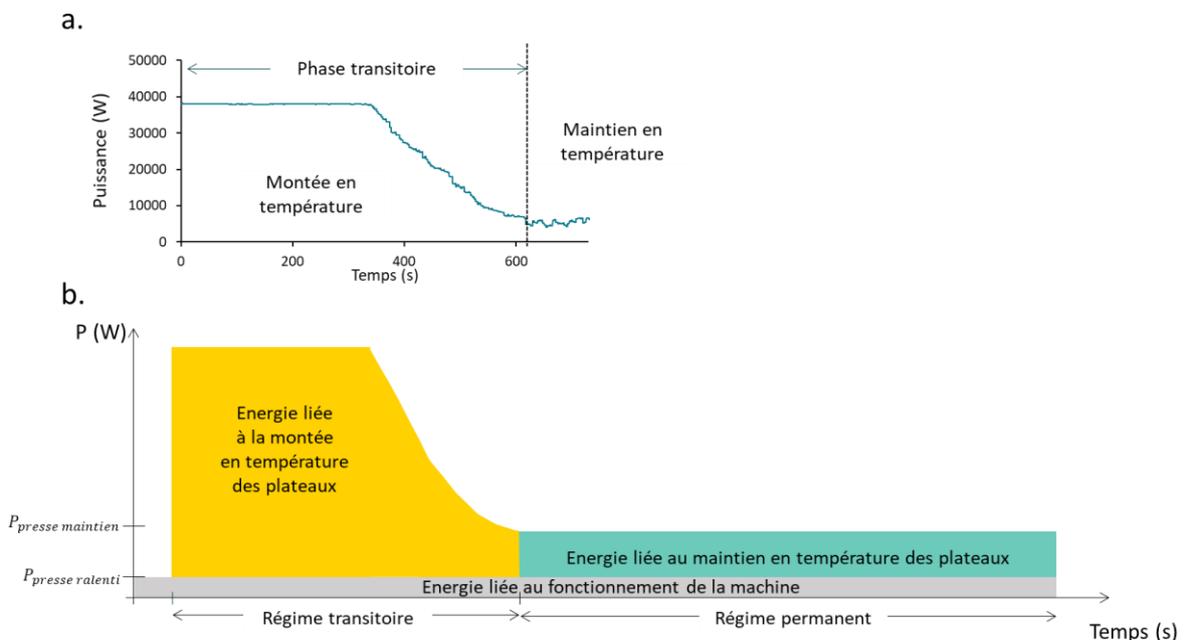


Figure 49 : Consommation d'énergie électrique du sous-système thermique (plateaux chauffants) de la presse : a. Relevés électriques lors du chauffage des plateaux à 100 °C ; b. modèle électrique proposé.

Considérant le sous-système mécanique, la forme des relevés électriques (Figure 50-a.) a motivé la modélisation de la consommation électrique de ce sous-système par un modèle constant par morceau. Avec cette modélisation, on néglige le fait que la phase de relâchement de la pression consomme peu d'énergie. C'est justifié en raison de la courte durée de cette phase durant toute la durée d'un estampage. En combinant ce modèle avec le modèle développé pour le sous-système thermique, un modèle complet de consommation électrique est défini. Ce modèle est représenté sur la Figure 50-b. pour trois cycles d'estampage successifs.

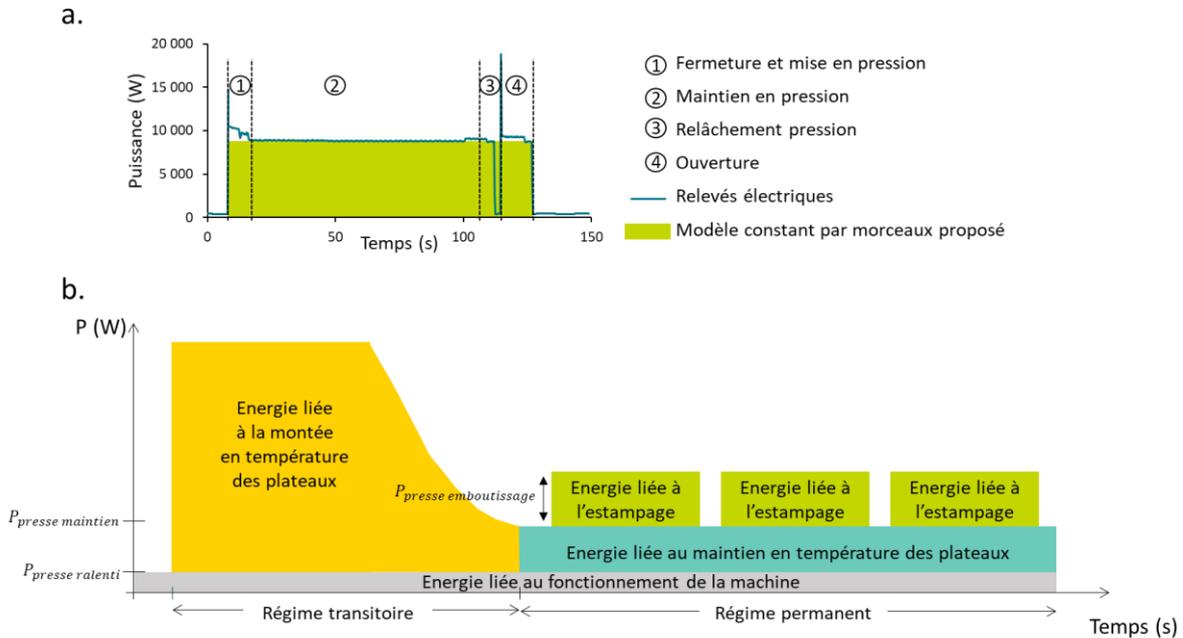


Figure 50 : Consommation d'énergie électrique du sous-système mécanique de la presse : a. Relevés électriques lors d'un cycle fermeture-maintien en pression-ouverture à 200 kN superposés avec le modèle constant par morceau proposé; b. modèle électrique global proposé.

Le modèle proposé pour la presse s'écrit pour la fabrication d'une seule pièce :

$$E_{presse} = E_{presse\ thermique} + E_{presse\ mécanique} + P_{presse\ ralenti} \times t_{presse\ fonctionnement}$$

Où :

$$E_{presse\ thermique} = \frac{E_{presse\ chauffage}}{N_{cycle}} + P_{presse\ maintien} \times t_{presse\ maintien}$$

$$E_{presse\ mécanique} = P_{presse\ emboutissage} \times t_{presse\ emboutissage}$$

Avec :

$E_{presse}$  : Énergie consommée par la presse.

$E_{presse\ thermique}$  : Énergie consommée par le sous-système thermique de la presse.

$E_{presse\ mécanique}$  : Énergie consommée par le sous-système mécanique de la presse.

$P_{presse\ ralenti}$  : Puissance consommée par la presse au ralenti.

$t_{presse\ ralenti}$  : Durée de fonctionnement de la presse.

$E_{presse\ chauffage}$  : Énergie consommée pour la montée en température du sous-système thermique.

$N_{cycle}$  : Nombre de pièces fabriquées par série de production : permet de répartir sur la production la consommation initiale d'énergie de mise en régime permanent du sous-système thermique.

$P_{\text{presse maintien}}$  : Puissance consommée par la presse pour maintenir la température de consigne.

$t_{\text{presse maintien}}$  : Durée de maintien de la température de consigne.

$P_{\text{presse emboutissage}}$  : Puissance consommée par le sous-système mécanique en fonctionnement.

$t_{\text{presse emboutissage}}$  : Durée de fonctionnement du sous-système mécanique.

En exploitant les résultats de mesure électrique lors des essais sur le sous-système mécanique, les valeurs des paramètres de puissance électrique de maintien en température  $P_{\text{presse maintien}}$  et d'énergie de montée en température  $E_{\text{presse chauffage}}$  ont été calculées pour les différentes températures de consigne testées (Figure 51). Par l'intermédiaire de régressions linéaires, ces coefficients du modèle sont alors exprimés comme des fonctions de la température de consigne des plateaux de la presse. L'utilisation de modèles linéaires est choisie car seulement trois niveaux de température de consigne ont été utilisés lors des essais. Comme pour les autres modèles d'inventaire, une possibilité pour affiner cette modélisation consisterait alors à réaliser de nouveaux essais pour d'autres valeurs de température de consigne puis d'utiliser des modèles plus complexes comme par exemple des polynômes d'ordre supérieur. Réaliser ce type d'amélioration des modèles d'inventaire n'est cependant pas forcément nécessaire. En effet, les bénéfices sur l'analyse environnementale de ce type de travaux visant l'amélioration des données d'inventaire doivent être mis en balance avec l'investissement que représente l'augmentation du nombre de relevés.

L'exploitation des relevés expérimentaux a également permis d'évaluer les paramètres du modèle pour le sous-système mécanique :

- $P_{\text{presse ralenti}} = 427 \text{ W} \pm 24 \text{ W}$
- $P_{\text{presse emboutissage}} = 8\,374 \text{ W} \pm 131 \text{ W}$

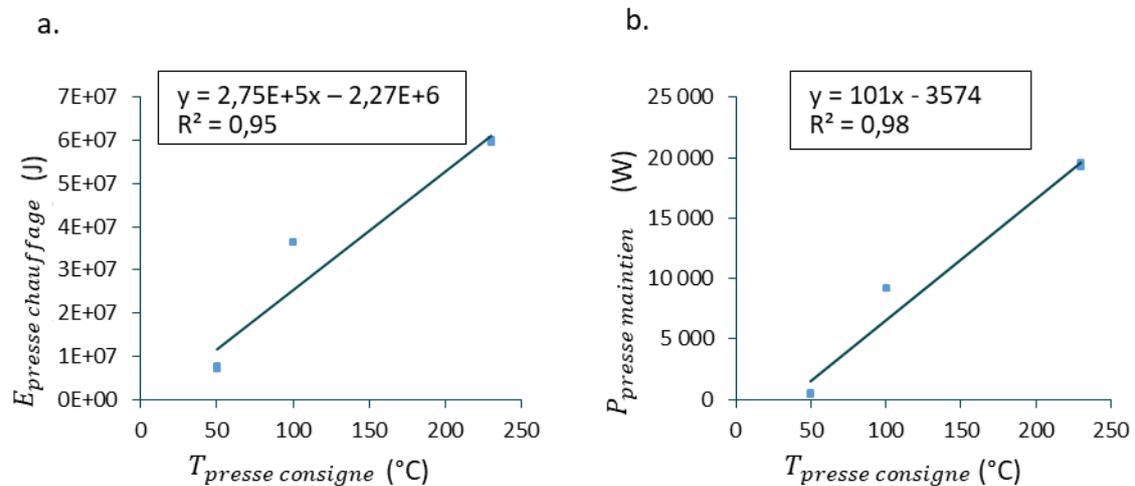


Figure 51 : Modélisation linéaire des coefficients du modèle de consommation électrique du système thermique de la presse en fonction de la température de consigne des plateaux chauffants  $T_{\text{presse consigne}}$  :

a. Energie de montée en température  $E_{\text{presse chauffage}}$  ; b. Puissance de maintien en température  $P_{\text{presse maintien}}$ .

#### 4.3.5.2. Consommation d'agent démoulant

Afin d'évaluer la consommation d'agent démoulant lors du procédé de thermoformage-estampage, des données de la littérature ont été utilisées pour calculer des facteurs de consommation d'agent démoulant (Tableau 15). Le choix de cette méthode de collecte a été fait en suivant la méthodologie présentée sur la Figure 27, puisque des données d'un niveau de confiance jugé suffisant sont

disponibles (étape 3). Ces facteurs sont calculés en fonction de la quantité d'agent démoulant utilisée et de la surface des pièces produites, choisie comme estimateur de la surface des moules utilisés.

Afin de modéliser la consommation d'agent démoulant lors du procédé de thermoformage-estampage, un facteur de consommation d'agent démoulant égal à  $11,7 \text{ g.m}^{-2}$  a été calculé comme la moyenne des facteurs de consommation présentés dans le Tableau 15.

Tableau 15 : Données de consommation d'agent démoulant issues de la littérature.

Référence	Donnée de la littérature	Facteur de consommation d'agent démoulant
[77]	0,015 kg consommé pour une pièce de 1,3 m <sup>2</sup> produite par des procédés autoclave et PBM	$1,15.10^{-2} \text{ kg/m}^2/\text{pièce}$
[37]	0,03 kg consommé pour une pièce de 1,8 m <sup>2</sup> produite par des procédés autoclave et PBM	$1,67.10^{-2} \text{ kg/m}^2/\text{pièce}$
[43]	0,03 kg consommé pour une pièce de 3 m <sup>2</sup> produite par des procédés autoclave et PBM	$1,00.10^{-2} \text{ kg/m}^2/\text{pièce}$
[35]	1 g consommé toutes les 2 000 pièces de 1,5 m <sup>2</sup> de surface produite par RTM et thermoformage-estampage	$3,33.10^{-4} \text{ kg/m}^2/\text{pièce}$
[79]	0,4 kg consommé pour une pièce de 19,9 m <sup>2</sup> produite par un procédé autoclave	$2,01.10^{-2} \text{ kg/m}^2/\text{pièce}$

#### 4.3.6. Finition par usinage

Pour modéliser la consommation d'énergie lors de l'étape unitaire de finition par usinage (détourage), la base de données Ecoinvent v3.5 a été utilisée. Ce choix est réalisé en appliquant la méthodologie présentée sur la Figure 27 : ce flux d'inventaire est jugé peu influent sur les résultats de l'analyse environnementale, il est fréquemment pris en compte et des données d'un niveau de confiance jugé suffisant sont disponibles. Différents modèles d'inventaire sont disponibles dans cette base de données pour des procédés d'usinage. Cependant, il n'existe pas de donnée propre à l'usinage de matériaux composites. Un modèle d'inventaire pour l'usinage d'un matériau métallique a donc été choisi. Un facteur de consommation d'énergie électrique égal à  $11,5 \text{ MJ.kg}^{-1}$  a ainsi été extrait du modèle disponible pour l'usinage par fraisage d'acier au chrome.

Le choix de ce modèle est discutable en raison des différences entre le procédé d'usinage métallique et celui utilisé pour l'étape de finition du thermoformage-estampage. Cependant, son utilisation est justifiée par la recherche d'un compromis entre la disponibilité des données et la précision des données que réclame leur exploitation. Le modèle d'usinage par fraisage d'acier au chrome a été choisi car il propose le facteur de consommation électrique le plus grand parmi les autres modèles d'inventaire disponibles pour le fraisage d'autres matériaux.

#### 4.3.7. Emissions dans l'air

##### 4.3.7.1. Résultats des relevés in-situ

Les résultats des mesures d'émissions in-situ obtenues avec les différentes approches expérimentales n'ont pas permis de détecter des émissions exploitables. En effet, aucun composé gazeux n'a été détecté au cours des différents essais. D'autre part, les relevés de particules fines ne permettent pas de conclure quant à ces émissions car ils sont très dispersés et sont difficilement différenciables de relevés témoins réalisés dans l'atelier sans fonctionnement des machines. Un exemple de résultat de mesures obtenus est présenté sur la Figure 52 pour un relevé réalisé au niveau du système d'extraction du four IR.

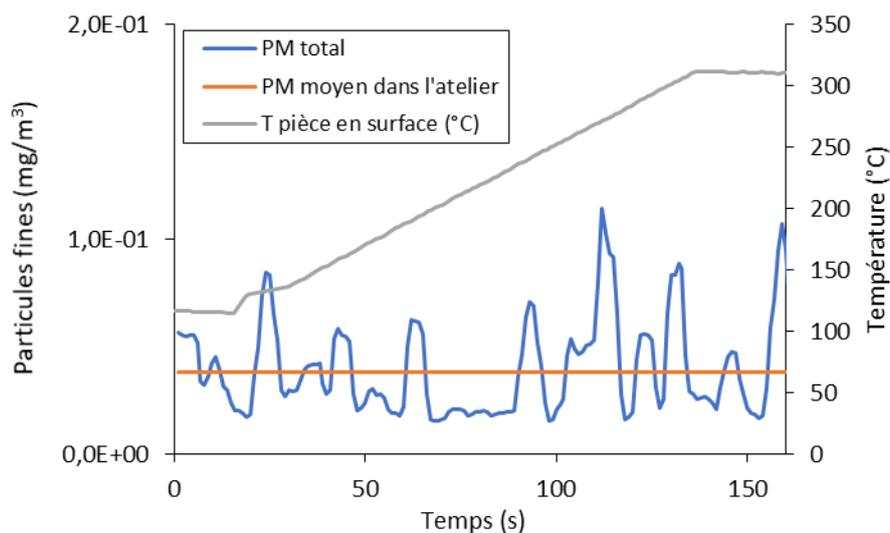


Figure 52 : Exemple de résultat des mesures d'émissions de particules fines totales lors d'un essai de chauffage dans le four IR à 100% de la puissance de chauffage.

Bien que les résultats de mesures d'émissions in-situ ne soient pas concluants, une modélisation des émissions dans l'air a tout de même été bâtie en se basant sur deux hypothèses :

**Hypothèse 1 :** Les émissions de composés gazeux lors des relevés expérimentaux ont été trop faibles pour pouvoir être détectées. On approximera ces émissions au seuil de détection de l'appareil de mesure (1 ppm pour le Q-TRAK utilisé avec la sonde 987).

**Hypothèse 2 :** Les mesures de particules fines sont trop dispersées pour détecter ces émissions. On approximera ces émissions par l'écart-type des relevés réalisés (0,102 mg.m<sup>-3</sup>).

Ces hypothèses ont pour conséquence de surestimer les émissions dans l'air lors du procédé. Cette stratégie de surestimation a été choisie car elle permet d'obtenir une première évaluation des impacts environnementaux associés à ce flux élémentaire et de donner une indication sur le besoin d'affiner ce modèle. Des impacts environnementaux faibles associés à ces flux élémentaires, malgré les surestimations réalisées, permettraient d'établir qu'il n'est pas prioritaire d'affiner le modèle d'émission par rapport aux objectifs de l'analyse environnementale réalisée.

En appliquant ces hypothèses aux relevés réalisés à la sortie du système d'extraction du four IR, des facteurs d'émission de composés gazeux et de particules fines ont pu être calculés. Connaissant la masse des pièces chauffées lors des différents essais et le débit d'extraction du four, ces coefficients d'émission sont :

- $C_{gaz} = 27 \text{ mg.kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$
- $C_{particules fines} = 0,155 \text{ mg.kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$

Ces coefficients permettent de quantifier des émissions dans l'air en fonction de la masse de la pièce et de la durée d'émission. Cette durée correspond au temps pendant lequel la température du matériau est au-dessus d'une valeur seuil ( $T_{émission}$ ) à partir de laquelle on considère que le matériau émet dans l'air des particules fines et des composés gazeux.

Afin de développer ces modèles d'émission, il a été nécessaire de s'appuyer sur des hypothèses. L'hypothèse 1 attribue la non-détection d'émissions de composés gazeux à la faible concentration de ces composés dans le gaz analysé par le détecteur à photo ionisation. Cependant, une autre explication

est possible. Il se peut aussi que le détecteur utilisé ne soit pas adapté à la détection des composés réellement émis. Bien que le détecteur Q-TRAK équipé d'une lampe de 10,6 eV soit adapté à la détection du sulfure d'hydrogène et du benzénethiol qui ont été identifiés comme les composés principalement émis lors du chauffage de PPS, d'autres composés avec des énergies d'ionisation supérieures à 10,6 eV peuvent également être dégagés d'après la littérature (Tableau 10). Or, ces composés ne sont pas détectables par le Q-TRAK dans cette configuration. Afin d'aller plus loin et de compléter ces travaux, il est nécessaire de caractériser plus précisément les composés émis par le matériau à haute température. C'est l'objectif des analyses ATG-MS réalisées sur le matériau C/PPS étudié durant la thèse.

#### 4.3.7.2. Résultats de l'ATG/DSC-MS

Afin de caractériser les espèces chimiques susceptibles d'être produites durant le procédé de thermoformage-estampage de C/PPS, des essais ATG/DSC-MS ont été réalisés. Les résultats des essais ATG en atmosphère inerte et dans l'air montrent que la perte de masse dans la plage de température du procédé (370 °C maximum) est faible (< 1 %) avec une accélération de la perte de masse à partir d'environ 420 °C (Figure 53). Les analyses DSC de ces essais montrent par ailleurs que la dégradation du matériau à haute température dégage moins d'énergie en atmosphère inerte que dans l'air, ce qui peut traduire l'apparition de mécanismes différents durant le chauffage comme par exemple des phénomènes d'oxydation en présence d'air.

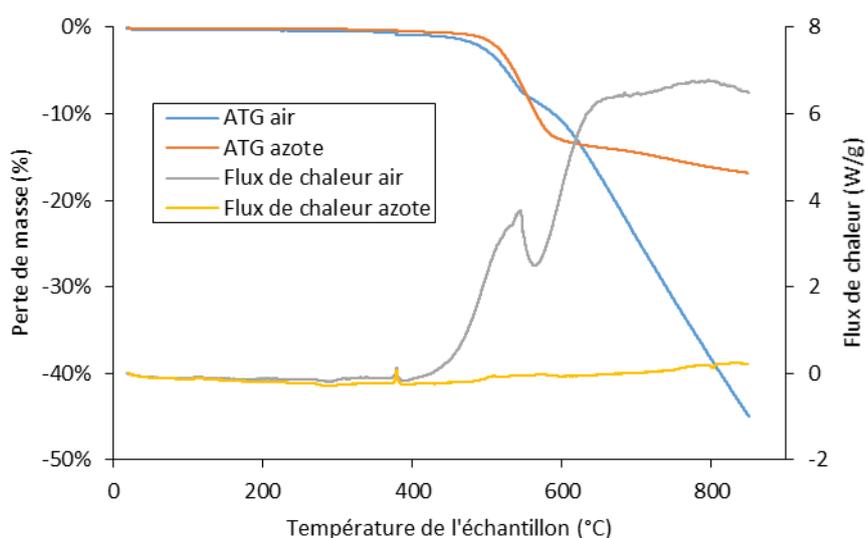


Figure 53 : Résultats des mesures ATG et DSC des essais 2 (sous air) et 4 (sous N<sub>2</sub>).

Les résultats des analyses des gaz effluents par spectrométrie de masse ont également permis d'identifier les composés chimiques émis. Sur la Figure 54, la dérivée du signal du spectromètre de masse au cours du temps est représentée pour les essais 2 et 4 décrits dans le Tableau 11. Les résultats des différents essais réalisés montrent alors une détection significative d'émissions de composés chimiques à partir d'une température d'environ 420 °C, température supérieure à la température maximale utilisée lors du procédé de thermoformage-estampage du C/PPS (370 °C).

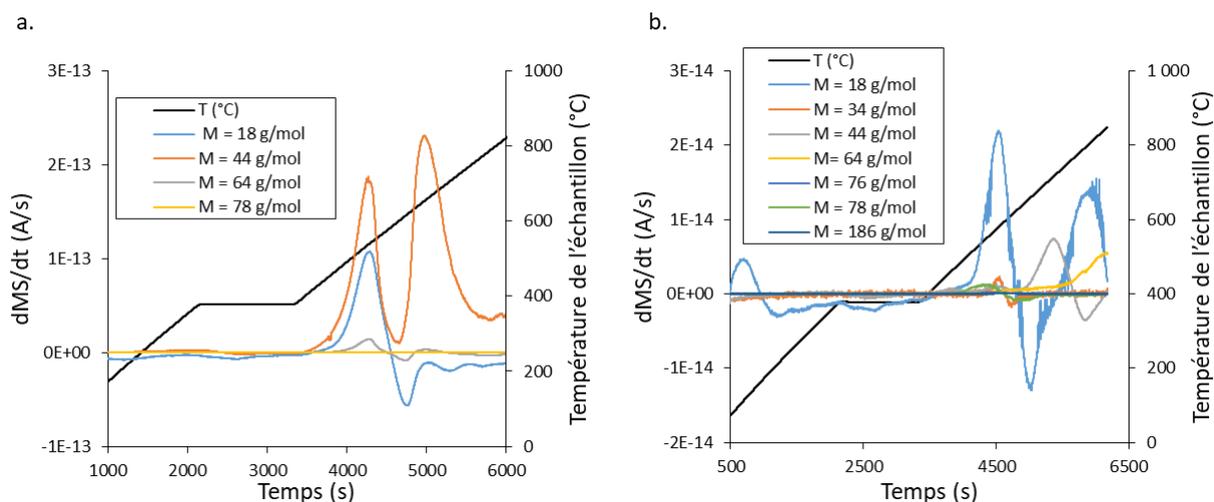


Figure 54 : Dérivée du signal du spectromètre de masse par rapport au temps et de la température lors des essais 2 et 4.

L'analyse des gaz émis lors de l'ATG par spectrométrie de masse a permis d'identifier la masse molaire des composés gazeux émis. D'après la liste des composés chimiques potentiellement émis établie grâce aux résultats de la littérature (Tableau 10), une identification de ces composés est proposée dans le Tableau 16. On remarque que selon que les essais aient été réalisés sous air ou sous atmosphère neutre ( $N_2$ ), les composés gazeux détectés diffèrent. Ce résultat est cohérent avec les résultats DSC et l'hypothèse de mécanismes d'émissions différents selon les conditions d'atmosphère de l'essai.

Tableau 16 : Masses molaires détectées lors des essais.

Atmosphère air	Espèce chimique potentielle	Atmosphère $N_2$	Espèce chimique potentielle
M = 18 g/mol	$H_2O$	M = 18 g/mol	$H_2O$
M = 44 g/mol	$CO_2$	M = 34 g/mol	$H_2S$
M = 64 g/mol	$SO_2$	M = 44 g/mol	$CO_2$
M = 78 g/mol	$C_6H_6$	M = 64 g/mol	$SO_2$
		M = 76 g/mol	$CS_2$
		M = 78 g/mol	$C_6H_6$
		M = 186 g/mol	$C_{12}H_{10}S$

Les résultats de ces essais ont donc permis de proposer une identification des composés émis lors du chauffage du matériau C/PPS utilisé dans la thèse. Les résultats obtenus en ATG/DSC ainsi qu'en MS semblent indiquer que ces composés sont émis de façon significative à des températures supérieures de celles employées dans le procédé de thermoformage-estampage. Par conséquent, ces conclusions vont dans le sens d'une validation du modèle d'émissions basé sur les mesures in-situ précédemment développé puisqu'elles concordent avec l'hypothèse 1 (faible quantité de produits émis) posée pour développer ce modèle.

Cependant, les résultats des essais ATG/DSC-MS présentés dans cette partie ne permettent pas totalement de conclure de façon positive quant à la validité de cette hypothèse et donc de complètement valider le modèle de surestimation des émissions. En effet, un petit nombre d'espèces chimiques a été détecté durant les essais par rapport à la liste des émissions potentielles identifiées dans la littérature (Tableau 10). Cela peut s'expliquer par le fait que ces composés ne sont pas produits lors du chauffage du matériau C/PPS utilisé dans la thèse mais il est aussi possible que ces composés

n'aient pas été détectés par le montage expérimental utilisé. En effet, le capillaire reliant l'ATG au MS est maintenu à la température de 180°C, inférieure à la température de condensation de certains des produits potentiels listés dans le Tableau 10. Il existe donc un risque que certains produits condensent avant le détecteur et ne soient donc pas détectés. De plus, on remarque la présence de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) dans les gaz analysés. Or ce composé a une énergie d'ionisation de 12,4 eV, supérieure donc à la puissance de la sonde à photo ionisation du Q-TRAK (10,6 eV) utilisée pour les relevés in-situ. L'utilisation de cet appareil n'est donc pas totalement adaptée pour mesurer la concentration de tous les composés potentiellement émis. Par conséquent, des travaux sont encore nécessaires afin de mieux caractériser et quantifier les produits émis lors du thermoformage-estampage de C/PPS. Une perspective de poursuite de ce travail est l'utilisation de techniques de chromatographie en phase gazeuse couplées à un spectromètre de masse afin d'analyser les gaz effluents d'une capsule chauffant du matériau C/PPS.

#### 4.4. Bilan des modélisations des flux d'inventaire

Une synthèse des modèles de flux d'inventaire pour le thermoformage-estampage d'une pièce en C/PPS est représentée dans le Tableau 18 en utilisant les notations définies dans le Tableau 17.

Tableau 17 : Notations utilisées pour la synthèse des modèles d'inventaire.

---

DJE	: Machine de découpe jet d'eau ( <i>abrasive waterjet</i> )
IR	: Four infrarouge
$C_i$	: Facteur de consommation ou d'émission du flux élémentaire $i$
$D_i$	: Débit du flux élémentaire $i$
$E_i$	: Consommation d'énergie électrique de $i$
$H_{\text{paramètre}}$	: Paramètre de puissance de chauffage du four infrarouge
$L_{\text{découpe}}$	: Longueur découpée par jet d'eau
$m_i$	: masse du flux $i$
$M_{\text{C/PPS}}$	: Masse volumique du matériau C/PPS
$N_{\text{pièce}}$	: Nombre de pièces produite dans une série de production
$P_i$	: Puissance électrique consommée par $i$
$R_i$	: Taux de chute de $i$
$S_{\text{moule}}$	: Surface du moule
$T_{0 \text{ pièce}}$	: Température initiale de la pièce avant chauffage infrarouge
$T_{\text{IR consigne}}$	: Température de consigne lors du chauffage IR
$T_{\text{émission}}$	: Température limite à partir de laquelle débute les émissions dans l'air du matériau PPS/CF
$T_{\text{presse consigne}}$	: Température du moule de la presse
$t_i$	: Durée de l'état $i$
$v_i$	: Vitesse de $i$
$V_i$	: Volume de $i$

---

Tableau 18 : Synthèse des modèles d'inventaire du procédé de thermoformage-estampage.

Processus unitaire	Paramètres	Modèles	Coefficients des modèles
Découpe de la préforme		$m_{C/PPS} = M_{C/PPS} \times V_{pièce} \times (1+R_{total})$	$M_{C/PPS} = 1\,550 \text{ kg/m}^3$
	$V_{pièce}$	$E_{DJE\ découpe} = (P_{DJE\ découpe} / V_{DJE\ découpe}) \times L_{DJE\ découpe} + P_{DJE\ ralenti} \times t_{DJE\ fonctionnement}$	$R_{total} = 34 \%$
	$L_{découpe}$	$V_{DJE\ eau} = (D_{DJE\ eau} / V_{DJE\ découpe}) \times L_{découpe}$	$P_{DJE\ ralenti} = 212,7 \text{ W} \pm 8,5 \text{ W}$
	$t_{DJE\ fonctionnement}$	$m_{DJE\ abrasif} = (D_{DJE\ abrasif} / V_{DJE\ découpe}) \times L_{découpe}$	$P_{DJE\ découpe} = 3\,612 \text{ W} \pm 40 \text{ W}$
	$R_{DJE\ chutes}$	$m_{DJE\ chutes} = M_{C/PPS} \times V_{pièce} \times R_{total} \times R_{DJE}$ $V_{DJE\ eaux\ usées} = V_{DJE\ eau}$ $m_{DJE\ déchets\ abrasifs} = m_{DJE\ abrasifs}$	$V_{DJE\ découpe} = 4 \text{ mm/s}$ $D_{DJE\ eau} = 1,38 \cdot 10^{-2} \text{ L/s}$ $D_{DJE\ abrasif} = 1,9 \text{ g/s}$
Chauffage de la préforme	$H_{paramètre}$	$E_{four\ IR} = P_{IR\ chauffage} \times t_{IR\ chauffage} + E_{IR\ maintien} + P_{IR\ ralenti} \times t_{IR\ fonctionnement}$	$V_{IR\ chauffage} = 0,096 \times H_{paramètre} - 2,95$
	$T_{IR\ consigne}$	avec $t_{IR\ chauffage} = (T_{IR\ consigne} - T_{0\ pièce}) / V_{IR\ chauffage}$	$P_{IR\ ralenti} = 296 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$
	$T_{0\ pièce}$	$m_{IR\ gaz} = C_{gaz} \times m_{préforme} \times t_{émission}$	$P_{IR\ chauffage} = 547 \times H_{paramètre} - 6\,601$
	$t_{IR\ fonctionnement}$	$m_{IR\ particules\ fines} = C_{particules\ fines} \times m_{préforme} \times t_{émission}$	$E_{IR\ maintien} = 4\,020 \times T_{IR\ consigne} - 845\,736 \text{ J}$
	$m_{préforme}$ $T_{émission}$	avec $t_{émission} = (T_{IR\ consigne} - T_{émission}) / V_{IR\ chauffage} + 30$	$C_{gaz} = 27 \text{ mg/kg/s}$ $C_{particules\ fines} = 1,55 \cdot 10^{-1} \text{ mg/kg/s}$
Transfert		$E_{robot} = E_{robot\ déplacement} + P_{robot\ ralenti} \times t_{robot\ ralenti}$	$E_{robot\ déplacement} = 1,16 \times t_{robot\ déplacement}^2 + 193 \times t_{robot\ déplacement} + 1\,804 \text{ J}$
	$t_{robot\ ralenti}$	Pour le transfert vers la presse :	$P_{robot\ ralenti} = 260 \text{ W}$
	$t_{robot\ déplacement}$	$m_{robot\ gaz} = C_{gaz} \times m_{préforme} \times t_{robot\ déplacement}$ $m_{robot\ particules\ fines} = C_{particules\ fines} \times m_{préforme} \times t_{robot\ déplacement}$	$C_{gaz} = 27 \text{ mg/kg/s}$ $C_{particules\ fines} = 1,55 \cdot 10^{-1} \text{ mg/kg/s}$
Emboutissage	$T_{presse\ consigne}$	$E_{presse} = E_{presse\ thermique} + E_{presse\ mécanique} + P_{presse\ ralenti} \times t_{presse\ fonctionnement}$	$E_{presse\ chauffage} = 275\,106 \times T_{presse\ consigne} - 2\,267\,630 \text{ J}$
	$t_{presse\ fonctionnement}$	$E_{presse\ thermique} = E_{presse\ chauffage} / N_{pièce} + P_{presse\ maintien} \times t_{presse\ fonctionnement}$	$P_{presse\ maintien} = 101 \times T_{presse\ consigne} - 3\,574 \text{ W}$
	$t_{presse\ emboutissage}$	$E_{presse\ mécanique} = P_{presse\ emboutissage} \times t_{presse\ emboutissage}$	$P_{presse\ ralenti} = 427 \text{ W} \pm 23 \text{ W}$
	$N_{pièce}$	$m_{presse\ démoulant} = S_{moule} \times C_{démoulant}$	$P_{presse\ emboutissage} = 8\,374 \text{ W} \pm 131 \text{ W}$ (effort de fermeture de 200 kN)
	$S_{moule}$		$C_{démoulant} = 11,7 \text{ g/m}^2$
Finition		$m_{chutes\ finition} = M_{C/PPS} \times V_{pièce} \times R_{total} \times R_{finition}$	
		avec $R_{chutes\ finition} = 1 - R_{DJE\ chutes}$	$C_{énergie\ usinage} = 11,5 \text{ MJ/kg}$
		$E_{finition} = m_{chutes\ finitions} \times C_{énergie\ usinage}$	

#### 4.5. Mise en perspective des résultats de laboratoire par rapport à la consommation électrique d'une ligne de thermoformage-estampage à échelle industrielle

L'analyse d'inventaire présentée dans la section précédente a été réalisée sur des équipements de laboratoire. Par conséquent, les résultats obtenus ne sont pas à l'échelle d'un procédé de thermoformage-estampage industriel, utilisant des machines de plus grandes dimensions. Ils ne peuvent donc pas être directement exploités pour des analyses environnementales de procédés industriels. Afin de mieux comprendre les implications d'un changement d'échelle du procédé sur les valeurs des données d'inventaire, les données collectées sur le procédé de laboratoire sont comparées avec des données collectées sur une ligne de production représentative d'applications industrielles.

Afin de réaliser cette comparaison, des relevés de consommation électrique ont été réalisés sur une ligne d'estampage de l'IRT Jules Verne lors d'essais de fabrication de pièces automobile en PET renforcées par des fibres de verre. Une comparaison des données électriques collectées avec les consommations d'énergie électrique modélisées sur le procédé de laboratoire est alors proposée, en considérant les limites de cette comparaison dues aux différences entre les procédés, les matériaux et donc de paramètres procédés (températures de mise en forme par exemple).

##### 4.5.1. Unité fonctionnelle et périmètre de l'étude

Dans ces travaux, le périmètre de l'étude est restreint aux principales étapes du procédé de thermoformage-estampage : chauffage infrarouge du matériau, transfert et emboutissage (Figure 55). On se concentrera également sur un seul flux d'inventaire : la consommation d'énergie électrique des machines utilisées à chaque étape.

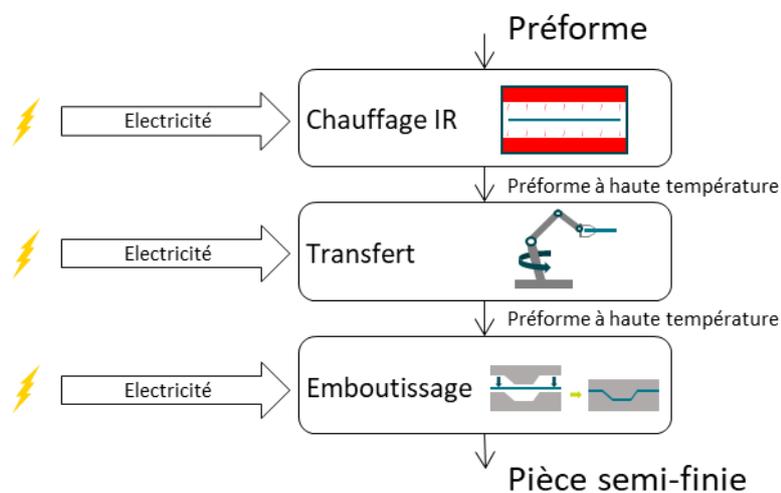


Figure 55 : Périmètre de l'étude du procédé de thermoformage-estampage de l'IRT Jules Verne.

La cellule d'estampage industrielle étudiée dans cette partie est présentée sur la Figure 56. Elle est constituée de cinq éléments :

- Un four infrarouge court SOPARA de 130 kW – 20 zones de chauffes ;
- Un bras robotisé KUKA KR 90 R3100 extra HA avec préhenseur à aiguilles ;
- Une presse MIB-HYDRO 200T ;
- Deux thermorégulateurs à huile Tool Temp TT-388 Z et TT-390 Z pour le moule.

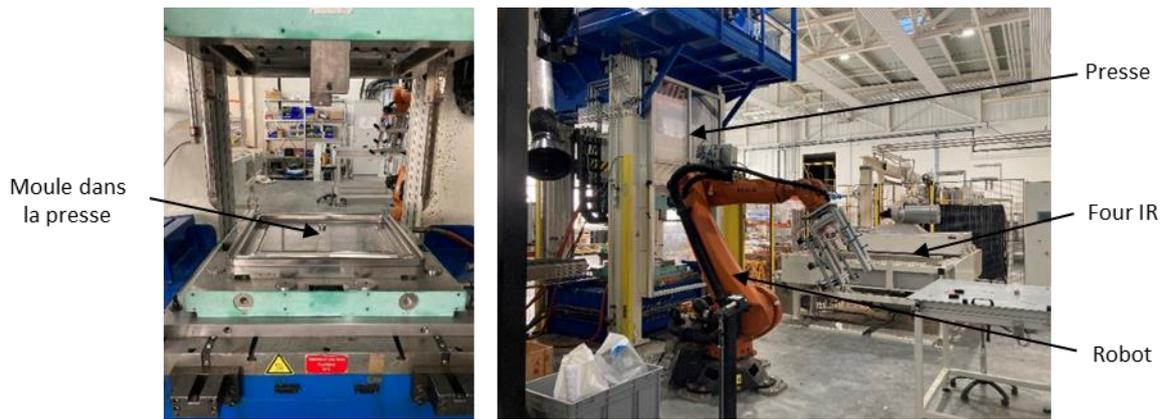


Figure 56 : Cellule d'estampage de l'IRT Jules Verne.

Lors des relevés, la cellule d'estampage a été mobilisée pour des essais de fabrication d'une pièce automobile : une portion de caisse de batterie en matériau PET renforcée par des fibres de verre d'une masse totale d'environ 7 kg. Par conséquent, les paramètres procédé et notamment les températures de mise en forme sont différentes de celles utilisées pour la mise en forme de C/PPS. Lors de ces essais, le matériau est chauffé à 270 °C dans le four infrarouge. Il est ensuite mis en forme dans un moule à 140 °C avec une force de fermeture de 200 T.

Pour ce procédé, l'enchaînement des étapes du procédé est aussi légèrement différent du procédé du laboratoire car elle inclut une étape d'empilement de préformes (Figure 57). Cette étape permet de chauffer de manière plus efficace le matériau dans le but d'estamper une pièce d'épaisseur conséquente (environ 9 mm) à partir de trois préformes d'épaisseur environ 3 mm.

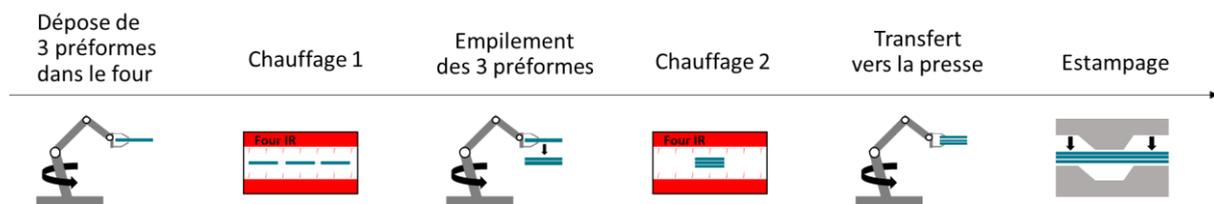


Figure 57 : Enchaînement des différentes étapes du procédé de thermoformage-estampage mises en œuvre sur la plateforme de l'IRT Jules Verne.

L'unité fonctionnelle considérée dans cette analyse comparative sera différente de celle qui a été établie dans le chapitre 3. Elle est définie ici comme la transformation de 1 kg de matière par thermoformage-estampage.

#### 4.5.2. Montage expérimental

Durant les essais, des relevés électriques ont été réalisés sur chacune des machines constituant la cellule d'estampage en se branchant directement au niveau des alimentations des machines en utilisant les énergimètres Fluke 1736 et 1738 et les pinces ampèremétriques iFlex 1500-12 et iFlex 3000-24. Les relevés ont été réalisés en simultanément sur le four infrarouge, la presse et les deux systèmes de régulation thermique lors de cycles de fabrication. Des relevés de consommation électrique ont été réalisés dans un second temps sur le bras robotisé. Lors des relevés, des sondes de tension ont également été utilisées, sauf pour les thermorégulateurs. Pour ces équipements, une tension de 230 V entre les phases et le neutre annoncée par le fournisseur d'énergie a été considérée. Les conditions expérimentales utilisées sont précisées dans le Tableau 19.

Tableau 19 : Montages électriques utilisés lors des relevés sur la cellule d'estampage de l'IRT.

Machine	Energimètre	Branchement
Four infrarouge court SOPARA	Fluke 1738	3 phases avec iFlex 1500-12 3 sondes de tension
Robot KUKA KR 90 R3100 extra HA	Fluke 1736	3 phases avec iFlex 1500-12 3 sondes de tension
Presse MIB-HYDRO 200T	Fluke 1738	3 phases avec iFlex 1500-12 + Neutre iFlex 3000-24 3 sondes de tension
Thermorégulateur TT-388 Z (49,9 kW)	Fluke 1736	3 phases avec iFlex 1500-12
Thermorégulateur TT-390 Z (25,9 kW)	Fluke 1738	3 phases avec iFlex 1500-12

Les relevés de consommation électrique ont été réalisés lors d'une phase de mise au point et de test du système de préhension du robot. En raison de la chute des préformes fondues pendant le transfert par le bras robotisé lors de plusieurs essais, seulement trois cycles complets de fabrication ont pu être enregistrés en simultanément. Afin de compléter les données relevées, des cycles de chauffage et d'estampage ont été réalisés individuellement.

#### 4.5.3. Résultats des mesures électriques

##### 4.5.3.1. Chauffage IR

Un exemple de relevé électrique obtenu sur le four infrarouge est présenté sur la Figure 58. Sur les relevés obtenus, on peut distinguer les phases de ralenti ainsi que les deux étapes de chauffage. Sur ces dernières, nous observons également la phase de maintien en température.

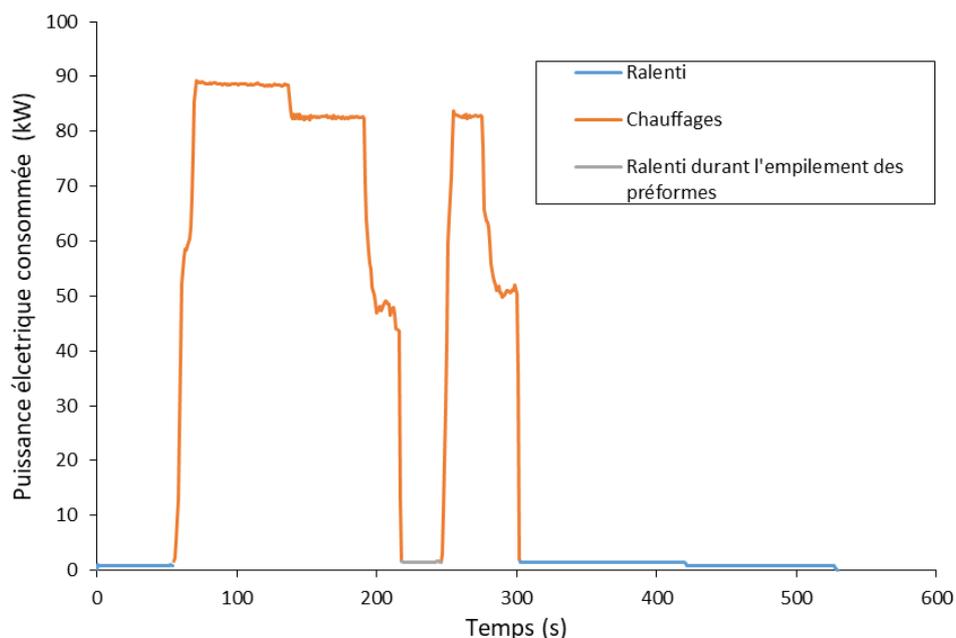


Figure 58 : Exemple de relevé de puissance électrique consommée par le four infrarouge lors de la mise en œuvre du procédé à l'IRT Jules Verne.

Les résultats des relevés électriques permettent de quantifier l'énergie consommée lors de la phase de chauffage. Une énergie de 17,2 MJ ( $\pm 27$  kJ) est consommée pour réaliser la totalité de la phase de chauffage du matériau, c'est-à-dire le premier chauffage des préformes, le ralenti lors de l'empilement des préformes puis enfin le chauffage des préformes empilées (Figure 57). Par ailleurs, le four consomme au ralenti une puissance de 102 W ( $\pm 10$  W).

#### 4.5.3.2. Transfert

Un exemple des relevés électriques obtenus sur le bras robotisé est présenté sur la Figure 59, avec une identification des différents transferts réalisés.

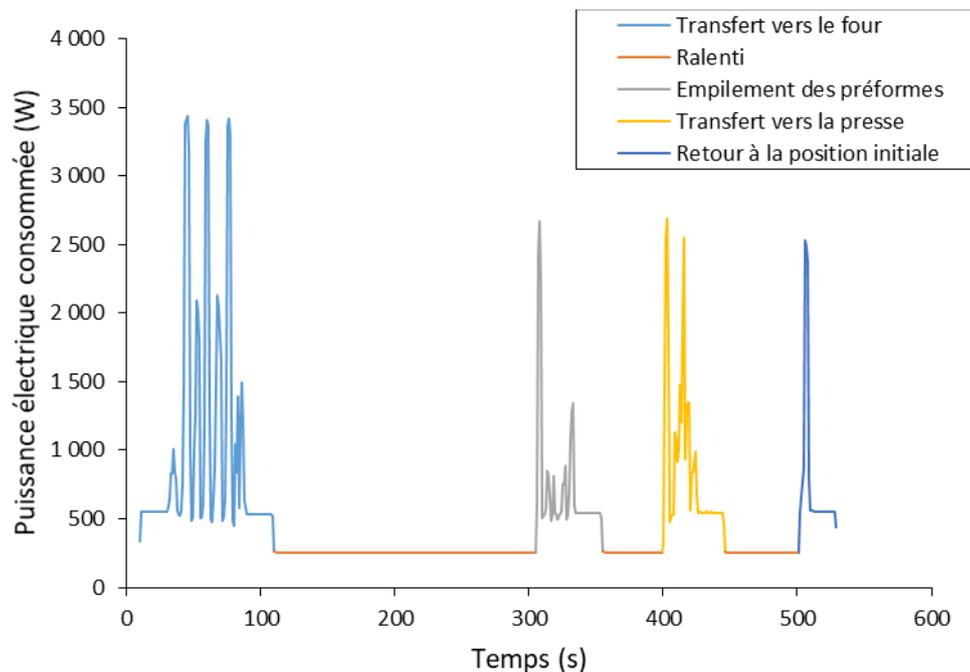


Figure 59 : Exemple de relevé de puissance électrique consommée par le bras robot lors de la mise en œuvre du procédé à l'IRT Jules Verne.

L'exploitation des relevés a permis de calculer l'énergie consommée par les différentes phases de mouvement du bras robot (Tableau 20) ainsi qu'une puissance électrique consommée au ralenti de 236 W ( $\pm 10$  W).

Tableau 20 : Résultats des mesures électriques sur le bras robotisé de l'IRT Jules Verne.

Énergie de dépose dans le four des 3 préformes	94,8 kJ $\pm$ 3,7 kJ
Énergie d'empilement des 3 préformes	35,0 kJ $\pm$ 0,9 kJ
Énergie de dépose dans la presse des préformes empilées	41,3 kJ $\pm$ 0,5 kJ
Énergie de retour position	27,5 kJ $\pm$ 4,2 kJ

#### 4.5.3.3. Chauffage du moule

Un exemple des relevés électriques réalisés sur les systèmes de régulation thermique est présenté sur la Figure 60 pour le thermorégulateur TT-388 Z de puissance nominale égale à 49,9 kW. Comme pour le système thermique de la presse du laboratoire, on identifie sur ces relevés deux phases de fonctionnement : une phase de chauffage du moule jusqu'à la température de consigne puis une phase de maintien en température du moule. Sur les relevés réalisés, ces phases sont identifiables malgré les

oscillations de la puissance électrique consommée, probablement causées par l’asservissement des régulateurs thermiques.

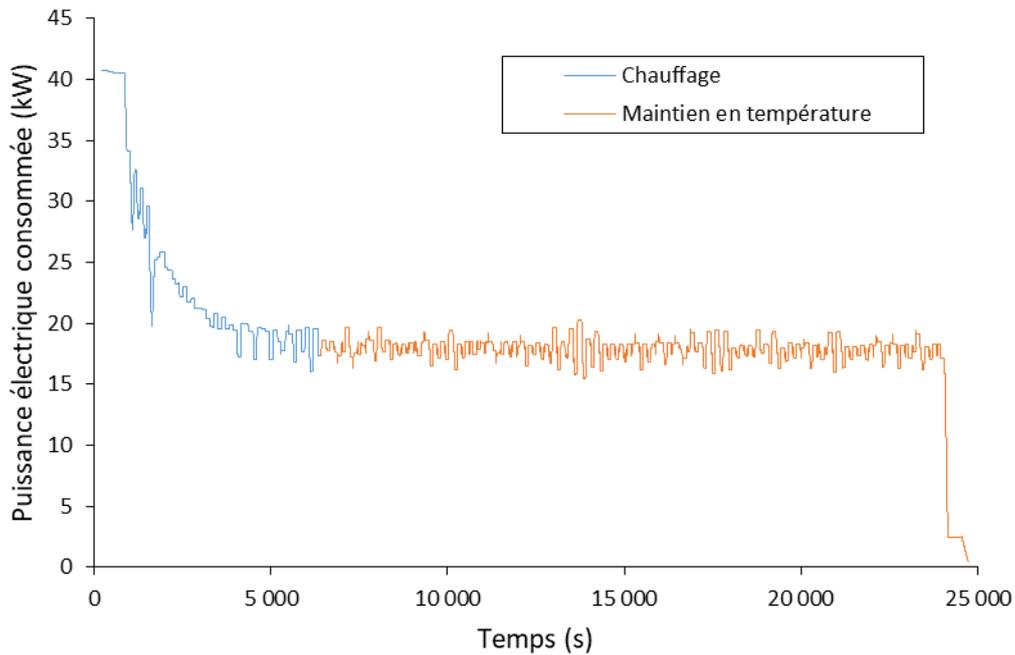


Figure 60 : Exemple de relevé de puissance électrique consommée par le thermorégulateur TT-388 Z lors de la mise en œuvre du procédé de l'IRT Jules Verne.

L’analyse des résultats obtenus a permis d’établir les consommations électriques relatives aux deux systèmes de régulation thermique (Tableau 21).

Tableau 21 : Résultats des relevés de consommation électrique des régulateurs thermiques de l'IRT Jules Verne.

	Energie pour la montée en température	Puissance pour le maintien en température
Thermorégulateur TT-388 Z(49,9 kW)	150,0 MJ ( $\pm$ 0,6 MJ)	17,3 kW ( $\pm$ 125 W)
Thermorégulateur TT-390 Z (25,9 kW)	115,6 MJ ( $\pm$ 0,6 MJ)	14,8 kW ( $\pm$ 77 W)

#### 4.5.3.4. Estampage

Un exemple de relevé de la consommation électrique de la presse est présenté sur la Figure 61. Les résultats obtenus montrent un appel de puissance au début de l’estampage, avec une consommation de puissance devenant ensuite constante lors de la phase de maintien sous pression de la pièce. Les relevés électriques réalisés ont permis de définir une énergie de fermeture lors des 20 premières secondes de l’estampage de 509 kJ ( $\pm$  0,2 kJ) et une puissance électrique de maintien sous pression de 13,3 kW ( $\pm$  63 W). Les relevés ont également permis d’établir une puissance électrique consommée au ralenti de 140 W ( $\pm$  10 W).

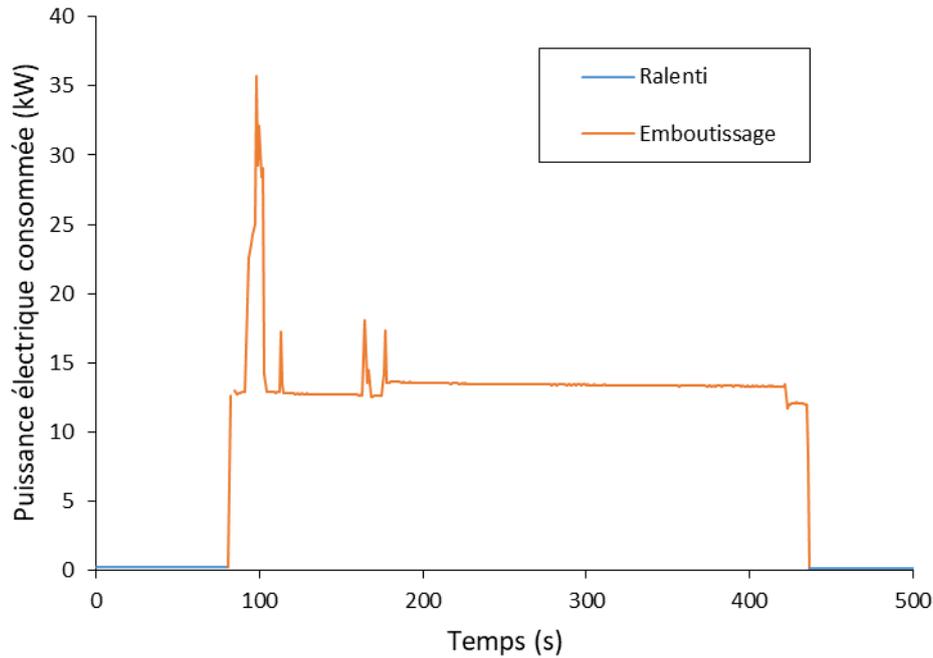


Figure 61 : Exemple de relevé de puissance électrique consommée par la presse lors de la mise en œuvre du procédé à l'IRT Jules Verne.

#### 4.5.4. Comparaison des résultats avec le procédé à l'échelle du laboratoire

Les résultats de consommation d'énergie relevés sur la plateforme de l'IRT Jules Verne ont été comparés aux modèles développés sur le procédé du laboratoire dans le périmètre défini sur la Figure 55 et pour l'unité fonctionnelle définie comme **la transformation de 1 kg de matière par thermoformage-estampage**. Pour le procédé de l'IRT Jules Verne, les données issues des relevés électriques sont directement exploitées en considérant la production de 10 pièces au cours d'une série. La consommation d'énergie relative à la montée en température des moules est donc distribuée sur ce nombre de pièces. Pour le procédé du laboratoire, les consommations d'énergie électrique sont évaluées à partir des modèles d'inventaire développés précédemment pour le four, la presse, le bras robotisé et la fabrication de pièces en C/PPS de dimensions 300 mm x 300 mm x 4,3 mm. Les paramètres de réglage du procédé utilisés sont présentés dans le Tableau 22, en étudiant ici aussi une série de production de 10 pièces.

Tableau 22 : Paramètres procédé et données d'inventaire calculées pour le procédé de laboratoire.

<b>Chauffage de la préforme</b>	$H_{\text{paramètre}} =$	90	%	$E_{\text{four IR}} =$	3 070	kJ
	$T_{0 \text{ pièce}} =$	20	°C			
	$T_{\text{IR consigne}} =$	370	°C			
	$t_{\text{IR fonctionnement}} =$	99,5	s			
<b>Transfert</b>	$t_{\text{robot déplacement}} =$	8	s	$E_{\text{robot}} =$	82	kJ
	$t_{\text{robot fonctionnement}} =$	99,5	s			
<b>Emboutissage</b>	$N_{\text{pièce}} =$	10	pièce	$E_{\text{presse}} =$	5374	kJ
	$T_{\text{presse consigne}} =$	100	°C			
	$t_{\text{presse fonctionnement}} =$	99,5	s			
	$t_{\text{presse emboutissage}} =$	91,5	s			

Les résultats donnent une consommation d'énergie de 8,7 MJ/kg pour le procédé de l'IRT Jules Verne et de 14,1 MJ/kg pour le procédé du laboratoire.

Malgré la différence de taille des machines, de matériau et de géométrie des pièces produites entre les deux procédés comparés, l'ordre de grandeur de la consommation énergétique pour transformer 1 kg de matière est similaire. De plus, la répartition des consommations électriques est similaire entre le procédé de laboratoire et celui de l'IRT Jules Verne (Figure 62). C'est en effet le chauffage du moule qui nécessite le plus d'énergie, suivi ensuite par l'étape de chauffage puis d'estampage. L'étape de transfert par le bras robotisé ne représente toujours qu'une faible fraction de l'énergie consommée. Par conséquent, **la comparaison des résultats à l'échelle du laboratoire avec un procédé à une échelle industrielle démontre la cohérence entre un procédé industriel et le procédé de laboratoire sur lequel les modèles d'inventaire ont été développés dans ce chapitre.**

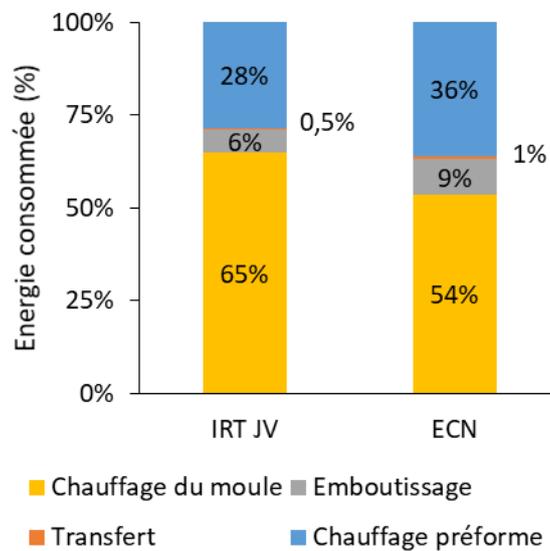


Figure 62 : Comparaison des consommations d'énergie électrique des procédés du laboratoire et de l'IRT Jules Verne pour la transformation d'1kg de matériau.

#### 4.6. Conclusion

Dans ce chapitre, des précisions nécessaires à la réalisation de l'analyse d'inventaire d'un procédé composite ont été proposées et présentées sur le cas du thermoformage-estampage de C/PPS. Une méthodologie de choix de la stratégie de collecte des données d'inventaire a d'abord été développée, basée sur le jugement de la personne qui réalise l'analyse environnementale concernant l'influence de chaque donnée d'inventaire sur les résultats de ses travaux ainsi que sur la disponibilité des données. Cette méthodologie a ainsi permis d'établir par quel moyen collecter des données d'inventaire pour chaque flux d'inventaire du procédé de thermoformage-estampage. Dans ce chapitre, des méthodes expérimentales de collecte de données d'inventaire ont également été développées. Le traitement de ces données a été expliqué pour la construction de modèles d'inventaire exprimant les flux d'inventaire comme des fonctions dépendantes des paramètres du procédé de thermoformage-estampage. Une approche expérimentale de la caractérisation et de la quantification des émissions dans l'air lors du procédé de thermoformage-estampage ont par exemple été déployées, menant à un premier modèle d'émission du procédé. Concernant les consommations d'énergie électrique, une approche a aussi été proposée et appliquée au cas du thermoformage-estampage. Ces travaux ont alors permis d'établir des modèles de consommation électrique de la machine de découpe jet d'eau, du four et de la presse de laboratoire. Complétant les modélisations obtenues par des approches expérimentales avec des données issues de la littérature, une modélisation complète des flux d'inventaire listés dans l'arbre des processus construit pour le procédé de thermoformage-estampage de C/PPS a été présentée.

Dans les travaux présentés dans ce chapitre, les propositions méthodologiques ont été principalement appliquées au cas d'étude du laboratoire. Par conséquent, les modélisations développées ne sont pas à l'échelle de ce qui est utilisé dans l'industrie. Néanmoins, la comparaison des résultats obtenus avec ceux de travaux réalisés sur une cellule d'estampage de l'IRT Jules Verne a permis de souligner la cohérence de ce procédé de laboratoire et des résultats obtenus avec la réalité industrielle. Ces travaux sur la cellule de l'IRT Jules Verne ont également démontré qu'il était possible de transposer à d'autres lignes de production les méthodes proposées dans ce chapitre et initialement développées sur le procédé du laboratoire, témoignant du caractère générique de la méthodologie proposée.

Les modèles d'inventaire développés avec la méthode proposée dans ce chapitre permettent de calculer les données d'inventaire relatives à différents scénarios de production utilisant différents jeux de paramètres du procédé. Ces données d'inventaire peuvent ensuite être traduites en impacts environnementaux et en coûts de production, qui sont des indicateurs sur lesquels des décisions sur le procédé peuvent s'appuyer. Ce travail d'exploitation des données d'inventaire est développé dans le chapitre suivant.

## Chapitre 5

# Exploitation des modèles de flux d'inventaire pour les analyses environnementale et économique du procédé

---

5.1. Introduction .....	106
5.2. Méthode d'exploitation des données d'inventaire pour l'analyse environnementale et économique .....	106
5.2.1. Établissement du modèle environnemental (étape I).....	107
5.2.2. Etablissement du modèle économique du procédé (étape II) .....	109
5.2.3. Recherche des postes majeurs d'impact environnemental et de coût (étapes I.2 et II.2) .....	110
5.2.4. Analyse de l'influence des paramètres procédés (étapes I. 3 et II.3).....	112
5.2.5. Analyse des incertitudes (étapes I.1 et II.1).....	113
5.3. Application au cas du thermoformage-estampage de C/PPS.....	116
5.3.1. Description du cas étudié et du scénario de production de référence .....	116
5.3.2. Analyse environnementale.....	119
5.3.3. Prise en compte des incertitudes sur les résultats environnementaux (étape I.1)...	124
5.3.4. Analyse économique.....	127
5.3.5. Bilan des résultats des analyses environnementales et économiques .....	130
5.4. Conclusion.....	132

---

## 5.1. Introduction

Dans ce chapitre, une méthodologie est proposée pour exploiter les modèles d'inventaire développés avec l'approche proposée dans le chapitre 4. Tout d'abord, des précisions sur la traduction des données d'inventaire en indicateurs d'impacts environnementaux et de coûts de production sont apportées afin de permettre l'expression de ces indicateurs en fonction des paramètres du procédé. Des stratégies d'exploitation de ces indicateurs sont ensuite proposées, en lien avec les objectifs de diminution de l'impact environnemental et de maîtrise du coût du procédé poursuivis dans ces travaux de thèse. La première de ces stratégies consiste à rechercher les étapes unitaires et les flux d'inventaire qui sont responsables des impacts environnementaux principaux ou les coûts les plus importants afin de hiérarchiser les actions à mener. **Les postes responsables d'impacts environnementaux majeurs seront par exemple identifiés comme les priorités à traiter en raison du fort potentiel de diminution de leur impact.** Avec une autre stratégie d'exploitation, l'influence des paramètres du procédé sur les impacts environnementaux et le coût du procédé est évaluée dans le but de déterminer les paramètres les plus influents. Ces paramètres sont alors considérés comme ceux sur lesquels travailler en priorité pour répondre aux objectifs de nos travaux. Ce chapitre est divisé en deux parties : la proposition méthodologique est présentée dans un premier temps puis son application sur le cas du thermoformage-estampage de C/PPS est détaillée.

## 5.2. Méthode d'exploitation des données d'inventaire pour l'analyse environnementale et économique

La méthodologie d'exploitation des résultats d'inventaire proposée dans nos travaux se divise en plusieurs étapes qui sont présentées sur la Figure 63.

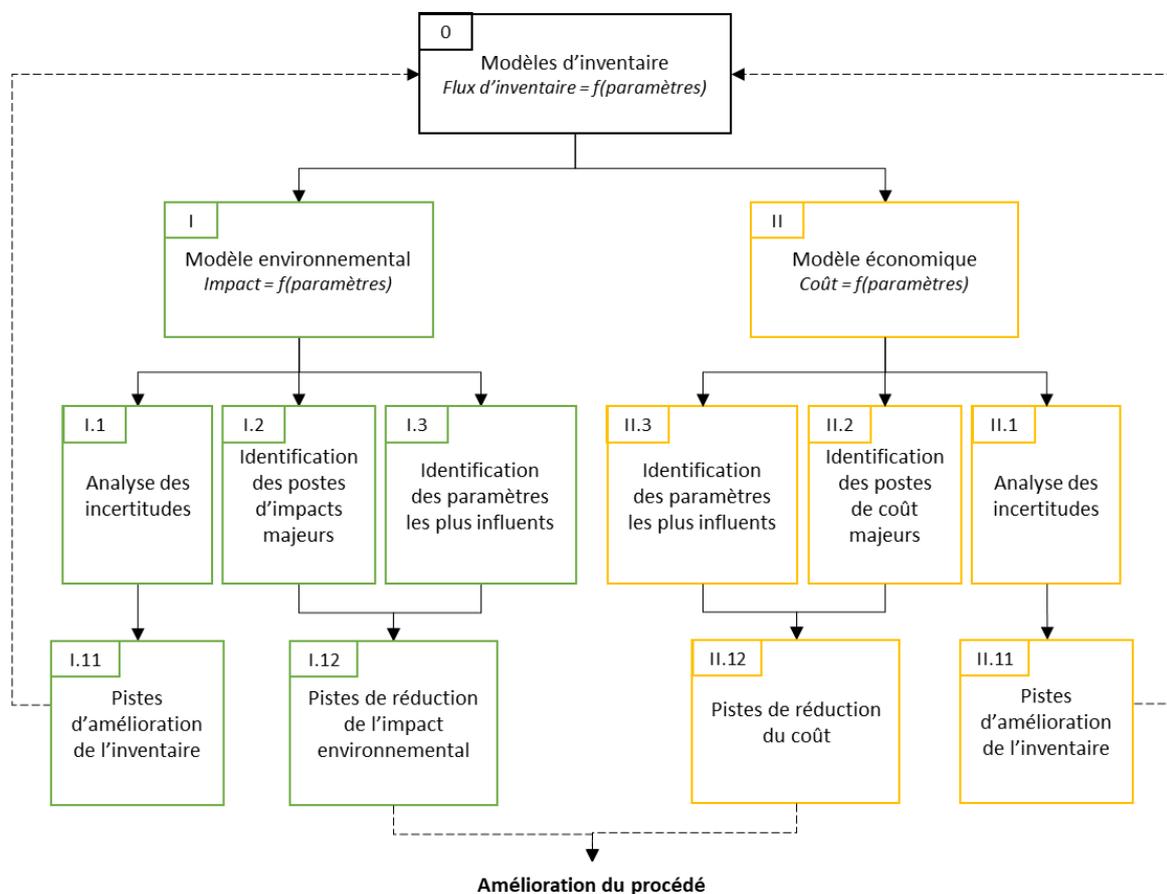


Figure 63 : Méthodologie globale d'exploitation des résultats d'inventaire.

Dans un premier temps, les données d'inventaire sont converties en indicateurs d'impacts environnementaux et de coût. Dans un second temps, ces indicateurs environnementaux et économiques sont exploités dans le but d'identifier des pistes d'amélioration du procédé ainsi que des voies d'amélioration de l'inventaire.

### 5.2.1. Établissement du modèle environnemental (étape I)

#### 5.2.1.1. Méthode de calcul d'impact

Afin d'exprimer les impacts environnementaux, l'utilisation de plusieurs indicateurs est nécessaire pour traduire la multiplicité des impacts sur l'environnement causés par les consommations et rejets d'énergie et de matière. En effet, consommation et rejet d'énergie et de matières peuvent être à l'origine de plusieurs phénomènes différents comme par exemple le réchauffement climatique à une échelle globale ou plus localement avec des phénomènes tels que l'eutrophisation. En poursuivant les liens de causes à effets, ces différents phénomènes sont responsables de dommages sur trois aires de protection : la santé humaine, les ressources naturelles et les écosystèmes (Figure 64).

Plusieurs méthodes de calcul différentes ont été développées dans la littérature pour traduire les résultats d'inventaire dans les différentes catégories d'impacts environnementaux, comme par exemple CML 2002 [80], Eco-indicator 99 [81], EDIP 2003 [82], EPS [83], Impact 2002+ [84], LIME [85], LUCAS [86], ReCiPe [87] ou encore TRACI [88].

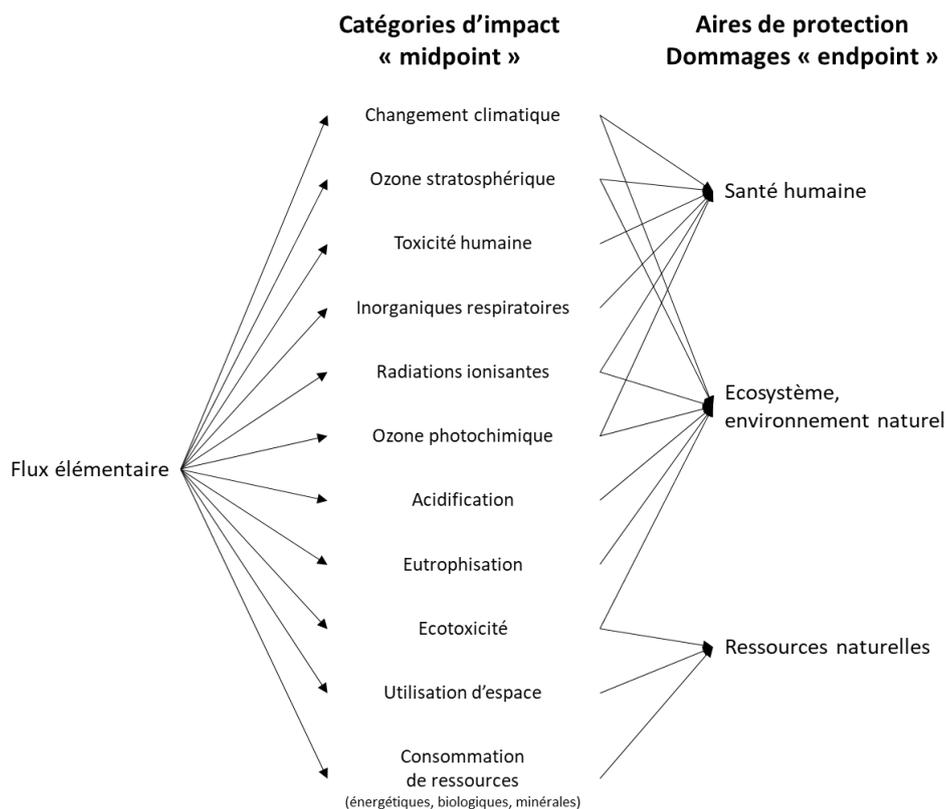


Figure 64 : Lien de causalité entre différentes catégories d'impact environnementaux et les trois grandes aires de protection [89].

Il existe donc un nombre important de méthodes de calcul d'impact différentes parmi lesquelles il peut être difficile de faire un choix. La diversité des méthodes de calcul d'impacts environnementaux utilisées pour étudier les procédés composites qui a été soulignée dans le chapitre 2 témoigne de cette difficulté. Pour répondre aux problématiques liées à la réalisation d'analyses environnementales, un

groupe de travail du centre commun de recherche de l'Union Européenne (Joint Research Centre - JRC) a abouti dès 2005 à des recommandations pour uniformiser les pratiques de l'ACV lors de l'initiative International Reference Life Cycle Data System (ILCD) [90]. Ayant identifié cette difficulté en particulier, des recommandations sur les catégories d'impact environnementaux ainsi que sur les méthodes de calcul à employer ont en particulier été proposées [89]. Poursuivant ces travaux, le JRC a ensuite continué de mettre à jour ses recommandations en développant la méthode de l'empreinte environnementale de produit (Product Environmental Footprint - PEF) [91]. **Dans ces travaux de thèse, les recommandations européennes et la méthode de calcul d'impact Environmental Footprint (EF v1.00) sera choisie.**

#### 5.2.1.2. Données de second plan

Toutes les méthodes de calcul d'impacts environnementaux fonctionnent sur le même principe : l'indicateur d'un impact est modélisé comme une fonction linéaire des flux élémentaires. Pour chaque catégorie d'impact, l'indicateur est calculé en multipliant la quantité de flux d'inventaire par un **facteur de caractérisation**. L'impact total est ensuite obtenu en faisant la somme des impacts relatifs à chaque flux d'inventaire :

$$I^j = \sum_i C_i^j \times m_i$$

Avec :

$I^j$  : L'indicateur pour la catégorie d'impact j ;

$C_i^j$  : Le coefficient de caractérisation de la contribution du flux élémentaire i à la catégorie d'impact j ;

$m_i$  : La quantité du flux élémentaire i.

Dans ces travaux de thèse, la méthode d'analyse d'inventaire proposée dans le chapitre 4 permet d'évaluer les consommations et rejets de matières et d'énergie du procédé étudié. Cependant, certains de ces flux d'inventaire sont échangés avec d'autres systèmes secondaires issus de la technosphère et non pas directement avec l'écosphère (Figure 65). C'est par exemple le cas pour l'énergie électrique consommée par les procédés de mise en forme. Les flux d'inventaire quantifiés dans le chapitre 4 ne sont donc pas tous des flux élémentaires et par conséquent les méthodologies de calcul d'impact ne leur attribuent pas directement des coefficients de caractérisation d'impacts environnementaux ( $C_i^j$ ). Pour calculer l'impact environnemental relatif à ces flux d'inventaire, il est alors nécessaire de se renseigner sur les processus secondaires en amont et en aval du système étudié. Par exemple, un modèle relatif à la production d'énergie électrique doit alimenter le calcul d'impact environnemental du procédé de fabrication étudié. La stratégie proposée dans cette thèse consiste alors à utiliser des modèles existants pour ces systèmes secondaires afin de calculer des facteurs d'impacts environnementaux ( $C_i^j$ ) relatifs aux flux d'inventaire du procédé étudié. Les modèles pour ces systèmes secondaires doivent alors être choisis avec précaution afin de représenter au mieux le système étudié car les résultats de l'analyse environnementale en dépendent. De cette façon, les impacts environnementaux du procédé seront exprimés en fonction des flux d'inventaire modélisées dans le chapitre 4 comme des fonctions des paramètres du procédé ( $m'_i$ ). De cette façon, les indicateurs d'impacts environnementaux du procédé ( $I^j$ ) sont exprimés comme des fonctions des paramètres du procédé :

$$I^j(\text{paramètres}) = \sum_i C_i^j \times m'_i(\text{paramètres})$$

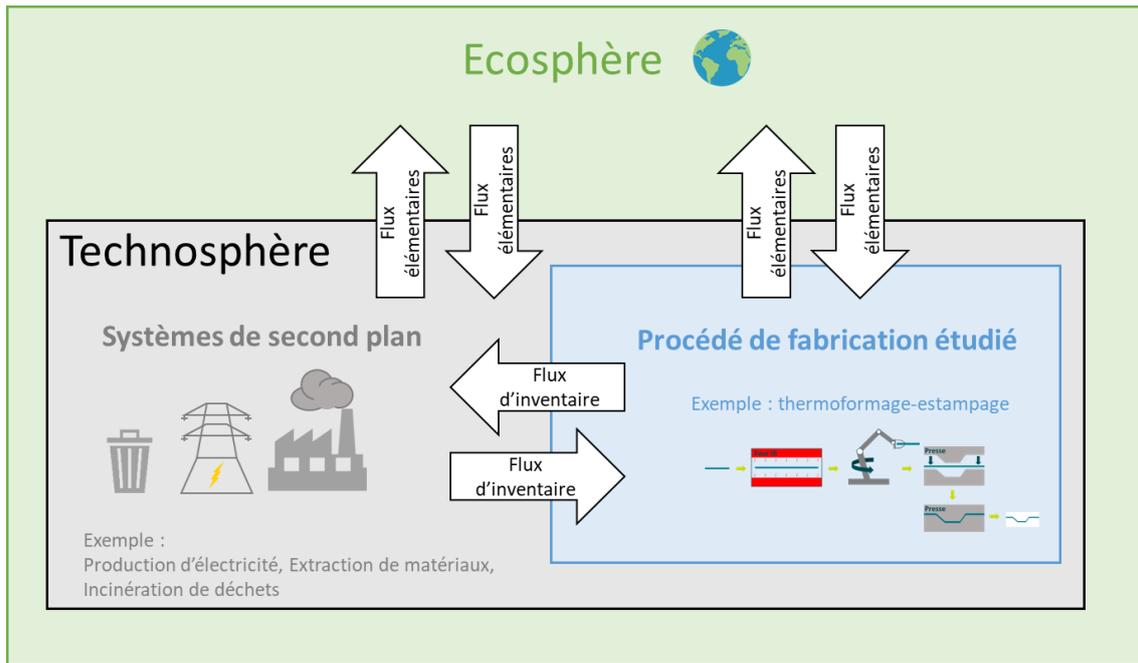


Figure 65 : Positionnement du système étudié par rapport à la technosphère et l'écosphère.

Dans ces travaux de thèse, les données secondaires utilisées pour le cas du thermoformage-estampage de C/PPS sont extraites de la base de données Ecoinvent v3.5 et de la littérature. Les calculs d'impacts environnementaux sont réalisés à l'aide du logiciel d'analyse environnementale SimaPro 9.0. Les modèles d'impacts environnementaux ont ensuite été codés sous Python.

## 5.2.2. Etablissement du modèle économique du procédé (étape II)

### 5.2.2.1. Définition du modèle économique

Pour modéliser le coût du procédé de fabrication, la méthodologie développée dans ces travaux propose de s'appuyer sur la description du périmètre de l'étude qui est détaillée dans le chapitre 3. Par conséquent, le coût de production du procédé intègre la somme des coûts des flux d'inventaire listés lors de cette étape. Les quantités de flux d'inventaire entrants et sortants du procédé étudié sont évaluées avec les modèles d'inventaire définis dans le chapitre 4 de ce manuscrit (notés  $m'_i$ ). Aux coûts des flux d'inventaire, s'ajoutent aussi les coûts relatifs à la main d'œuvre nécessaire pour faire fonctionner le procédé de fabrication. Ce coût est calculé comme le produit du taux horaire de la main d'œuvre ( $f_{horaire}$ ) et du temps de travail nécessaire à la mise en œuvre du procédé ( $t_{total}$ ) qui peut être également calculé grâce aux modèles d'inventaire du chapitre 4. Le coût du procédé, noté  $C$ , s'exprimera alors comme une fonction des paramètres du procédé :

$$C(\text{paramètres}) = \sum_i f_i \times m'_i(\text{paramètres}) + f_{\text{main oeuvre}} \times t_{\text{total}}(\text{paramètres})$$

Avec  $f_i$  le facteur de coût associé au flux d'inventaire  $i$ .

### 5.2.2.2. Facteurs de coûts pour le procédé de thermoformage-estampage de C/PPS

Afin d'appliquer la stratégie de modélisation du coût proposée au cas du thermoformage-estampage de C/PPS, des facteurs de coût ont été estimés en se basant sur l'expertise de l'équipe Procédés Matériaux Composites de l'IRT Jules Verne. Ces facteurs de coût sont présentés dans le Tableau 23.

Tableau 23 : Facteurs de coût relatifs aux flux d'inventaire du procédé de thermoformage-estampage de C/PPS.

Énergie électrique	$5,56.10^{-8}$	€/J
Eau	$3,98.10^{-3}$	€/L
Abrasifs (grenats)	0,7	€/kg
Traitement des déchets	0,1	€/kg
Agent démoulant	42	€/kg
Matériau C/PPS	38	€/kg
Main d'œuvre	$1,12.10^{-2}$	€/s

### 5.2.3. Recherche des postes majeurs d'impact environnemental et de coût (étapes I.2 et II.2)

#### 5.2.3.1. Stratégie

Pour réduire l'impact environnemental d'un procédé, la stratégie que l'on propose d'adopter dans les étapes I.2 et II.2 de la méthodologie proposée en Figure 63 consiste à travailler en priorité sur les principaux postes d'impact environnementaux, pour lesquels on présume que la marge de progression sera la plus grande. Par conséquent, il est important d'identifier les étapes unitaires et les flux d'inventaire qui sont responsables des plus grands impacts environnementaux du procédé. **On les appellera alors les postes d'impacts et de coût majeurs du procédé.** Une fois identifiés, des modifications du procédé pourront être proposées pour diminuer l'impact environnemental de ces postes d'impact majeurs. Un exemple de ce type de modification est l'isolation thermique des machines pour réduire la consommation d'énergie du procédé. Avec la même stratégie, les étapes unitaires et flux d'inventaire responsables des coûts les plus importants du procédé seront considérés comme les postes à améliorer en priorité.

#### 5.2.3.2. Identification des postes d'impacts majeurs

Afin d'identifier les postes majeurs d'impacts environnementaux (étape I.2) et de coût (étape II.2), la méthodologie proposée dans ces travaux est présentée sur la Figure 66. Afin d'illustrer cette méthodologie, son application au cas du thermoformage-estampage de C/PPS est présentée plus tard dans ce chapitre.

La méthode d'identification des postes de coûts les plus importants est représentée sur la Figure 66 (étape II.2). Elle consiste dans un premier temps à définir un scénario de fabrication de référence, c'est-à-dire une configuration de paramètres du procédé (étape II.2.1). Une évaluation économique de ce scénario est ensuite réalisée en utilisant le modèle de coût précédemment développé (étape II.2.2). Les résultats obtenus sont alors analysés afin de déterminer les étapes unitaires et les flux d'inventaire responsable des coûts les plus importants (étape II.2.4). Afin de s'affranchir de la dépendance au scénario de référence, une approche par analyse de sensibilité est ensuite déployée lors de l'étape II.2.5 pour prendre en compte l'influence que peuvent avoir les réglages du procédé. Cette analyse de sensibilité consiste en fait à faire varier un par un les paramètres du procédé autour du scénario de référence en regardant l'influence de ces variations sur l'ordre d'importance des différents postes de coût du procédé. Elle vise à valider que les postes de coût identifiés comme majeurs sur le scénario de référence le restent quelle que soit la configuration de paramètres du procédé. Dans le cas contraire, de nouveaux postes de coûts majeurs du procédé pourront être identifiés. En effet, la liste des postes de coûts majeurs établie lors de l'analyse du scénario de référence pourra être étoffée par des postes de coûts identifiés lors de la phase d'analyse de sensibilité.

La méthode d'identification des postes d'impacts environnementaux majeurs est représentée sur la Figure 66-1.2. Cette méthode est très similaire à celle développée pour l'identification des postes de coût majeurs. En effet, elle se base d'abord sur l'identification des postes d'impacts environnementaux majeurs d'un scénario de fabrication de référence.

L'analyse des résultats environnementaux est cependant plus complexe car au total 19 indicateurs environnementaux sont calculés avec la méthode EF v1.00. Il est alors probable que l'ordre d'importance des postes d'impact varie selon la catégorie d'impact regardée. Afin de faciliter les interprétations et l'identification des postes d'impacts majeurs, une procédure de réduction du nombre de catégories d'impact analysées est proposée dans nos travaux. Cette étape 1.2.3 se divise en deux sous-étapes :

Étape i : La méthode proposée dans le PEF est utilisée pour réaliser un premier tri [91]. Pour chaque catégorie d'impact, en utilisant des facteurs de pondération et de normalisation fournis par le guide PEF, un indicateur est construit comme la somme pondérée de ces impacts normalisés. Les facteurs de pondération et de normalisation sont définis par la méthode PEF. En suivant les recommandations du guide, les catégories d'impact conservées comme pertinentes sont celles dont la contribution cumulée atteint au minimum 80 % de l'empreinte environnementale totale en allant de la contribution la plus importante à la contribution la plus modeste.

Étape ii : Afin de faciliter l'interprétation, une stratégie de réduction de l'information est ensuite appliquée. Elle s'inspire des travaux de Guérin-Schneider *et al.* visant à faciliter l'interprétation de résultats d'ACV pour la prise de décision [92]. Cette stratégie consiste alors à faire un tri parmi les indicateurs d'impacts en fonction des proportions d'impacts environnementaux de chaque étape unitaire du procédé. Si plusieurs catégories d'impacts environnementaux présentent des résultats semblables, alors seulement une de ces catégories d'impact est conservée.

Grâce à la réduction du nombre d'indicateurs environnementaux considérés, l'identification des postes d'impacts environnementaux (étape 1.2.4) les plus importants est facilitée pour le scénario de production étudié.

Afin de prendre en compte l'influence des paramètres du procédé sur les postes d'impacts environnementaux, une analyse de sensibilité est réalisée (étape 1.2.5). Cette analyse de sensibilité est là encore motivée par la volonté de généraliser les résultats obtenus sur le scénario de référence. De la même façon que pour l'identification des postes de coûts majeurs du procédé, il s'agit alors de faire varier un par un les paramètres du procédé pour étudier l'influence de ces variations sur les postes d'impacts environnementaux majeurs des catégories d'impact conservées.

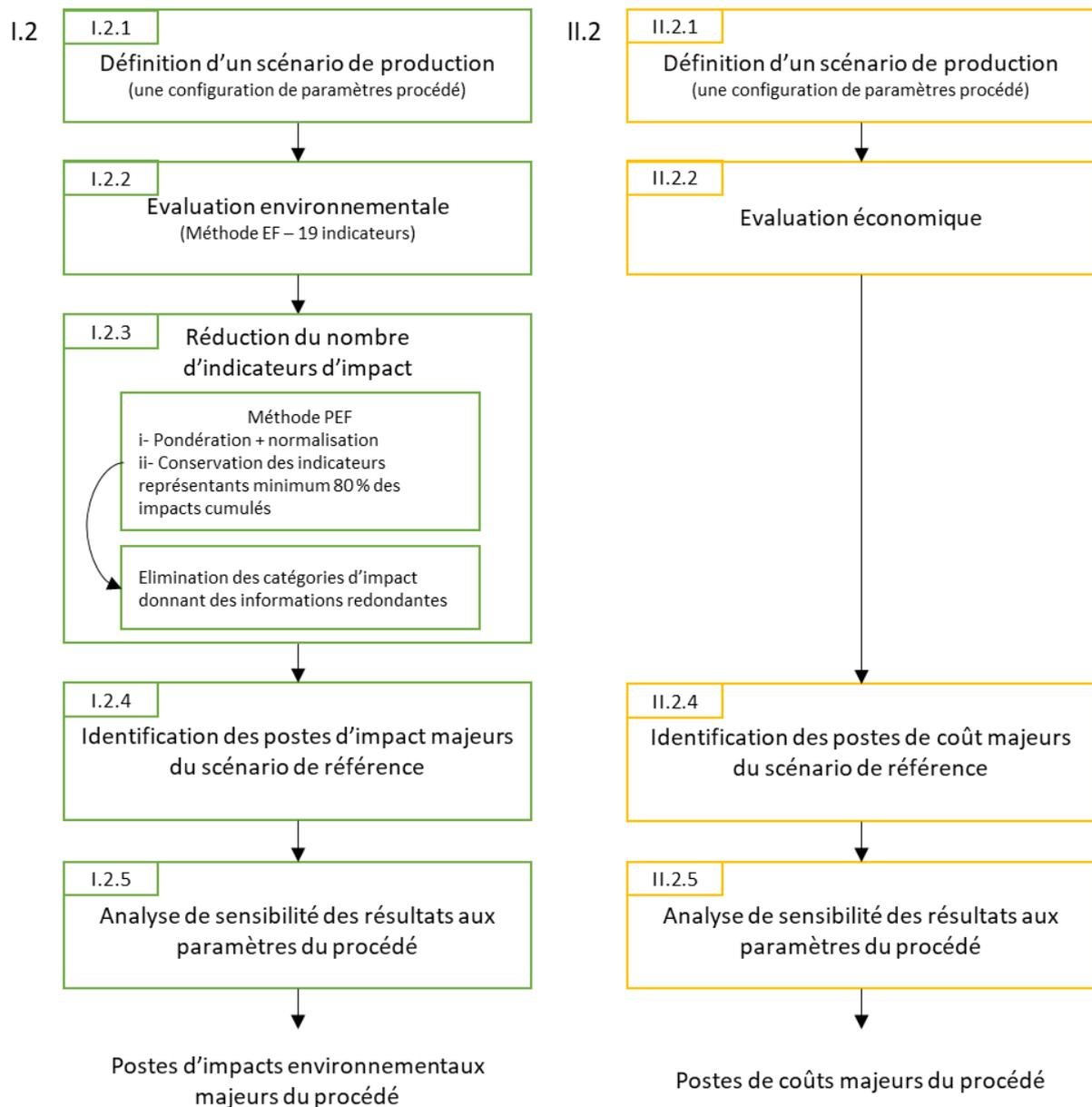


Figure 66 : Etape I.2. Méthodologie d'identification des postes d'impacts environnementaux majeurs du procédé ; Etape II.2. Méthodologie d'identification des postes de coût majeurs du procédé.

## 5.2.4. Analyse de l'influence des paramètres procédés (étapes I. 3 et II.3)

### 5.2.4.1. Stratégie

Dans le but de réduire les impacts environnementaux des procédés, une autre stratégie développée dans nos travaux consiste à jouer sur les réglages des paramètres du procédé. Pour trouver la meilleure configuration de paramètres, la démarche proposée ici consiste à évaluer l'influence de chaque paramètre du procédé sur ses impacts environnementaux. Les paramètres qui ont le plus d'influence sur les résultats environnementaux sont alors considérés comme les leviers principaux qui permettent de réduire l'impact environnemental du procédé étudié. Par ailleurs, l'identification de ces paramètres permet également de déterminer des axes prioritaires d'amélioration des modèles d'inventaire. Il sera par exemple particulièrement intéressant de creuser en priorité la dépendance des modèles à ces paramètres afin d'affiner la prédiction des impacts environnementaux. Concernant l'objectif de

diminution du coût du procédé, une stratégie similaire est adoptée pour identifier les paramètres qui ont le plus d'influence.

#### 5.2.4.2. Évaluation de l'influence des paramètres par analyse de sensibilité

Afin d'évaluer l'influence des paramètres du procédé sur les impacts environnementaux et le coût du procédé, les modèles environnementaux et économiques développés précédemment sont utilisés avec une approche par analyse de sensibilité. Cette analyse de sensibilité est réalisée avec la méthode des plans d'expériences afin de prendre en compte les interactions possibles entre les paramètres. Pour cela, différents scénarios de production, relatifs à différentes configurations de paramètres sont d'abord définis selon des plans d'expériences factoriels complets. Les modèles économiques et environnementaux sont ensuite exploités pour obtenir le coût et les impacts environnementaux relatifs à ces différents scénarios. L'analyse statistique des résultats permet enfin de construire un modèle en utilisant un modèle affine avec interaction double :

$$\text{Climate change} = m + \sum_{i=1}^4 c_i P_{norm,i} + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 c_{i,j} P_{norm,i} P_{norm,j}$$

Avec :

$m$  : Constante

$P_{norm,i}$  : La valeur normalisée du paramètre  $P_i$  du procédé :

$$P_i = -1 + 2 \times \frac{P_i - \text{Min}(P_i)}{\text{Max}(P_i) - \text{Min}(P_i)}$$

$c_i$  : Les coefficients associés aux paramètres normalisés du modèle  $P_i$ .

Les coefficients  $c_i$  sont alors considérés comme des indicateurs de l'influence de chacun des paramètres  $P_i$ . La méthodologie proposée permet ainsi de quantifier l'influence de chaque paramètre. A partir de ces informations, une hiérarchie de l'influence des différents paramètres peut être établie.

#### 5.2.5. Analyse des incertitudes (étapes I.1 et II.1)

##### 5.2.5.1. Motivations

Au cours de la construction des modèles environnementaux et économiques, l'étape d'analyse d'inventaire décrite dans le chapitre 4 peut être responsable d'incertitudes sur les résultats finaux. Lors de cette étape, la modélisation des flux d'inventaire est réalisée en fonction des paramètres du procédé. Pour cela, des données sont collectées par différents moyens, choisis en utilisant la méthode proposée sur la Figure 27 du chapitre 4, auxquels on peut associer différents degrés de confiance : des mesures expérimentales ou bien la collecte de données existantes dans la littérature ou encore des bases de données. L'utilisation de données non mesurées est en effet une source potentielle d'erreur puisque ces données ne sont pas toujours adaptées aux spécificités du cas étudié, contrairement aux données directement mesurées sur le système étudié. Ces données peuvent par exemple traduire le comportement de machines différentes de celles étudiées, utilisées sur un autre matériau que celui de l'étude et avec des réglages différents de la plage de paramètres fixée lors de la définition du périmètre de l'étude. Pour choisir la méthode de collecte des données d'inventaire, la méthodologie proposée dans le chapitre 4 s'appuie sur l'idée qu'il est nécessaire en priorité d'assurer un niveau de confiance élevé pour les flux d'inventaire jugés par la personne en charge de l'analyse environnementale comme ayant le plus d'influence sur les résultats environnementaux. Il est alors important de vérifier ce jugement. Une méthode de quantification et de gestion de ces incertitudes a par conséquent été développée dans ces travaux de thèse.

### 5.2.5.2. Stratégie

Afin de gérer les incertitudes, un indicateur de la criticité des données d'inventaire disponibles est proposé. Cet indicateur sera utilisé pour quantifier le degré de confiance dans chaque donnée d'inventaire non mesurée et identifier les besoins de précisions de certains flux d'inventaire. La définition de cet indicateur repose sur l'idée que **la criticité d'une donnée d'inventaire repose sur deux critères complémentaires : l'incertitude qui est associée à la valeur de cette donnée et l'impact sur les résultats finaux qu'implique l'incertitude sur la valeur de cette donnée**. L'indicateur de criticité proposé dans ces travaux de thèse sera donc défini comme le produit d'un indicateur de l'incertitude des données d'inventaire et d'un indicateur de l'influence de variation de la donnée d'inventaire sur les résultats des modèles environnementaux ou économiques. La méthode proposée ici se base donc sur deux approches complémentaires. Tout d'abord, les incertitudes relatives à chaque flux d'inventaire du système étudié sont quantifiées à l'aide d'une approche de PEDIGREE. Ensuite, l'influence sur les résultats des modèles environnementaux et économiques d'incertitudes sur les données d'inventaire non mesurées est évaluée par analyse de sensibilité. Cette méthodologie est présentée sur la Figure 67 pour le calcul de la criticité d'une donnée d'inventaire.

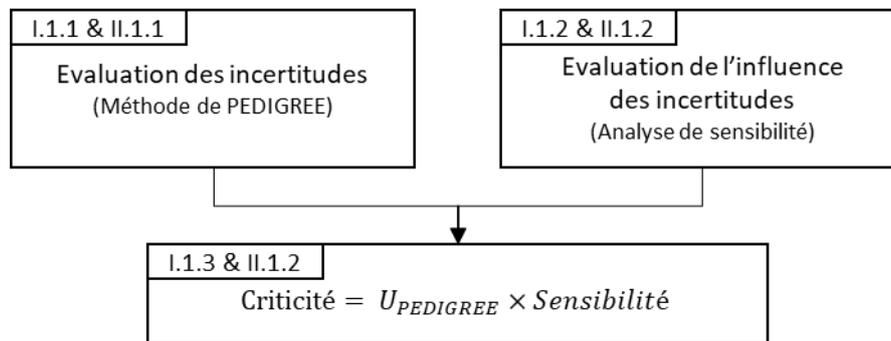


Figure 67 : Méthode de calcul de la criticité d'une donnée d'inventaire.

### 5.2.5.3. Évaluation d'incertitude par méthode de PEDIGREE (Etape I.1.1 et II.1.1)

La méthode utilisée pour évaluer les incertitudes liées à l'étape de collecte des données d'inventaire s'appuie sur celle, dite de la matrice de PEDIGREE, proposée par Weidema et Wesnæs [93] pour évaluer des incertitudes additionnelles de données d'inventaire. Elle consiste à évaluer les données d'inventaire sur cinq critères en attribuant à chacun un score entre 1 et 5. Cette évaluation est encadrée par des règles qui sont présentées dans le Tableau 24. Ce type d'évaluation permet de construire un vecteur dont chaque coefficient traduit la qualité de la donnée selon un des cinq critères évalués.

Afin de traduire ce vecteur en un indicateur d'incertitude totale sur le flux d'inventaire étudié, une méthode a été développée et appliquée dans la base de données Ecoinvent [94]. Tout d'abord, les scores évalués pour chacun des cinq critères sont traduits en indicateurs d'incertitude par l'intermédiaire de facteurs d'incertitude présentés sur le Tableau 24. Les indicateurs d'incertitude ainsi déterminés pour chacun des cinq critères sont ensuite agrégés en un unique indicateur d'incertitude. C'est cet indicateur qui sera utilisé pour le calcul de la criticité des données d'inventaire. Cet indicateur d'incertitude est alors obtenu par la formule :

$$U_{PEDIGREE} = \sqrt{\sum_{i=1}^5 \ln(U_i)^2}$$

Avec :

$U_{PEDIGREE}$  : L'indicateur d'incertitude totale de la donnée étudiée ;

$U_i$  : L'indicateur d'incertitude du critère  $i$ , obtenu grâce au Tableau 24.

Tableau 24 : Matrice de PEDIGREE adaptée de Weidema et Wesnæs [93] et indicateurs d'incertitudes  $U_i$  pour la conversion des scores PEDIGREE en indicateurs d'incertitudes [94].

Score	1	2	3	4	5 (par défaut)
<b>Justesse, précision</b>	Donnée vérifiée et basée sur des mesures $U_{just} = 1$	Donnée vérifiée partiellement et basée sur des hypothèses OU données non vérifiées et basées sur des mesures $U_{just} = 1,05$	Donnée vérifiée partiellement basée sur des estimations qualifiées $U_{just} = 1,1$	Estimation qualifiée (par un expert industriel par exemple) $U_{just} = 1,2$	Estimation non qualifiée $U_{just} = 1,5$
<b>Complétude, exhaustivité</b>	Donnée représentative de tous les sites liés au marché considéré sur une période adéquate afin de réduire les fluctuations $U_{comp} = 1$	Donnée représentative de plus de 50% des sites liés au marché considéré sur une période adéquate afin d'éviter les fluctuations $U_{comp} = 1,02$	Donnée représentative de quelques sites liés au marché considéré (<50%) ou représentative de plus de 50% des sites mais pour des périodes plus courtes $U_{comp} = 1,05$	Donnée représentative d'un seul site relié au marché considéré OU de quelques sites mais pour des périodes plus courtes $U_{comp} = 1,1$	Représentativité inconnue ou donnée d'un petit nombre de sites ET de périodes plus courtes $U_{comp} = 1,2$
<b>Corrélation temporelle</b>	Donnée avec moins de trois ans de différence avec l'année de l'étude $U_{temp} = 1$	Donnée avec moins de six ans de différence avec l'année d'étude $U_{temp} = 1,03$	Donnée avec moins de dix ans de différence avec l'année d'étude $U_{temp} = 1,1$	Donnée avec moins de quinze ans de différence avec l'année d'étude $U_{temp} = 1,2$	Âge de la donnée inconnu OU donnée avec plus de quinze ans de différence avec l'année d'étude $U_{temp} = 1,5$
<b>Corrélation géographique</b>	Donnée issue de la zone d'étude $U_{géo} = 1$	Donnée moyenne d'une zone plus large dans laquelle la zone à d'étude est incluse $U_{géo} = 1,01$	Donnée issue d'une zone aux conditions de production similaires $U_{géo} = 1,02$	Donnée issue d'une zone aux conditions de production légèrement similaires $U_{géo} = 1,05$	Donnée issue d'une zone inconnue OU d'une zone avec des différences importantes $U_{géo} = 1,1$
<b>Corrélation technologique</b>	Donnée issue d'entreprises, de processus et de matériels à l'étude $U_{techno} = 1$	Données issues de processus et de matériels à l'étude (même technologie) mais d'entreprises différentes $U_{techno} = 1,05$	Donnée issue de processus et de matériels à l'étude mais de technologies différentes $U_{techno} = 1,2$	Donnée associée à des processus et des matériels connexes $U_{techno} = 1,5$	Donnée reliée à des processus à l'échelle du laboratoire ou à des technologies différentes $U_{techno} = 2$

La méthode de la matrice de PEDIGREE qui vient d'être détaillée permet de calculer un indicateur d'incertitude pour n'importe quelle donnée d'inventaire. On propose donc d'appliquer cette méthode à chacune des données d'inventaire collectées lors de la phase d'analyse d'inventaire décrite dans le chapitre 4. L'analyse des indicateurs d'incertitude ainsi calculés permet alors d'identifier les flux d'inventaire avec l'incertitude la plus élevée.

#### 5.2.5.4. Évaluation de l'influence de l'utilisation des données non mesurées par analyse de sensibilité (étapes I.1.2 et II.1.2)

Afin d'évaluer l'influence d'incertitudes des données non mesurées sur les impacts environnementaux et sur le coût du procédé, une méthode d'analyse de sensibilité est développée. Dans un premier temps, un scénario de production est choisi et les modèles d'inventaire sont utilisés pour calculer les données d'inventaire qui s'y rapportent. Un plan d'expérience est alors établi en prenant comme paramètres les valeurs des données d'inventaire non mesurées. Pour chaque donnée d'inventaire non mesurée, des variations des valeurs initialement collectées sont imposées afin de représenter l'incertitude autour de leur valeur réelle. Pour chaque configuration d'inventaire décrite dans le plan d'expérience, les impacts environnementaux et le coût du procédé sont ensuite calculés. L'analyse statistique des résultats obtenus permet ensuite d'établir une modélisation des résultats économiques et environnementaux en fonction des valeurs de données non mesurées. Pour cela, un modèle affine avec interaction double semblable à celui utilisé pour l'étude de l'influence des paramètres est choisi. Dans ces travaux de thèse, ce type d'analyse statistique est réalisé avec le logiciel Minitab. Les coefficients de ces modèles sont enfin utilisés comme des indicateurs de la sensibilité des modèles aux incertitudes potentielles des données non mesurées. Par conséquent, l'analyse de ces résultats permet alors d'identifier les flux d'inventaire dont l'incertitude est la plus influente sur les résultats économiques et environnementaux. Associés aux résultats de l'analyse de PEDIGREE, les résultats de l'analyse de sensibilité permettent de calculer l'indicateur de criticité de chaque donnée d'inventaire étudiée.

### 5.3. Application au cas du thermoformage-estampage de C/PPS

#### 5.3.1. Description du cas étudié et du scénario de production de référence

Afin d'illustrer la méthodologie d'analyse environnementale et économique des procédés composites proposée, une application au cas du thermoformage-estampage de pièces en C/PPS a été réalisée. Pour cela, un scénario de production a d'abord été défini comme référence (étapes I.2.1 et II.2.1). Ce scénario de production considère la fabrication d'une pièce plaque en C/PPS de dimensions 250 mm x 200 mm x 4,34 mm. Cette pièce est produite en France avec les paramètres de fabrication décrits dans le Tableau 25. La longueur de découpe a été estimée en supposant une dimension supérieure de la préforme de 10 mm par rapport à la pièce. Le calcul de la surface du moule se base sur la géométrie de la préforme. Dans le but de surestimer l'impact environnemental associé aux émissions dans l'air du procédé, la température seuil d'émission lors du chauffage IR est fixée à la température ambiante (20 °C). D'autre part, les chutes de matières ont été principalement attribuées à la phase de découpe de la préforme (90 % des chutes). La taille des séries de production et les durées associées aux différentes étapes ont été choisies d'après des discussions avec des industriels et suites aux observations réalisées lors de la visite du site de production de DAHER à Nantes dans le cadre de leur participation au programme PERFORM de l'IRT Jules Verne. Les durées de la phase d'emboutissage et de la phase de chauffage ont par exemple été choisies égales, ce qui permet de chauffer et d'emboutir deux pièces de façon simultanée. Par conséquent, la durée d'inactivité des machines est réduite. Le temps de ralenti du bras robot a été choisi égal à la durée d'emboutissage et de chauffage.

Utilisant les modèles d'inventaire développés dans le chapitre 4, avec ces paramètres et synthétisés dans le Tableau 25, les données d'inventaire associées à la production de la pièce étudiée ont été calculées. Ces données sont également présentées dans le Tableau 25. La consommation de matériau C/PPS est estimée à 451 g, avec une surconsommation estimée à 114 g.

Tableau 25 : Paramètres de fabrication et données d'inventaire pour le scénario de production de la pièce plaque de 250 mm x 200 mm x 4,34 mm choisie comme référence.

Processus unitaire	Paramètres du procédé	Données d'inventaire calculées
<b>Découpe de la préforme</b>	$t_{DJE\text{ ralenti}} = 60\text{ s}$	$E_{DJE\text{ découpe}} = 912\text{ kJ}$
	$L_{DJE\text{ découpe}} = 0,94\text{ m}$	$V_{DJE\text{ eau}} = 3,2\text{ L}$
	$R_{DJE\text{ chutes}} = 90\text{ \%}$	$m_{DJE\text{ abrasif}} = 447\text{ g}$
		$m_{DJE\text{ chutes}} = 103\text{ g}$
		$V_{DJE\text{ eaux usées}} = 3,2\text{ L}$
		$m_{DJE\text{ déchets abrasifs}} = 447\text{ g}$
<b>Chauffage de la préforme</b>	$H_{\text{paramètre}} = 90\text{ \%}$	$E_{\text{four IR}} = 3\,070\text{ kJ}$
	$T_0\text{ pièce} = 20\text{ °C}$	$m_{\text{IR H2S}} = 908\text{ mg}$
	$T_{\text{consigne}} = 370\text{ °C}$	$m_{\text{IR PM 2,5}} = 5,2\text{ mg}$
	$T_{\text{émission}} = 20\text{ °C}$	
<b>Transfert</b>	$t_{\text{IR ralenti}} = 8\text{ s}$	
	$t_{\text{robot déplacement}} = 8\text{ s}$	$E_{\text{robot}} = 82\text{ kJ}$
	$t_{\text{robot ralenti}} = 91,5\text{ s}$	$m_{\text{robot H2S}} = 79,3\text{ mg}$
		$m_{\text{robot PM 2.5}} = 0,455\text{ mg}$
<b>Emboutissage</b>	$N_{\text{pièce}} = 10$	$E_{\text{presse}} = 3\,983\text{ kJ}$
	$t_{\text{presse fonctionnement}} = 99,5\text{ s}$	$m_{\text{presse démoulant}} = 1,3\text{ g}$
	$t_{\text{presse estampage}} = 91,5\text{ s}$	
	$T_{\text{presse consigne}} = 100\text{ °C}$	
	$S_{\text{moule}} = 0,11\text{ m}^2$	
<b>Finition</b>		$m_{\text{chutes finition}} = 11\text{ g}$
		$E_{\text{finition}} = 132\text{ kJ}$

S'appuyant sur les travaux de Wegmann *et al.* [35], le polydiméthylsiloxane a été choisi comme agent démoulant. Afin de surestimer l'impact environnemental associé aux émissions dans l'air, le pire scénario a été considéré : sulfure d'hydrogène (H<sub>2</sub>S) comme seul composé chimique émis et particules fines de diamètre égal à 2,5 µm maximum. Un scénario d'enfouissement des déchets a par ailleurs été choisi, suite aux échanges avec DAHER.

Concernant la modélisation de l'impact environnemental de la production de fibres de carbone, des données issues de la littérature et rassemblées par Forcellese *et al.* [37] sont utilisées. La production de polyacrylonitrile (PAN) est modélisée par des données proposées par Duflou *et al.* [95] puis la fabrication de fibres de carbone à partir de PAN est modélisée avec des données issues des travaux de Khalil [96]. Ces données sont présentées dans le Tableau 26 et le Tableau 27.

Tableau 26 : Données d'inventaire pour la production d'1 kg de PAN, d'après Duflou et al. [95].

<b>Flux entrants</b>	Acrylonitrile	1 kg
	Dimethylformamide	0,00335 kg
	Polydimethylsiloxane	0,1 kg
<b>Energie et autres ressources</b>	Energie électrique	60 MJ
	Vapeur	18 kg

Tableau 27 : Données d'inventaire pour la production d'1 kg de fibres de carbone à partir de PAN, d'après Khalil [96].

<b>Flux entrants</b>	Polyacrylonitrile (PAN)	1,82 kg
	Air	6,95 kg
	Diazote (N <sub>2</sub> )	0,94 kg
<b>Energie et autres ressources</b>	Energie thermique	8,04 MJ
	Energie électrique	0,2 MJ
	Vapeur d'eau	0,673 kg
<b>Flux sortants</b>	Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> )	0,407 kg
	Cyanure d'hydrogène (HCN)	0,255 kg
	Monoxyde de carbone (CO)	0,038 kg
	Protoxyde d'azote (N <sub>2</sub> O)	0,0007 kg
	Air	6,07 kg
	Hydrogène (H <sub>2</sub> )	0,00023 kg
	Ammoniac (NH <sub>3</sub> )	0,023 kg
	Diazote (N <sub>2</sub> )	1183 kg
	Ethane (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	0,0078 kg
	Ethène (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	0,0073 kg
	Méthane (CH <sub>4</sub> )	0,042 kg

### 5.3.2. Analyse environnementale

#### 5.3.2.1. Identification des postes majeurs d'impacts environnementaux (étape I.2)

Les résultats du modèle environnemental du procédé de thermoformage-estampage de C/PPS pour le scénario de production décrit dans le paragraphe précédent sont présentés sur la Figure 68.

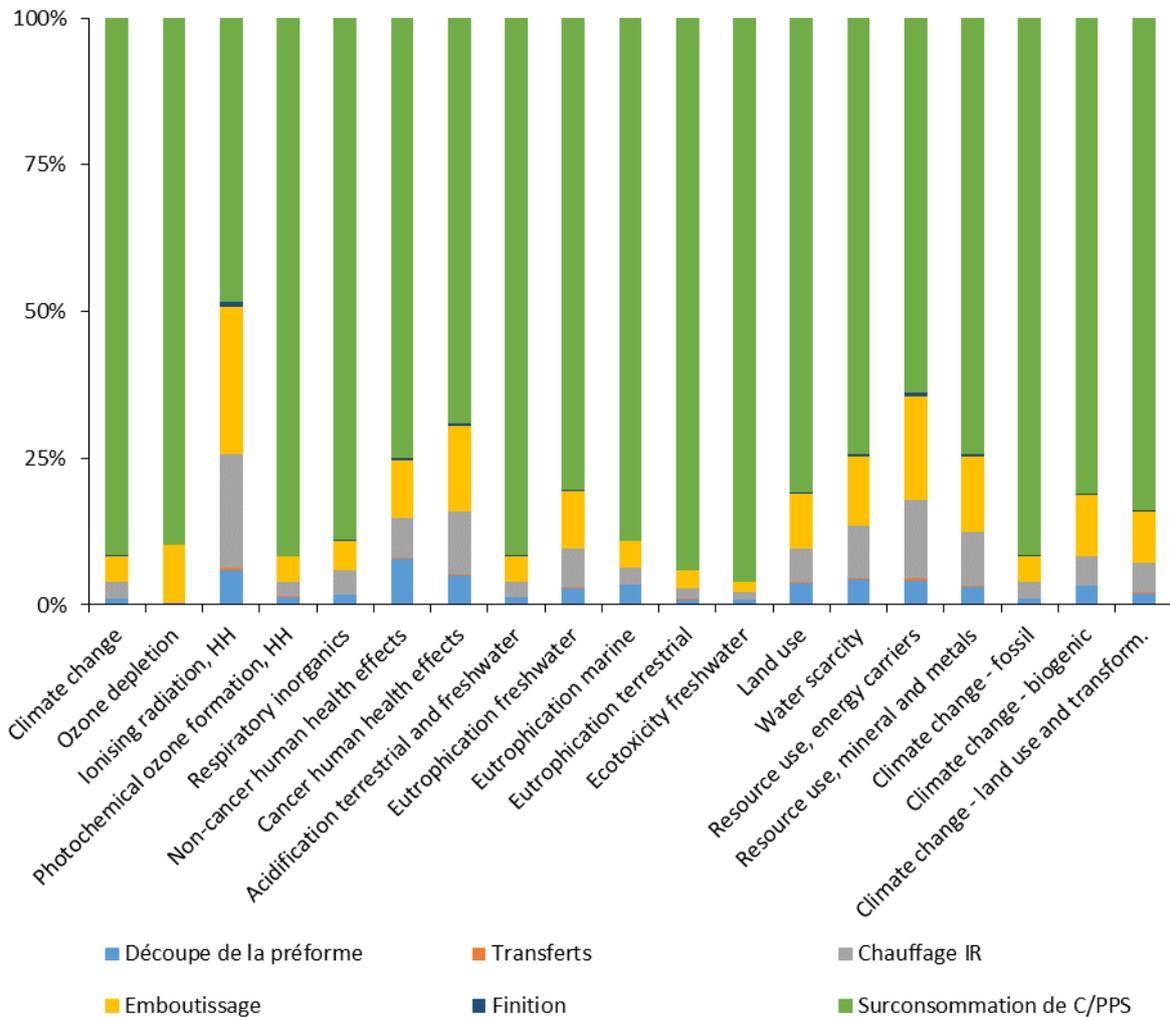


Figure 68 : Résultats du modèle environnemental du procédé de thermoformage-estampage de C/PPS pour le scénario de production choisi comme référence.

Afin de faciliter l'interprétation de ces résultats, la procédure de réduction du nombre d'impacts analysés est appliquée (étape I.2.3). Dans un premier temps, les résultats environnementaux sont normalisés et pondérés selon la méthode du PEF [91]. Ce travail permet ainsi de classer les catégories d'impact par ordre de contribution à l'empreinte environnementale du procédé comme présenté dans le Tableau 28. En appliquant le critère de conservation des catégories d'impact dont la contribution cumulée atteint 80 % minimum de l'empreinte environnementale du procédé, 7 catégories d'impact sont conservées. Les résultats simplifiés par cette première étape sont présentés sur la Figure 69.

Tableau 28 : Participation normalisée et pondérée des différentes catégories d'impacts environnementaux à l'empreinte environnementale du procédé de thermoformage-estampage avec le scénario choisi selon la méthode du PEF [91].

Catégorie d'impact*	Total (μPt)	% de l'empreinte environnementale	% cumulé
<i>Resource use, energy carriers</i>	105,4	31 %	31 %
<i>Climate change</i>	53,4	16 %	47 %
<i>Ozone depletion</i>	42,0	12 %	59 %
<i>Ionising radiation, HH</i>	32,2	10 %	69 %
<i>Respiratory inorganics</i>	16,5	5 %	74 %
<i>Cancer human health effects</i>	15,9	5 %	79 %
<i>Acidification terrestrial and freshwater</i>	15,8	5 %	83 %
<i>Water scarcity</i>	8,9	3 %	86 %
<i>Eutrophication terrestrial</i>	8,7	3 %	89 %
<i>Ecotoxicity freshwater</i>	8,5	3 %	91 %
<i>Photochemical ozone formation, HH</i>	7,4	2 %	93 %
<i>Resource use, mineral and metals</i>	6,7	2 %	95 %
<i>Non-cancer human health effects</i>	6,6	2 %	97 %
<i>Eutrophication freshwater</i>	5,8	2 %	99 %
<i>Eutrophication marine</i>	3,2	1 %	100 %
<i>Land use</i>	0,5	0 %	100 %

\*Les catégories d'impact dans les cases grisées sont éliminées

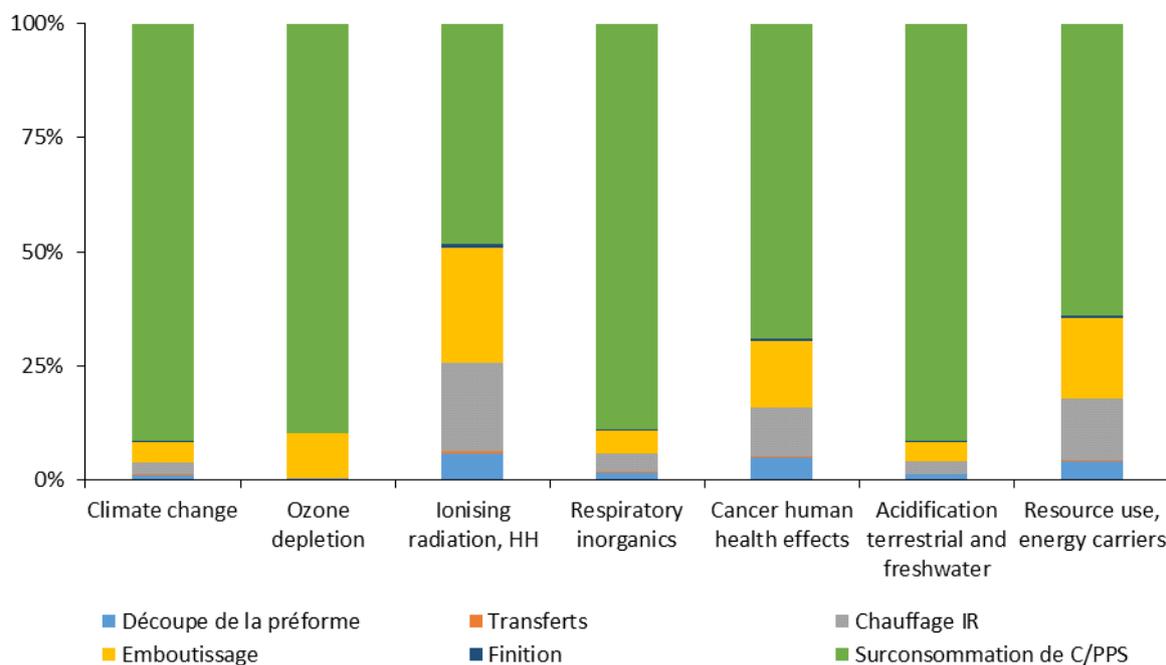


Figure 69 : Résultats du modèle environnemental du procédé de thermoformage-estampage de C/PPS pour le scénario de production choisi comme référence, simplifiés avec la méthode du PEF.

Afin de continuer à réduire le nombre de catégories d'impacts à analyser, la seconde étape de simplification est réalisée. Les catégories d'impact qui présentent des résultats similaires en termes de distribution des impacts par étapes unitaires sont rassemblés en deux groupes. Une seule catégorie d'impact est conservée pour chacun des groupes ainsi formés. Un premier groupe est constitué des catégories d'impact *Climate change*, *Ozone depletion*, *Respiratory inorganics* et *Acidification terrestrial*

and freshwater. Un second groupe est composé des catégories d'impact *Ionising radiation, HH, Cancer human health effects* et *Ressource use, energy carriers*. Par conséquent, la conservation des seules catégories *Climate change* et *Ionising radiation, HH* a été décidée, permettant une représentation simplifiée des résultats environnementaux (Figure 70).

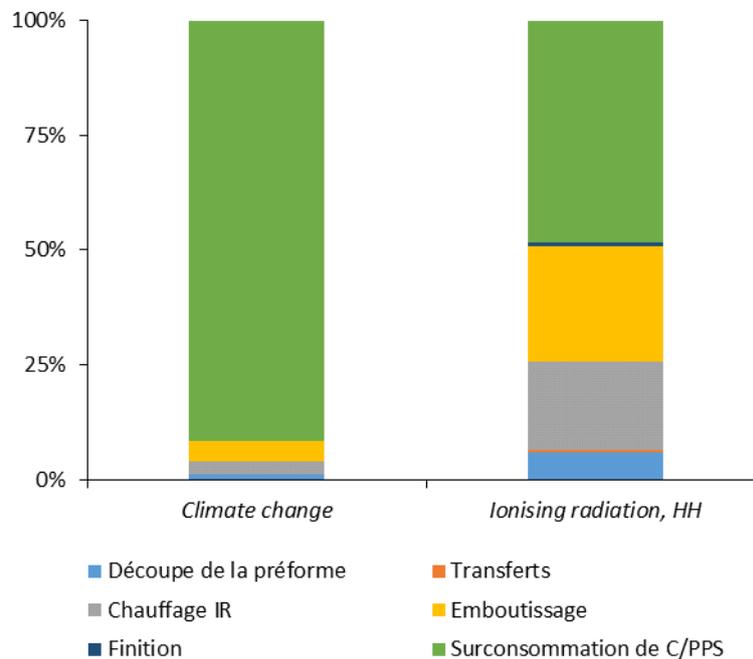


Figure 70 : Résultats du modèle environnemental du procédé de thermoformage-estampage de C/PPS simplifiés.

La diminution du nombre d'indicateurs environnementaux exploités permet de simplifier l'identification des postes d'impacts environnementaux majeurs du procédé. Ces résultats montrent que ce sont les surconsommations de matériau C/PPS qui sont responsables de la plus grande fraction des impacts environnementaux du procédé. Les étapes unitaires de chauffage de la préforme et d'estampage sont ensuite responsables des plus grands impacts environnementaux en raison de leur consommation d'énergie électrique responsable de la presque totalité de leur impact. Pour la catégorie d'impact *Climate Change*, la surconsommation de matériau C/PPS est par exemple responsable de 92 % de la totalité de cet impact. Les étapes unitaires de chauffage et d'emboutissage sont ensuite responsables de respectivement 3 % et 5 % de l'impact *Climate Change*. Concernant la catégorie d'impact *Ionising radiation*, la surconsommation de matériau C/PPS est responsable de 48 % de cet impact et les étapes de chauffage et d'emboutissage sont respectivement responsables de 19 % et 25 % de cet impact.

Les résultats de ces calculs sur le scénario de référence ont permis d'identifier la surconsommation de matériau C/PPS ainsi que l'énergie électrique consommée par le four et la presse lors des étapes de chauffage et d'emboutissage comme les postes d'impacts environnementaux majeurs du procédé de thermoformage-estampage de C/PPS. Une analyse de sensibilité a ensuite été réalisée pour étudier l'influence du choix des paramètres du procédé sur les postes d'impact majeurs identifiés. Pour cela, des calculs d'impacts environnementaux ont été réalisés en modifiant la valeur de plusieurs paramètres autour du scénario de référence. Les paramètres et les valeurs testées sont présentées dans le Tableau 29. L'ordre d'importance des postes d'impact a ensuite été observé pour chaque configuration testée.

Tableau 29 : Valeurs des paramètres du procédé utilisées pour l'analyse de sensibilité des postes majeurs d'impacts environnementaux du procédé de thermoformage-estampage de C/PPS.

Paramètre étudié		Valeurs étudiées*		
Température de chauffage IR	T <sub>IR consigne</sub>	310 °C	335 °C	<b>370 °C</b>
Puissance de chauffage du four IR	H <sub>paramètre</sub>	70 %	<b>90 %</b>	100 %
Température de moule	T <sub>presse consigne</sub>	50 °C	<b>100 °C</b>	230 °C
Nombre de pièces produite/série de production	N <sub>pièce</sub>	1	<b>10</b>	100

\*Valeurs du scénario de référence en gras

Les résultats obtenus et présentés sur la Figure 71 montrent que pour les différentes configurations de paramètres testées, les postes majeurs d'impact environnementaux restent invariants. Les paramètres du procédé ne semblent donc pas influencer, ce qui valide par conséquent que **la surconsommation de matériau C/PPS ainsi que les phases de chauffage et d'emboutissage** sont les postes d'impact majeurs du procédé de thermoformage-estampage étudié.

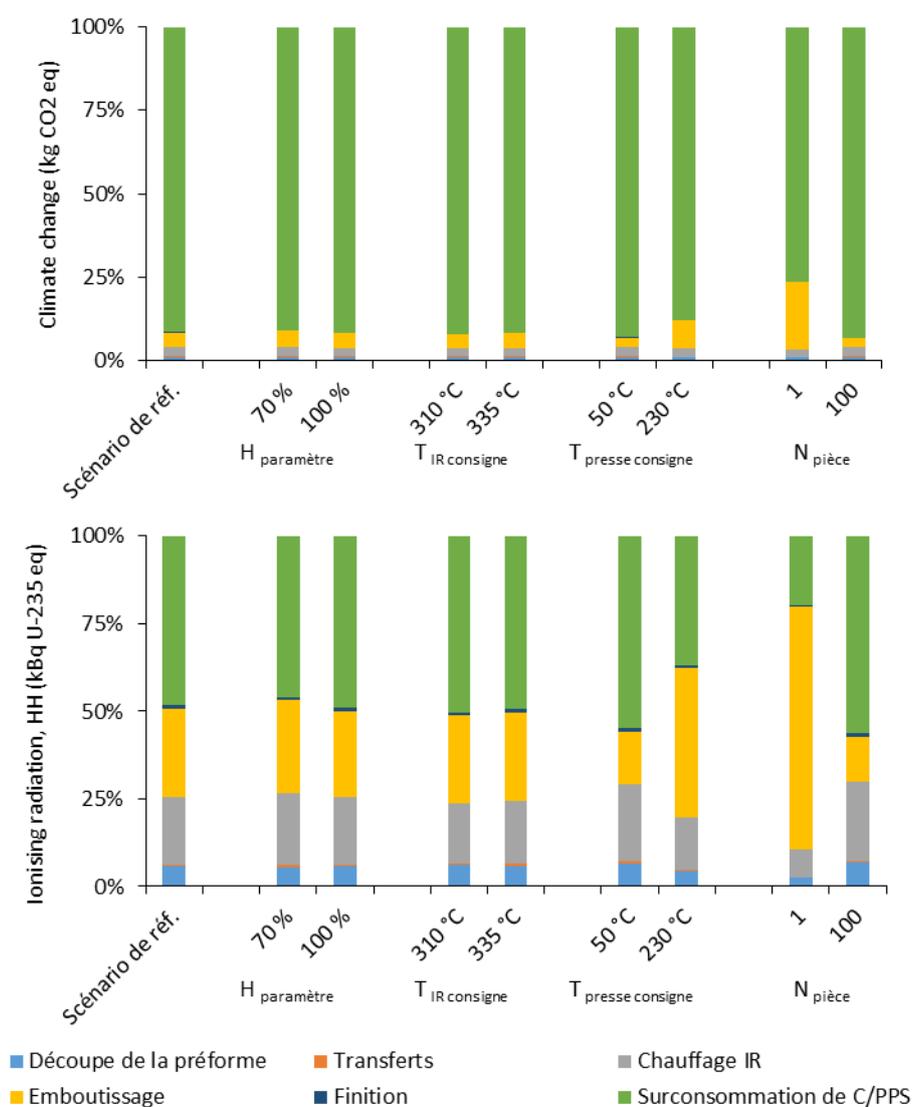


Figure 71 : Résultats de l'analyse de sensibilité des postes d'impacts majeurs pour les catégories d'impacts Climate change et Ionising radiation.

### 5.3.2.2. Influence des paramètres procédés sur les résultats d'impacts environnementaux (étape I.3)

Pour évaluer l'influence des paramètres du procédé sur l'impact environnemental du thermoformage-estampage de pièces en C/PPS, la méthode d'analyse de sensibilité précédemment décrite est appliquée. On s'intéresse dans cette partie à l'influence de quatre paramètres en particulier : la température de consigne lors du chauffage infrarouge ( $T_{IR\ consigne}$ ), le réglage de puissance du four ( $H_{paramètre}$ ), la température de consigne du moule ( $T_{presse\ consigne}$ ) et le nombre de pièces produites dans une série ( $N_{pièce}$ ). Pour étudier l'influence de ces paramètres procédé, un plan d'expériences complet à 4 paramètres et à 2 niveaux est développé. Les valeurs des paramètres testées, qui sont choisies dans la plage admissible identifiée dans le chapitre 3, sont présentées dans le Tableau 30.

Tableau 30: Valeurs des paramètres du procédé utilisées pour l'analyse de sensibilité visant à établir l'influence des paramètres du procédé.

	Valeur min	Valeur max
$T_{IR\ consigne}$	310 °C	370 °C
$H_{paramètre}$	70%	100%
$T_{presse\ consigne}$	50 °C	230 °C
$N_{pièce}$	1 pièce	100 pièces

L'impact environnemental *Climate change* est ensuite calculé pour chaque configuration du plan d'expérience. Cette catégorie d'impact a été choisie ici car elle a été identifiée dans la section précédente comme une des plus significatives (avec la catégorie d'impact *Ionising radiation, HH*) grâce à l'application de la procédure de réduction du nombre d'indicateurs d'impact en vue de la recherche des postes majeurs d'impact (Figure 70). L'analyse statistique des résultats obtenus est alors réalisée en utilisant un modèle affine avec interaction double. Les coefficients du modèle obtenus sont présentés sur la Figure 72.

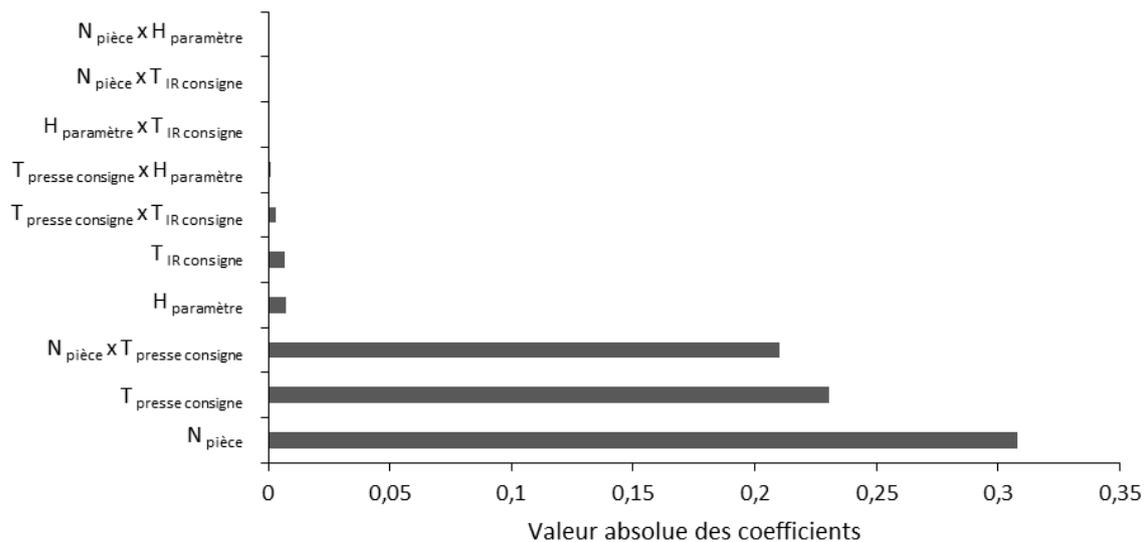


Figure 72 : Indicateurs de la sensibilité de l'impact environnemental *Climate change* aux paramètres du procédé de thermoformage-estampage.

En utilisant les valeurs de ces coefficients comme indicateurs de la sensibilité, le paramètre  $N_{\text{pièce}}$  qui représente le nombre de pièces produites durant une série est le paramètre le plus influent du modèle environnemental. Cela s'explique par le fait que ce paramètre joue sur la distribution de la consommation d'énergie initiale pour chauffer le moule de la presse à la température de consigne. La température de consigne du moule est ensuite le paramètre le plus influent car elle joue de façon significative sur la consommation d'énergie du système thermique de la presse. On note également un couplage entre ces deux premiers paramètres car ils influent tous les deux sur la consommation d'énergie électrique de la presse. Les résultats obtenus montrent enfin que les paramètres de température de consigne et de puissance de chauffage dans le four infrarouge ont une importance moindre. Par conséquent, les paramètres de taille de série de production et de température de moule sont les leviers les plus efficaces pour réduire l'impact environnemental du procédé. Deux mesures peuvent alors être proposées : l'augmentation du nombre de pièces produites durant une série et la diminution de la température du moule. Il est par contre important de noter que contrairement à la première proposition, l'abaissement de la température du moule a une influence sur les propriétés techniques des pièces fabriquées en raison de l'influence de ce paramètre sur la cristallinité du matériau [62], [63]. Par conséquent, l'application de cette mesure peut être contrainte par des critères de qualité de pièce requis dans certaines applications.

### 5.3.3. Prise en compte des incertitudes sur les résultats environnementaux (étape I.1)

#### 5.3.3.1. Méthode de PEDIGREE (étape I.1.1)

Afin d'évaluer l'incertitude associée à l'analyse d'inventaire réalisée sur le procédé de thermoformage-estampage de C/PPS dans le chapitre 4, la méthode de PEDIGREE a été appliquée à chaque flux d'inventaire collecté. Les scores évalués avec cette méthode sont présentés dans le Tableau 31.

Tableau 31 : Évaluation des scores de PEDIGREE pour toutes les données d'inventaire collectées pour le procédé de thermoformage-estampage de C/PPS.

Données d'inventaire		Justesse, précision	Complétude, exhaustivité	Corrélation temporelle	Corrélation géographique	Corrélation technologique
Découpe de la préforme	$E_{\text{DJE découpe}}$	1	1	1	1	1
	$D_{\text{DJE eau}}$	4	1	2	1	1
	$D_{\text{DJE abrasif}}$	4	1	2	1	1
Chauffage IR	$E_{\text{four IR}}$	1	1	1	1	1
	$C_{\text{émissions dans l'air}}$	2	1	1	1	1
Transferts	$E_{\text{robot}}$	1	1	4	3	2
Emboutissage	$E_{\text{presse}}$	1	1	1	1	1
	$C_{\text{démoulant}}$	2	4	4	3	3
Finition	$E_{\text{finition}}$	1	1	2	3	4
Surconsommation de C/PPS	$R_{\text{total}}$	2	4	4	3	4

L'exploitation de ces évaluations permet ensuite de calculer un indicateur de l'incertitude de chaque donnée d'inventaire. Ces résultats sont présentés sur la Figure 73. Ces informations permettent d'établir un classement des données d'inventaire en fonction de leur incertitude avec en première position la donnée relative aux consommations de matériau C/PPS.

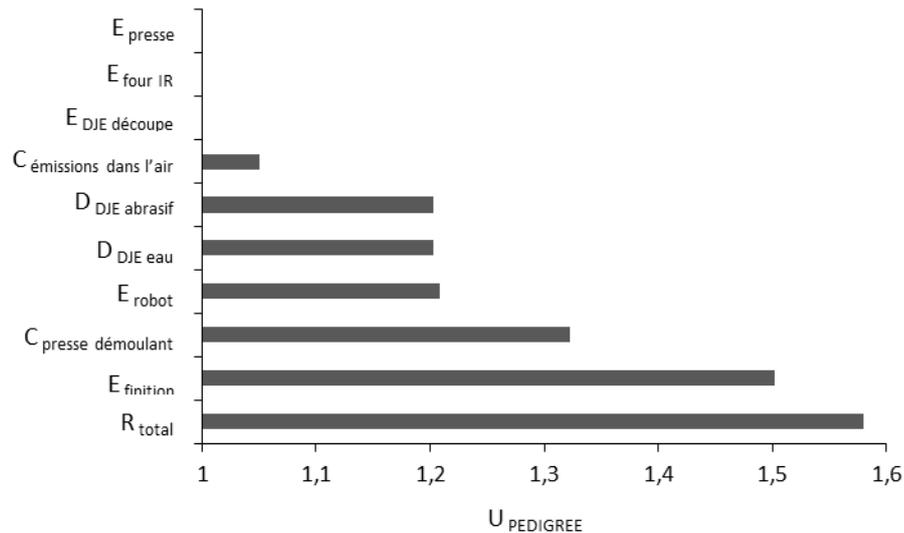


Figure 73 : Indicateurs d'incertitude de PEDIGREE associés aux flux d'inventaire du procédé de thermoformage-estampage de C/PPS.

### 5.3.3.2. Méthode de l'analyse de sensibilité (étape I.1.2)

Pour évaluer l'influence des incertitudes sur les données d'inventaire non mesurées sur l'impact environnemental du procédé, la méthode d'analyse de sensibilité a été appliquée au procédé de thermoformage-estampage de C/PPS.

Les données non mesurées étudiées dans cette partie sont :

- L'énergie consommée par le robot lors du transfert ( $E_{robot}$ ) ;
- Le taux de chute total durant le procédé ( $R_{total}$ ) ;
- Le facteur de consommation d'agent démoulant ( $C_{démoulant}$ ) ;
- Le facteur de consommation d'énergie durant l'usinage de finition ( $C_{énergie\ usinage}$ ) ;
- L'impact environnemental du système secondaire associé à la production de C/PPS (*Climate change*  $C_{PPS}$ ) ;
- Les débits d'eau et d'abrasif lors de la découpe de la préforme par technologie jet d'eau ( $D_{DJE\ eau}$  et  $D_{DJE\ abrasif}$ ).

Un plan d'expérience complet à 9 paramètres et à 2 niveaux a donc été établi, utilisant pour chaque paramètre des valeurs correspondant à 50 % et 150 % de la valeur collectée lors de l'analyse d'inventaire. Les valeurs des données d'inventaire utilisées pour cette analyse de sensibilité sont présentées sur le Tableau 32.

Tableau 32: Valeurs des paramètres du plan d'expérience établi pour l'analyse de sensibilité de l'impact environnemental du procédé de thermoformage-estampage aux incertitudes des données d'inventaire non mesurées.

	Valeur min	Valeur max
$E_{robot}$	41 kJ	123 kJ
$R_{total}$	17 %	51 %
$C_{démoulant}$	5,85 g/m <sup>2</sup>	17,55 g/m <sup>2</sup>
$C_{énergie\ usinage}$	5 750 kJ/kg	17 250 kJ/kg
<i>Climate Change</i> $C_{PPS}$	7,87 kg CO <sub>2</sub> eq/kg	23,62 kg CO <sub>2</sub> eq/kg
$D_{DJE\ eau}$	0,69 cL/s	2,07 cL/s
$D_{DJE\ abrasif}$	0,95 g/s	2,85 g/s

Pour chacune des configurations de ce plan d'expérience, l'impact environnemental *Climate change* a été évalué. L'analyse statistique des résultats obtenus a permis d'obtenir une modélisation dont les coefficients sont représentés sur la Figure 74. Ces résultats montrent alors que ce sont les données relatives à l'impact environnemental de la consommation de C/PPS, au taux de chute de C/PPS et le couplage entre ces deux paramètres qui ont le plus d'effet sur les résultats du modèle. Le facteur de consommation d'agent démoulant est ensuite le facteur ayant le plus d'effet. Les facteurs restants ont quant à eux des effets très faibles. L'interaction entre le taux de chute total et le facteur d'impact environnemental de la consommation de C/PPS peut s'expliquer par le fait que l'impact environnemental lié à la surconsommation de matériau dépend directement de ces deux données. On observe également une interaction entre le taux de chute du procédé et le facteur de consommation d'énergie de l'usinage pour la finition. Cela s'explique par le fait que la consommation d'énergie de l'étape de finition dépend de ces deux paramètres puisque la quantité de matière usinée dépend du taux de chute total.

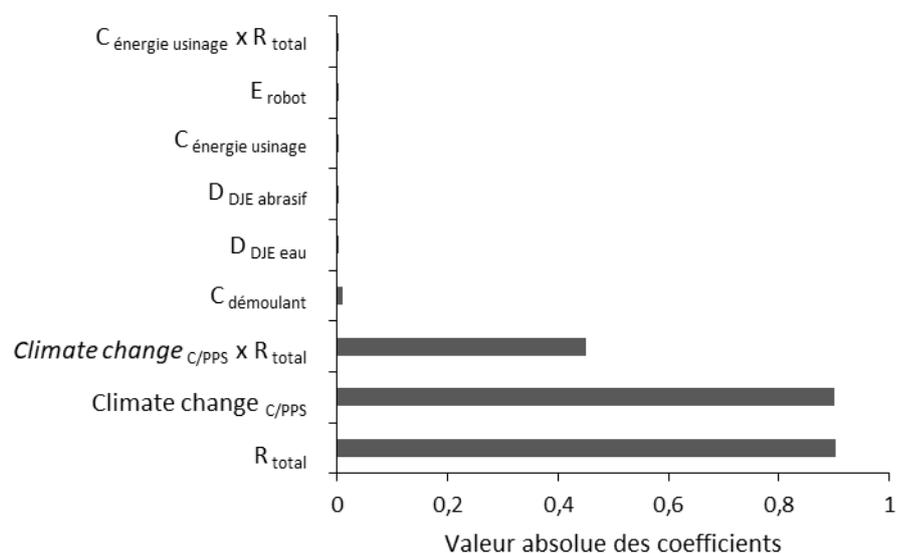


Figure 74 : Résultats de l'analyse de sensibilité de l'impact environnemental *Climate change* du procédé de thermoformage-estampage aux incertitudes des données d'inventaire non mesurées.

### 5.3.3.3. Bilan (étape I.1.3)

L'approche PEDIGREE a permis de quantifier l'incertitude sur les données d'inventaire du procédé de thermoformage-estampage. L'approche par analyse de sensibilité a quant à elle évalué l'influence des incertitudes sur les résultats environnementaux avec l'indicateur *Climate change*. Ces travaux permettent alors de calculer la criticité de chaque donnée d'inventaire étudiée comme le produit de l'indicateur d'incertitude de PEDIGREE avec l'indicateur de sensibilité. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 75. L'analyse de ces résultats met alors en évidence la criticité particulièrement élevée d'une des données d'inventaire : il s'agit de la consommation de matériau modélisée par un taux de chutes  $R_{\text{total}}$ . En effet, cette donnée a été identifiée par la méthode de PEDIGREE comme celle ayant le plus haut niveau d'incertitude et l'analyse de sensibilité a montré que c'est également cette donnée qui avait le plus d'influence sur les résultats environnementaux. Par conséquent, ces travaux ont démontré la nécessité de travailler en priorité sur ce flux d'inventaire dans une perspective d'amélioration des données d'inventaire pour des études environnementales.

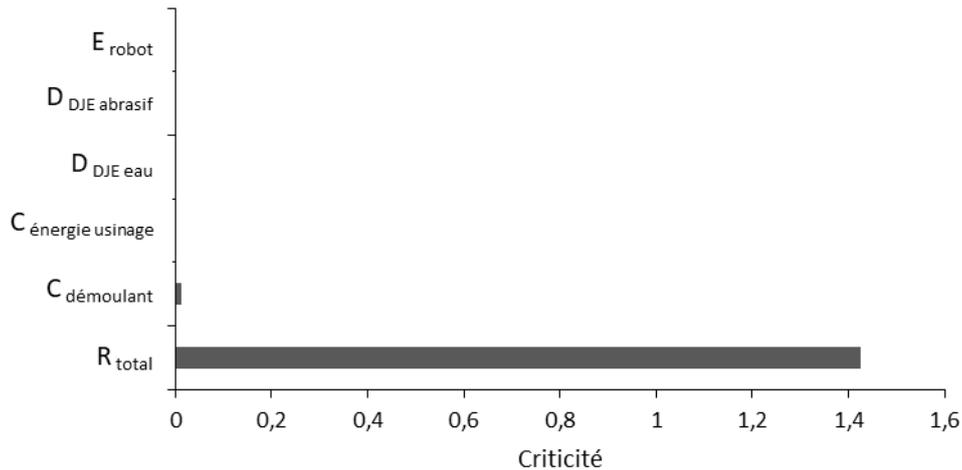


Figure 75 : Résultats de la criticité des données non mesurées pour l'analyse environnementale avec l'indicateur Climate change.

### 5.3.4. Analyse économique

#### 5.3.4.1. Identification des postes de coût majeurs (étape II.2)

L'évaluation du coût du scénario de production choisi comme référence a été réalisée en utilisant les données d'inventaire calculées à l'aide des modèles développés dans le chapitre 4 (Tableau 25) ainsi que les facteurs de coût collectés précédemment (Tableau 23). Le résultat de cette évaluation est présenté sur la Figure 76.

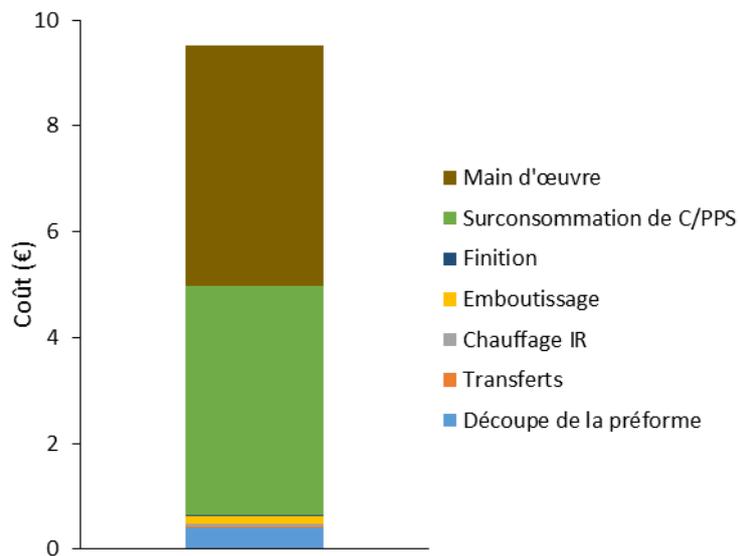


Figure 76 : Résultats de l'évaluation économique du scénario de production de référence.

Les résultats obtenus montrent que les deux postes de coût principaux sont **la surconsommation de matériau C/PPS et la main d'œuvre**, représentant respectivement 46 % et 48 % du coût total. Afin d'étudier l'influence du choix des paramètres du procédé sur les postes de coût majeurs, une analyse de sensibilité est réalisée autour du scénario de production de référence. Les valeurs des paramètres utilisées dans ces travaux sont semblables à celles précédemment utilisées pour étudier l'influence des paramètres du procédé sur les résultats environnementaux. Ces valeurs sont détaillées dans le Tableau

29. Pour chacune des configurations de paramètres, le coût du procédé a ainsi été calculé et les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 77. Les résultats de cette analyse de sensibilité ne montrent pas de variation des postes de coût majeurs du procédé en fonction des réglages des paramètres du thermoformage-estampage. Cela consolide par conséquent l'identification de la main d'œuvre et de la surconsommation de C/PPS comme postes de coût majeurs.

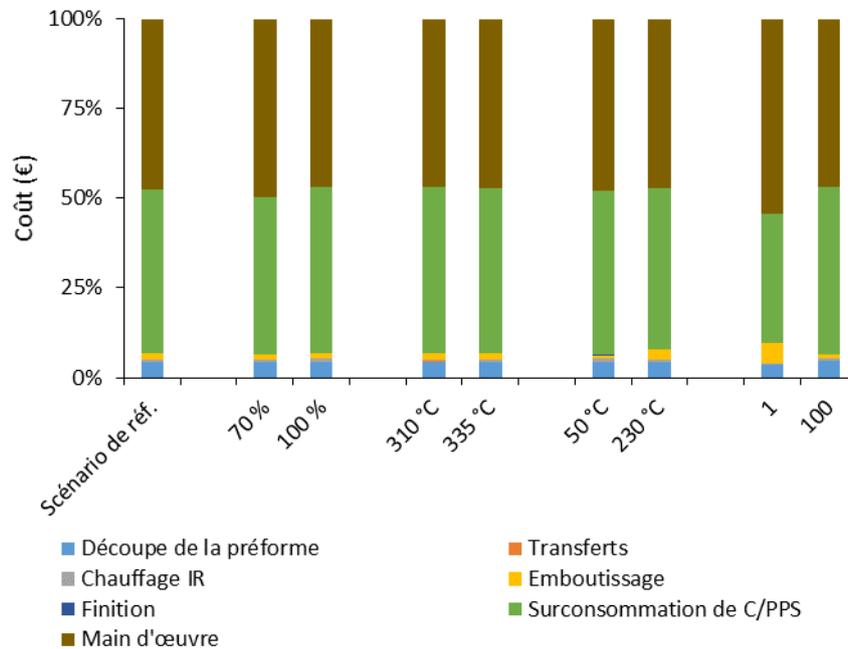


Figure 77 : Résultats de l'analyse de sensibilité des postes de coût majeurs aux paramètres du procédé de thermoformage-estampage de C/PPS.

#### 5.3.4.2. Influence des paramètres procédés sur le coût du procédé (étape II.3)

Afin d'identifier les paramètres du procédé les plus influents sur le coût de mise en œuvre du procédé de thermoformage-estampage, une analyse de sensibilité a été réalisée. Pour cela, le plan d'expérience précédemment utilisé pour l'étude de l'influence des paramètres du procédé sur l'impact environnemental est repris. Les valeurs des paramètres testés ont été présentées dans le Tableau 30. Après avoir calculé les coûts associés à chaque scénario de production défini par ce plan d'expérience, une analyse statistique des résultats obtenus a permis d'aboutir à une modélisation du coût dont les coefficients sont présentés sur la Figure 78.

En utilisant ces coefficients comme indicateurs de l'influence des paramètres, les résultats de ces travaux montrent que c'est le nombre de pièces produites dans une série, suivi de la température du moule, qui ont le plus d'influence sur le coût du procédé de thermoformage-estampage. Ce résultat est directement lié au coût énergétique du chauffage du moule. Les paramètres de réglage de puissance et de température du four ont ensuite une influence importante, ce qui s'explique par le fait que la consommation du four mais également la durée d'un cycle de production (vitesse de chauffage) dépende de ces paramètres. L'augmentation du nombre de pièces produites par série et la diminution de la température du moule sont des moyens de jouer sur les leviers principaux qui pilotent le coût du procédé. Par conséquent, les résultats de l'analyse économique identifient les mêmes leviers d'action prioritaires que ceux de l'analyse environnementale, ce qui facilite le choix des actions à mener.

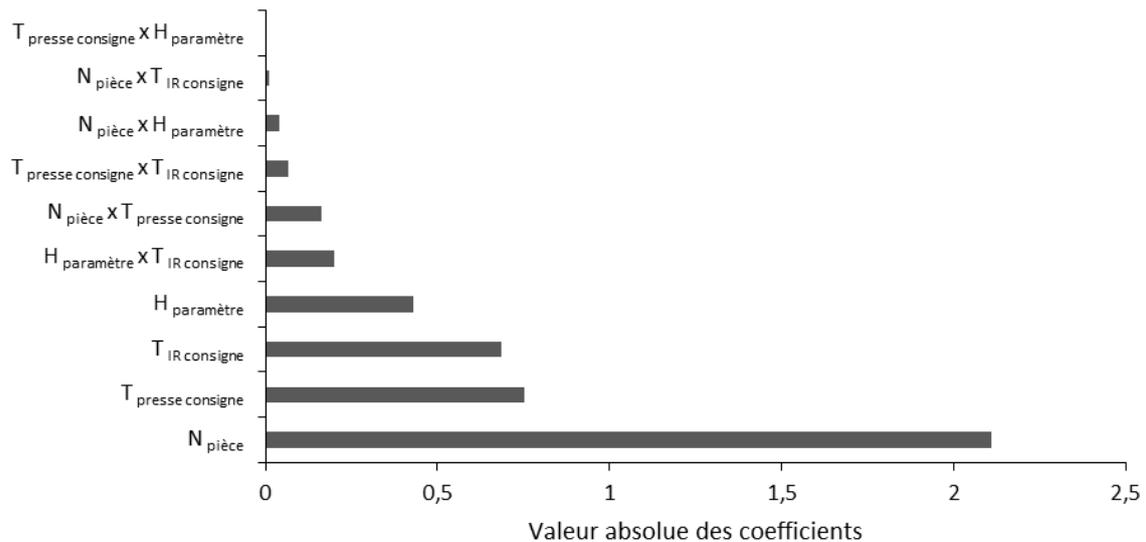


Figure 78 : Résultats de l'analyse de sensibilité du coût aux paramètres du procédé de thermoformage-estampage.

La coïncidence des résultats d'analyses économique et environnementale de procédés composites n'est cependant pas systématique, comme l'ont montré certains travaux de la littérature analysés dans le chapitre 2 [43], [51]. Avec l'approche proposée dans nos travaux, des divergences entre les résultats environnementaux et économiques peuvent résulter du fait que le modèle économique prend en compte la durée des cycles de production au travers des coûts de main d'œuvre. Il en découle que certains paramètres peuvent être très influents d'un point de vue économique car ils agissent fortement sur les durées de production alors qu'ils jouent peu sur les valeurs des flux d'inventaire à partir desquelles sont exclusivement calculés les impacts environnementaux. C'est par exemple le cas des paramètres de température de consigne et de puissance de chauffage du four IR, comme le montrent les résultats présentés sur la Figure 72 et la Figure 78. Il en découle également, pour certains paramètres, la possible compétition entre la réduction des flux d'inventaire et l'allongement des durées de production qui peut entraîner une différence de monotonie des modèles environnementaux et économiques en fonction de ces paramètres. Cette situation apparaît dans le cas où le coût d'allongement des durées de production dépasse les économies relatives à la diminution des flux d'inventaire. Cependant, l'augmentation importante des coûts de l'énergie et des matières premières que nous observons actuellement nous emmène à penser que cette divergence des résultats environnementaux et économiques risque d'apparaître de moins en moins.

#### 5.3.4.3. Prise en compte des incertitudes (étape II.1)

Comme pour l'analyse environnementale, l'utilisation de données d'inventaire non mesurées entraîne des incertitudes dont il est nécessaire d'évaluer l'influence sur les résultats économiques. Pour cela, une analyse de sensibilité a été appliquée en s'appuyant sur un plan d'expérience similaire à celui développé précédemment, en excluant cependant le travail sur la donnée d'impact environnemental du système secondaire associé à la production de C/PPS (*Climate change* C/PPS). Les valeurs des données d'inventaire utilisées sont présentées dans le Tableau 32. Pour chacune des configurations définies dans ce plan d'expérience, le coût du procédé est calculé. L'analyse des résultats obtenus a ensuite permis d'établir une modélisation dont les coefficients sont représentés sur la Figure 79.

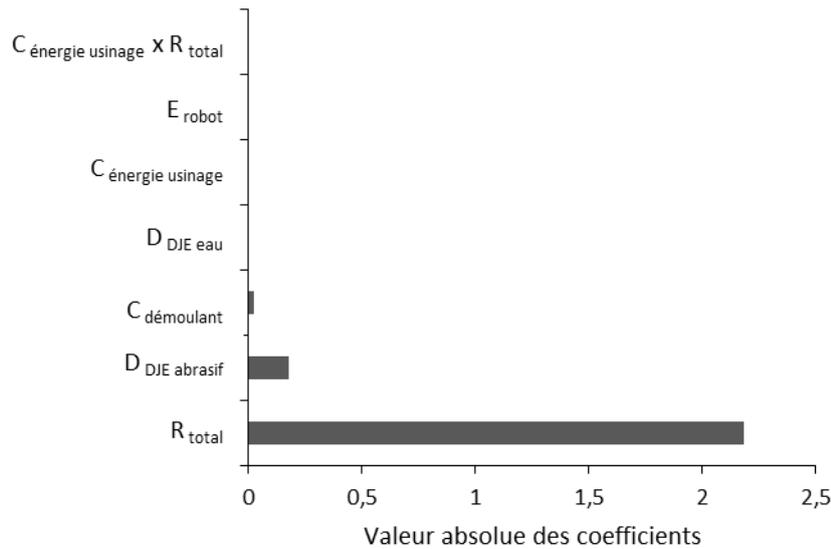


Figure 79 : Résultats de l'analyse de sensibilité du coût du procédé de thermoformage-estampage aux incertitudes des données d'inventaire non mesurées.

Ces résultats montrent que ce sont les variations de la donnée permettant d'évaluer la quantité de matériau surconsommée qui influencent le plus les résultats de coût du procédé. Ces résultats couplés à ceux de l'analyse de PEDIGREE précédemment présentés permettent de calculer un indicateur de la criticité des données d'inventaire non mesurées par rapport aux travaux d'analyse économique. Ces indicateurs, présentés sur la Figure 80, montrent que la modélisation des consommations de matériau est la donnée la plus critique. Il semble donc nécessaire de travailler en priorité sur ce flux d'inventaire dans une perspective d'amélioration des données d'inventaire pour des études économiques.

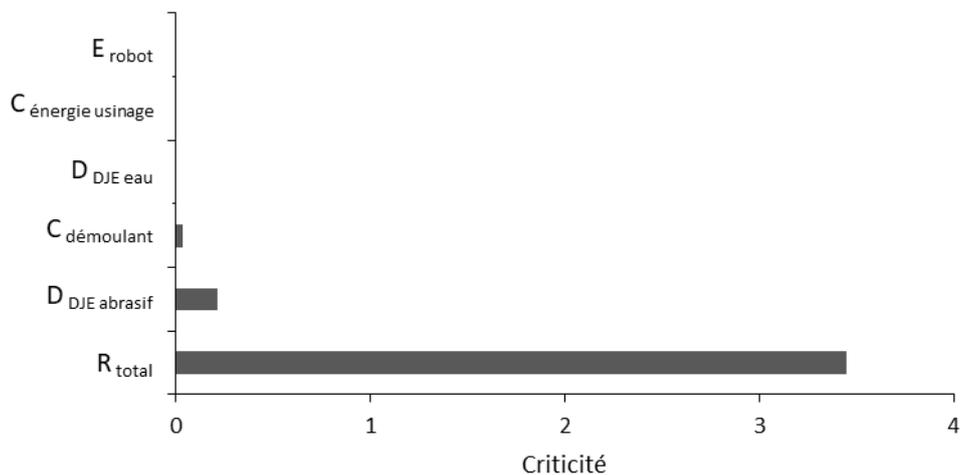


Figure 80 : Résultats de la criticité des données non mesurées pour l'analyse économique.

### 5.3.5. Bilan des résultats des analyses environnementales et économiques

Dans cette partie, une analyse environnementale et une analyse économique du procédé de thermoformage-estampage de C/PPS sont proposées de façon distincte. Un bilan de ces travaux, établi dans le Tableau 33, montre qu'il existe des similitudes entre les conclusions des deux analyses. On constate par exemple que la surconsommation de matériau C/PPS est le flux d'inventaire qui est responsable des impacts environnementaux les plus grands mais aussi du deuxième poste de coût. Ce

sont d'ailleurs les données de consommations de matière C/PPS qui ont été identifiées comme prioritaires pour améliorer l'analyse d'inventaire en vue d'applications pour des analyses environnementale et économique. Par ailleurs, ces travaux ont permis d'identifier les paramètres qui ont le plus d'influence sur l'impact environnemental et le coût du procédé. Les résultats obtenus montrent là encore une convergence des analyses environnementale et économique puisque les paramètres de quantité de pièces produites durant un cycle de production et de température de moule ont été identifiés dans les deux cas comme les plus influents. Par conséquent, il semble qu'une première piste pour réduire l'impact environnemental et le coût du procédé de thermoformage-estampage de C/PPS consiste à augmenter le nombre de pièces produites dans une série de façon à mieux amortir la phase de montée en température du système. Par ailleurs, une autre piste de réduction du coût et de l'impact environnemental du procédé consiste en la diminution de la température du moule dans la presse. Cependant, cette modification peut avoir une influence sur les performances techniques des pièces fabriquées et nécessite donc de prendre des précautions par rapport aux exigences techniques des pièces produites avant d'être appliquée.

Tableau 33 : Bilan de l'analyse environnementale et de l'analyse économique du procédé de thermoformage-estampage.

	Analyse environnementale	Analyse économique
<b>Principaux postes d'impact</b>	1-Surconsommation de matériau C/PPS 2-Energie électrique consommée lors des étapes de chauffage et d'emboutissage	1-Main d'œuvre 2-Surconsommation de matériau C/PPS
<b>Paramètres du procédé les plus influents</b>	1-N pièce 2-T <sub>presse consigne</sub>	1-N pièce 2-T <sub>presse consigne</sub> 3-T <sub>IR consigne</sub> 4-H <sub>paramètre</sub>
<b>Principale cause d'incertitudes</b>	R <sub>total</sub>	R <sub>total</sub>

## 5.4. Conclusion

Dans ce chapitre, une méthodologie d'exploitation des données d'inventaire des procédés de fabrication de pièces en composites est développée. Cette méthodologie permet d'abord de traduire les modèles d'inventaire en un modèle environnemental ainsi qu'en un modèle de coût, tous deux exprimés en fonction des paramètres du procédé. L'exploitation de ces modèles a ensuite été détaillée avec trois principaux axes de travail : l'identification des postes d'impact les plus importants, l'identification de paramètres du procédé les plus influents et la gestion des incertitudes des modélisations. Dans un premier temps, une stratégie permettant d'identifier les principaux postes d'impacts environnementaux et de coût du procédé a été expliquée. Par rapport à l'objectif de réduction de l'impact environnemental des procédés composites, l'identification de ces postes majeurs d'impact permet de cibler les potentielles actions à mener là où le potentiel de réduction est estimé maximal. **L'application au cas du thermoformage-estampage de C/PPS a par exemple permis d'identifier les consommations de matières et les consommations d'énergie électrique du four et de la presse comme des aspects à travailler en priorité pour diminuer l'impact environnemental du procédé.** Une stratégie d'isolation thermique du procédé pourrait par exemple être une solution pour réduire les consommations énergétiques des étapes de chauffage et d'emboutissage. Cependant, cette stratégie se base sur une hypothèse qui doit être vérifiée : les postes d'impacts environnementaux les plus importants sont ceux qui présentent le plus grand potentiel d'amélioration. A ce titre-là, une modélisation thermique du procédé de thermoformage-estampage est développée dans le chapitre 6 afin de préciser les données de consommation d'énergie du procédé en calculant leur potentiel de réduction. Par rapport à l'objectif de diminution de l'impact environnemental et de maîtrise du coût des procédés, une autre stratégie développée consiste à identifier les paramètres qui ont le plus d'influence sur ces indicateurs. Ces paramètres sont considérés dans nos travaux comme les leviers prioritaires à actionner pour réduire l'impact environnemental et le coût du procédé. Pour le procédé de thermoformage-estampage, la taille des séries de production ainsi que la température du moule dans la presse sont par exemple les leviers principaux qui ont été identifiés pour réduire l'impact environnemental mais également le coût du procédé. Enfin, une stratégie de gestion des incertitudes liées à l'utilisation de données non mesurées a été proposée dans ce chapitre. Grâce à l'évaluation d'un indicateur de criticité des données d'inventaire, la méthode proposée permet d'identifier les données sur lesquelles travailler en priorité de manière à réduire les impacts environnementaux et les coûts. L'application de cette approche au procédé de thermoformage-estampage de C/PPS a ainsi permis d'identifier un besoin de précision de la donnée de consommation de matériau C/PPS. Pour répondre à cet enjeu, un travail de quantification de la consommation de matériau C/PPS durant un processus de formage a été entrepris durant cette thèse et est présenté dans le chapitre 6.

## Chapitre 6

# Modélisation physique du procédé de thermoformage-estampage pour le calcul de données d'inventaire complémentaires

---

6.1.	Introduction .....	134
6.2.	Modélisation thermique pour l'identification de données de consommation d'énergie ...	134
6.2.1.	Objectif de la modélisation thermique du procédé .....	134
6.2.2.	Description du système modélisé.....	134
6.2.3.	Modèle proposé.....	136
6.2.4.	Caractérisation des propriétés thermiques du matériau C/PPS.....	141
6.2.5.	Validation expérimentale du modèle thermique .....	144
6.2.6.	Exploitation du modèle thermique pour la quantification du potentiel de diminution de la consommation d'énergie .....	148
6.3.	Modélisation du formage pour le calcul de taux de chute .....	151
6.3.1.	Objectif de la modélisation de la consommation de matériau .....	151
6.3.2.	Description de la méthode de formage cinématique.....	151
6.3.3.	Application au calcul de surconsommations de matière.....	155
6.4.	Conclusion.....	159

---

## 6.1. Introduction

Dans le chapitre 4, l'analyse d'inventaire proposée s'appuie sur la collecte de données par des méthodes expérimentales ou sur l'utilisation de données existantes dans la littérature et les bases de données. Afin de poursuivre le travail d'inventaire sur ces flux, une approche complémentaire de celle déployée dans le chapitre 4 est proposée dans ce chapitre. Elle s'appuie sur la modélisation des phénomènes physiques qui interviennent durant la mise en forme des composites qui sont habituellement destinées, dans l'industrie, à la gestion des aspects techniques des procédés comme par exemple l'évaluation des propriétés mécaniques des pièces produites. Dans ce chapitre, l'évaluation par des méthodes de modélisation physique des consommations de matériau composite et d'énergie du procédé de thermoformage-estampage est donc proposée afin d'améliorer le niveau d'information disponible. Ce chapitre se divise en deux parties relatives à deux modélisations distinctes. Tout d'abord, une modélisation des phénomènes thermiques entrant en jeu durant la mise en forme de C/PPS par thermoformage-estampage est développée. Cette modélisation vise à compléter les informations de consommation d'énergie collectées par les mesures électriques afin d'identifier le potentiel maximal de diminution des consommations d'énergie liées à la transformation du matériau. Dans une autre partie de ce chapitre, une méthode de modélisation du formage d'un flan composite sur une surface en trois dimensions est présentée. Pour une géométrie de pièce donnée, la démarche proposée permet le calcul des consommations et surconsommations de matériaux lors du procédé de thermoformage-estampage. Elle précise ainsi le modèle précédemment basé sur des données de la littérature et qui a été identifié comme la donnée d'inventaire à améliorer en priorité dans le chapitre 5.

## 6.2. Modélisation thermique pour l'identification de données de consommation d'énergie

### 6.2.1. Objectif de la modélisation thermique du procédé

Les consommations d'énergie modélisées ici sont décomposées en deux catégories : l'énergie utilisée pour la transformation du matériau, appelée énergie utile, et l'énergie qui ne crée pas de valeur ajoutée, appelée énergie perdue. Cette dernière est par exemple dissipée dans le chauffage du bâti des machines ou encore par le maintien en température du moule de la presse hors des phases de mise en forme de pièces.

L'énergie utile pour la transformation du procédé est calculée grâce au modèle développé dans ce chapitre. Elle est considérée comme le minimum d'énergie nécessaire à la transformation du matériau. En comparant cette valeur avec les consommations d'énergie électrique réelles du procédé qui ont été mesurées expérimentalement, la valeur de l'énergie perdue par le procédé peut ensuite être évaluée. Cette valeur est considérée comme le potentiel de diminution de la consommation d'énergie du système. Ce résultat met alors en perspective les conclusions du chapitre 5 qui considèrent la consommation d'énergie lors des étapes de chauffage et d'emboutissage comme une des priorités sur lesquelles travailler pour diminuer l'impact environnemental du procédé en tant que flux d'inventaire responsable des seconds impacts environnementaux les plus importants. En effet cette conclusion est basée sur l'hypothèse que les flux d'inventaire responsables d'impacts environnementaux majeurs ont un potentiel d'amélioration important. Par conséquent, l'évaluation du potentiel de diminution de la consommation d'énergie du procédé permet de statuer sur cette hypothèse.

### 6.2.2. Description du système modélisé

Dans ces travaux, la modélisation thermique du procédé de thermoformage-estampage se concentre sur les étapes de chauffage, de transfert et d'emboutissage en considérant des transferts thermiques

par conduction, convection et rayonnement. Un bilan du système étudié et des transferts thermiques pris en compte est représenté sur la Figure 81.

Pour la phase de chauffage infrarouge, la préforme est chauffée par rayonnement. Durant cette phase, on considère que la préforme est posée sur un grillage métallique. En raison de la faible surface de contact entre la pièce et son support, les phénomènes de conduction thermique sont négligés. Seules des pertes thermiques par convection et rayonnement sont considérées.

Pour l'étape de transfert, on considère l'utilisation d'un bras robot avec un système de préhension à aiguille. Là encore, les phénomènes de conduction sont négligés en raison de la faible surface de contact entre la pièce et son support. Seules des pertes thermiques par convection et rayonnement sont prises en compte.

Enfin, l'étape d'emboutissage peut être divisée en deux régimes de fonctionnement. Un premier régime correspond à la phase d'attente, moule ouvert durant laquelle des pertes thermiques par convection et rayonnement sont considérées. Un second régime de fonctionnement correspond à la mise en forme et au refroidissement de la pièce lors de l'emboutissage. Durant cette phase, seuls des phénomènes de conduction sont considérés.

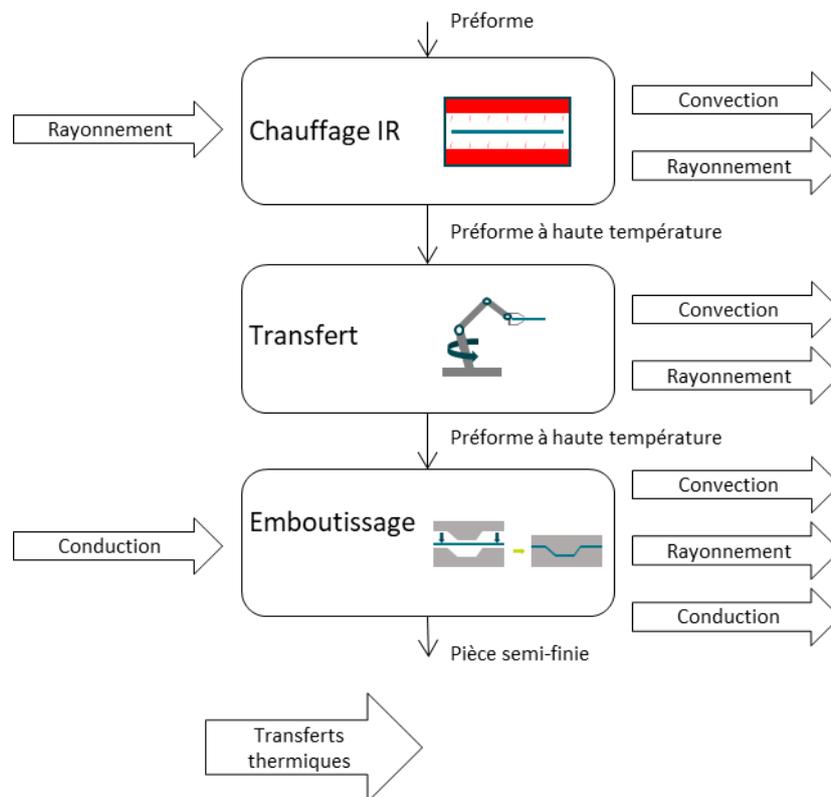


Figure 81 : Description du procédé de thermoformage-estampage et des transferts thermiques mis en jeux et modélisés.

Dans ces travaux, une pièce de géométrie simple est étudiée : une plaque de composite C/PPS de longueur  $L_{pièce}$ , de largeur  $l_{pièce}$  et d'épaisseur  $e_{pièce}$ . Le moule associé à la production de cette pièce est composé de deux demi-moules identiques en forme de pavé de largeur  $l_{moule}$ , de longueur  $L_{moule}$  et d'épaisseur  $e_{moule}$ . Dans ces travaux, une épaisseur de 75 mm est considérée pour inclure le système composé des plateaux chauffants de la presse au système moule étudié. Une représentation de ces systèmes est proposée sur la Figure 82.

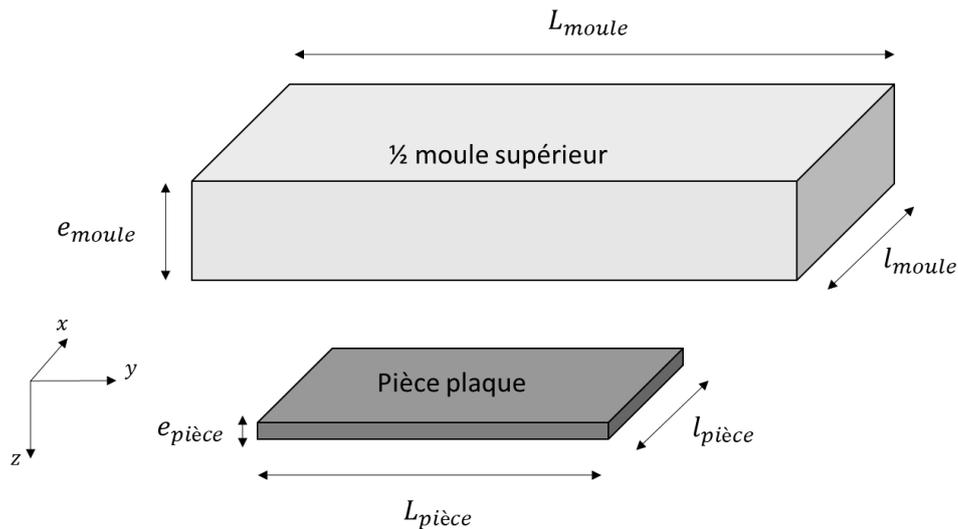


Figure 82 : Représentation de la géométrie de la pièce et du moule dont le comportement thermique est modélisé.

### 6.2.3. Modèle proposé

#### 6.2.3.1. Equation de la chaleur

L'évolution de la température de deux systèmes différents est étudiée : la pièce fabriquée et le moule de la presse. Pour la pièce, on considère que les dimensions de longueur et de largeur sont très grandes devant l'épaisseur et par conséquent on négligera les effets de bord (transferts unidirectionnels). Concernant le moule, on estimera que ses bords sont parfaitement isolés. L'évolution de la température dans l'épaisseur de la pièce composite et du moule de la presse est alors calculée en utilisant l'équation de la chaleur réduite à une seule dimension d'espace :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

Avec :

$T(z, t)$  : La température du matériau à la coordonnée  $z$  et au temps  $t$  ;

$\lambda$  : La conductivité thermique du matériau ;

$\rho$  : La masse volumique du matériau ;

$C_p$  : La capacité thermique massique du matériau.

Notons ici que nous considérons nos trois paramètres thermophysiques comme constants et que nous négligeons la source de chaleur liée à la fusion / solidification du PPS.

La résolution de cette équation est réalisée par différences finies avec une discrétisation spatiale  $z_i$  et temporelle  $t_j$ , dont un exemple est présenté sur la Figure 83 pour l'étude de la pièce. La résolution de cette équation est réalisée selon un schéma explicite :

$$T(z_i, t_{j+1}) = T(z_i, t_j) + \frac{\lambda \Delta t}{\rho C_p \Delta z^2} (T(z_{i+1}, t_j) - 2 \times T(z_i, t_j) + T(z_{i-1}, t_j))$$

Avec :

$\Delta t$  : Le pas de discrétisation du temps ;

$\Delta z$  : Le pas de discrétisation de l'espace dans la direction  $z$ .

Précisons ici que les pas de temps et d'espace sont choisis pour que le nombre de Fourier numérique reste inférieur à  $\frac{1}{2}$  de sorte que la convergence du schéma explicite soit assurée.

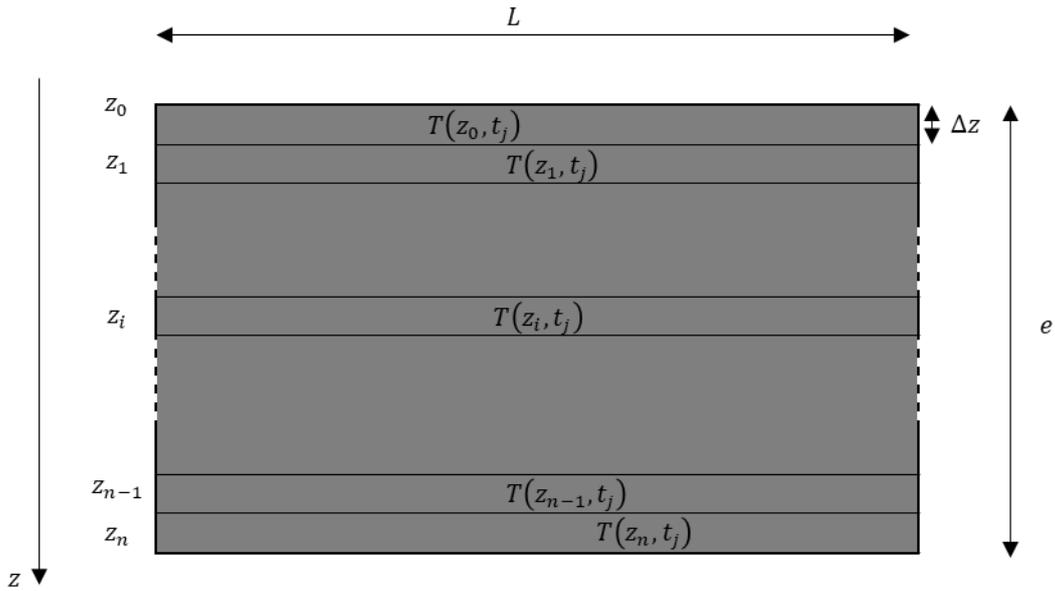


Figure 83 : Discrétisation spatiale à un instant  $t_j$  utilisée pour la résolution par différences finies de l'équation de la chaleur.

Durant les phases de chauffage infrarouge et d'emboutissage, le matériau C/PPS change de phase : il fond puis se solidifie. Ces changements de phases sont négligés dans le modèle proposé, énergétiquement et sur leur influence sur les propriétés du C/PPS.

#### 6.2.3.2. Conditions aux limites du modèle thermique

Pour résoudre l'équation de la chaleur lors des différentes phases du procédé de thermoformage-estampage, il est nécessaire de déterminer les conditions aux limites du système étudié. Ces conditions aux limites sont souvent déterminées par l'équilibre des transferts thermiques qui s'y opèrent par des mécanismes de conduction, convection et/ou de rayonnement.

Dans nos travaux, les phénomènes de convection sont modélisés par une densité de flux thermique  $\varphi_{convection}$  exprimée en fonction d'un coefficient d'échange  $h_{convection}$  et des températures du système  $T$  et de l'environnement extérieur  $T_\infty$  :

$$\varphi_{convection} = h_{convection}(T - T_\infty)$$

Le coefficient  $h_{convection}$  est calculé à partir de l'évaluation du nombre de Nusselt [97]. Ce nombre adimensionnel est obtenu grâce à son expression sous la forme d'une fonction d'autres nombres adimensionnels, généralement déterminée expérimentalement. Dans le cas de la convection naturelle, comme lors de l'étape de chauffage infrarouge de la préforme ou lors du maintien en température du moule entre les phases d'emboutissage, le nombre de Nusselt est obtenu à l'aide d'une corrélation avec le nombre de Prandtl et le nombre de Grashof. Dans le cas de la convection forcée lors de la phase de déplacement pendant le transfert, le nombre de Nusselt est calculé à partir du nombre de Prandtl et du nombre de Reynolds.

Afin de modéliser le phénomène de rayonnement thermique entre notre matériau et l'environnement que nous avons considéré comme un corps noir, la densité de flux thermique  $\varphi_{rayonnement}$  s'exprime usuellement en fonction de l'émissivité du matériau  $\varepsilon$ , du coefficient de Stefan-Boltzmann  $\sigma$  et des températures du système  $T$  et de l'environnement extérieur  $T_\infty$  :

$$\varphi_{rayonnement} = \varepsilon\sigma(T^4 - T_\infty^4)$$

Dans nos travaux de thèse, cette expression a été développée pour faire émerger une forme similaire à l'expression de la densité de flux thermique  $\varphi_{convection}$ . Cela permet ainsi de faire apparaître un coefficient d'échange par rayonnement  $h_{rayonnement}$  :

$$\varphi_{rayonnement} = \varepsilon\sigma(T^2 + T_{\infty}^2)(T + T_{\infty})(T - T_{\infty}) = h_{rayonnement}(T - T_{\infty})$$

Avec :

$$h_{rayonnement} = \varepsilon\sigma(T^2 + T_{\infty}^2)(T + T_{\infty})$$

Ce coefficient d'échange est alors calculé à chaque pas de temps  $t_j$  lors de la résolution par différence finies comme :

$$\text{pour } i \in \{0, n\} \text{ et } \forall j, \quad h_{rayonnement}(z_i, t_j) = \varepsilon\sigma(T(z_i, t_{j-1})^2 + T_{\infty}^2)(T(z_i, t_{j-1}) + T_{\infty})$$

Dans nos travaux, les transferts thermiques par rayonnement et convection sont rassemblés dans une unique expression de densité de flux thermique  $\varphi_{convection+rayonnement}$  en utilisant un coefficient d'échange global  $h_{total}$  :

$$\varphi_{convection+rayonnement} = h_{total}(T - T_{\infty})$$

Avec :

$$h_{total} = h_{convection} + h_{rayonnement}$$

Dans ces travaux de thèse, les phénomènes de conduction au sein d'un même matériau sont modélisés par la loi de Fourier qui utilise le coefficient de conductivité thermique  $\lambda$  du matériau étudié. Dans le cas de la conduction dans une seule direction étudiée dans ces travaux, la densité de flux thermique  $j_{th}$  s'exprime :

$$J_{th} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z}$$

Dans le cas de la conduction à l'interface entre deux matériaux différents, le flux thermique  $\varphi_{conduction\ moule}$  échangé est alors exprimé par l'intermédiaire d'une résistance thermique de contact, notée  $RTC$ . Au niveau du contact entre le moule et la pièce,  $\varphi_{conduction\ moule}$  s'exprime :

$$\forall j, \quad \varphi_{conduction\ moule} = \frac{T(z_0, t_j) - T_{moule\ surface}}{RTC}$$

#### 6.2.3.3. Chauffage infrarouge

Pour résoudre l'équation de la chaleur lors de la phase de chauffage infrarouge de la préforme, une condition initiale et une condition aux limites sont fixées. La condition initiale consiste à imposer une température initiale homogène dans la préforme au début du chauffage, notée  $T_0$  :

$$\forall i, \quad T_{pièce}(z_i, t = 0) = T_0$$

La condition aux limites consiste à considérer l'équilibre des transferts thermiques à la surface de la préforme. Pour la surface supérieure de la préforme, cette condition aux limites de continuité du flux de chaleur est schématisée sur la Figure 84 et s'écrit :

$$\varepsilon \cdot \overrightarrow{\varphi_{IR}} + \overrightarrow{\varphi_{convection+rayonnement}} + \overrightarrow{J_{th}} = \vec{0}$$

Dans cette équation,  $\varepsilon$  représente l'émissivité du matériau et  $\varphi_{IR}$  correspond au flux de chauffage émis par le four infrarouge. Dans le modèle développé, la valeur de ce flux est asservie par une

régulation PID en fonction de la température en surface du matériau calculée par le modèle pour reproduire le fonctionnement du four qui est asservi grâce aux mesures de températures réalisées par des pyromètres. La valeur maximale du flux émis est fixée à 33,3 kW/m<sup>2</sup> pour correspondre à la puissance des panneaux radiants installés sur le four du laboratoire (48 kW au total sur deux surfaces de 800 mm x 900 mm). Les autres réglages de cet asservissement sont des paramètres libres de la modélisation proposée. Avec cette modélisation, l'énergie consommée par le four infrarouge est calculée à partir du flux de chauffage  $\varphi_{IR}$ .

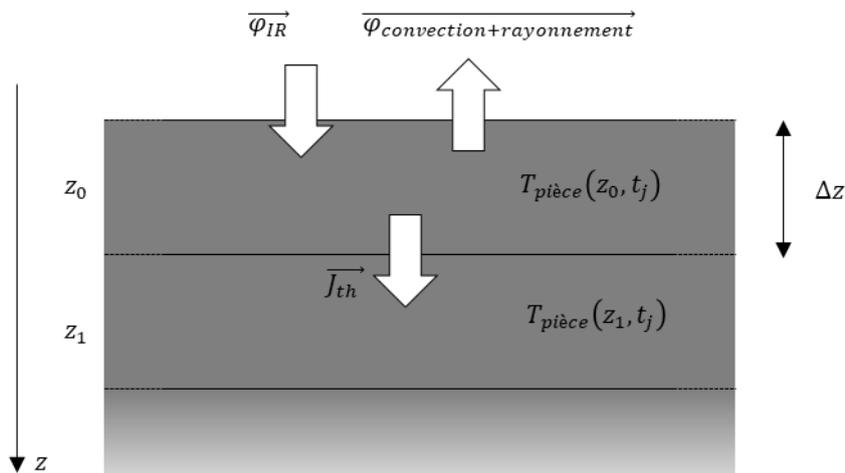


Figure 84 : Condition d'équilibre des flux thermiques sur la surface supérieure de la préforme lors de l'étape de chauffage infrarouge.

#### 6.2.3.4. Transfert

Pour résoudre l'équation de la chaleur et calculer l'évolution de la température de la pièce lors de la phase de transfert par bras robotisé, le champ de température calculé avec le modèle de chauffage infrarouge est utilisé comme champ de température initial dans le matériau avant le transfert. Par ailleurs, une condition aux limites est obtenue en écrivant l'équilibre du système, comme présenté sur la Figure 85 :

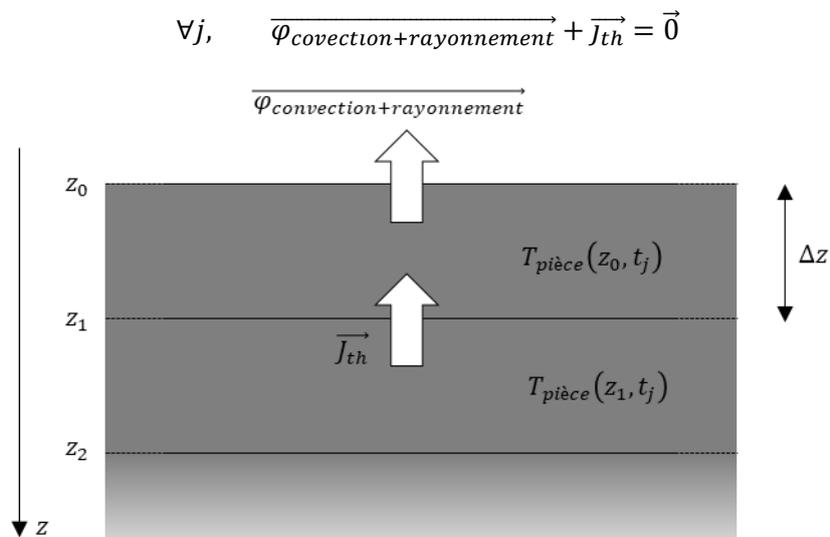


Figure 85 : Condition d'équilibre des flux thermiques sur la surface supérieure de la préforme lors de l'étape de transfert.

### 6.2.3.5. Emboutissage

Pour modéliser la température de la pièce lors de la phase d'emboutissage, on néglige ici la phase de fermeture du moule car elle est rapide par rapport aux phases d'attente et de refroidissement de la pièce. On considèrera également la température à la surface du moule  $T_{surface\ moule}$  constante. Une condition initiale et une condition aux limites sont alors utilisées pour résoudre l'équation de la chaleur. La condition initiale consiste à utiliser le champ de température calculé à la fin du transfert comme champ de température initial dans la pièce au début de l'étape d'emboutissage. La condition aux limites consiste à écrire l'équilibre du système, comme représenté sur la Figure 86 :

$$\forall j, \quad \overrightarrow{\varphi_{conduction\ moule}} + \overrightarrow{J_{th}} = \vec{0}$$

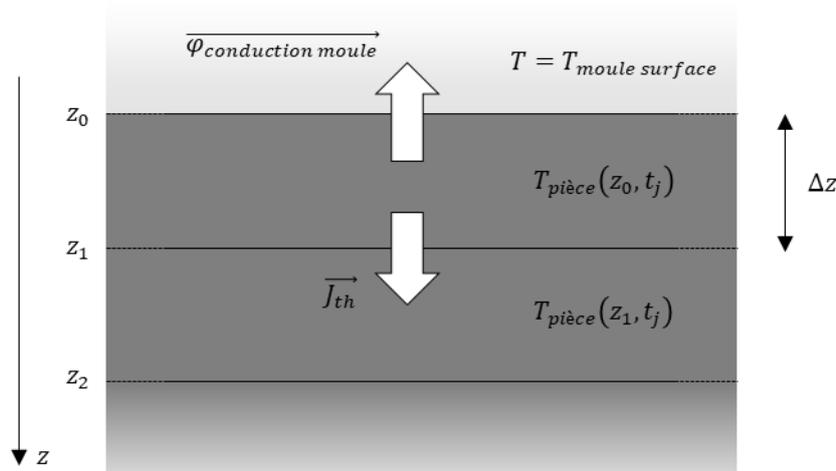


Figure 86 : Condition d'équilibre des flux thermiques à l'interface moule-pièce lors de l'étape d'emboutissage.

### 6.2.3.6. Chauffage du moule

Dans ces travaux, l'évolution de la température du moule durant le procédé de thermoformage-estampage est calculé à partir de l'équation de la chaleur en une dimension, résolue par différences finies avec la même équation que pour le calcul de la température dans la pièce. On s'intéresse en particulier aux phases d'attente moule ouvert entre les phases d'emboutissage pendant laquelle de l'énergie est consommée pour maintenir la température du moule en compensant les pertes thermiques par convection et rayonnement.

Afin de calculer la température dans le moule, deux conditions aux limites relatives à l'équilibre du système (Figure 87) sont utilisées :

$$\forall j, \quad \overrightarrow{\varphi_{chauffage\ moule}} + \overrightarrow{J_{th}} = 0$$

$$\forall j, \quad \overrightarrow{\varphi_{convection+rayonnement\ moule}} + \overrightarrow{J_{th}} = 0$$

Dans le modèle proposé, le flux de chauffage du moule  $\varphi_{chauffage\ moule}$  est régulé par un asservissement PID en fonction de la température en surface du moule pour représenter le comportement du sous-système de régulation thermique de la presse. On considèrera une puissance de chauffage maximale de 31,9 kW/m<sup>2</sup>, calculée à partir des spécifications de la presse du laboratoire : deux plateaux chauffants d'une puissance totale de 40,8 kW et de dimensions 800 mm x 800 mm. Comme pour le four infrarouge, les autres réglages de l'asservissement sont des paramètres libres du modèle. Avec le modèle proposé, l'énergie consommée par la presse est calculée à partir du flux de chauffage du moule  $\varphi_{chauffage\ moule}$ .

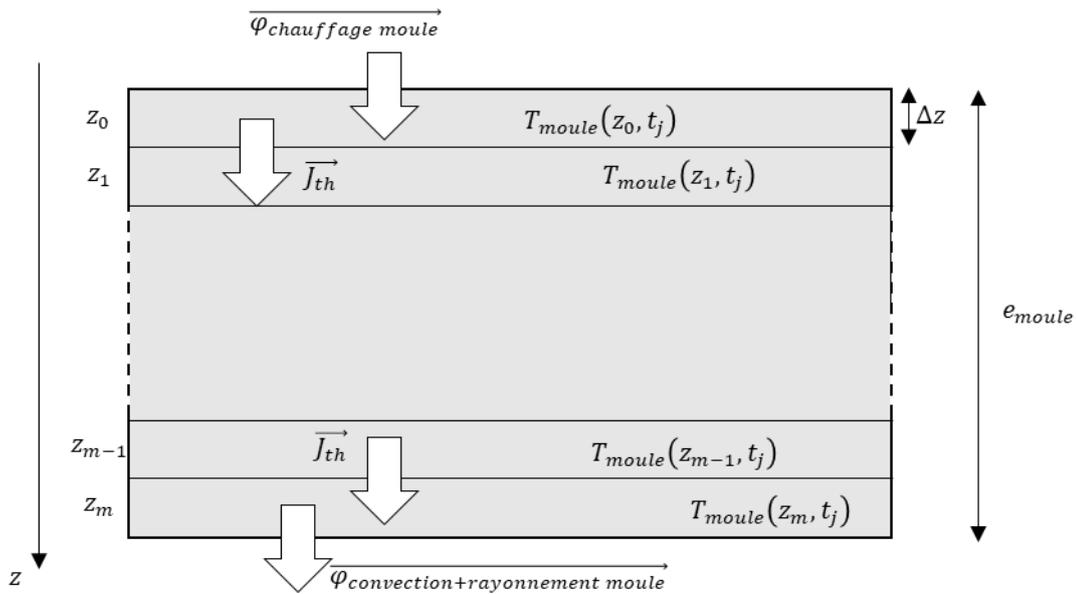


Figure 87 : Condition d'équilibre des flux thermiques du moule lors des phases de chauffage puis de maintien en température moule ouvert.

#### 6.2.4. Caractérisation des propriétés thermiques du matériau C/PPS

##### 6.2.4.1. Plaque chaude gardée

Afin d'exploiter la modélisation précédemment définie, il est nécessaire de caractériser les propriétés thermiques du matériau C/PPS utilisé. Pour évaluer la conductivité du matériau C/PPS utilisé dans ces travaux de thèse, des essais de plaque chaude gardée ont été réalisés avec le montage présenté sur la Figure 88-a. et disponible au LTeN. Ces essais ont été réalisés sur l'éprouvette présentée sur la Figure 88-b. Le principe général de cette méthode consiste à créer un flux thermique unidirectionnel en imposant un écart de température entre les deux faces de l'échantillon. Afin d'éviter les problèmes liés aux pertes thermiques, une garde est utilisée autour de l'échantillon. Une fois le régime stationnaire atteint, les mesures de flux thermique, de température et d'épaisseur de l'échantillon permettent d'évaluer la conductivité thermique du matériau.

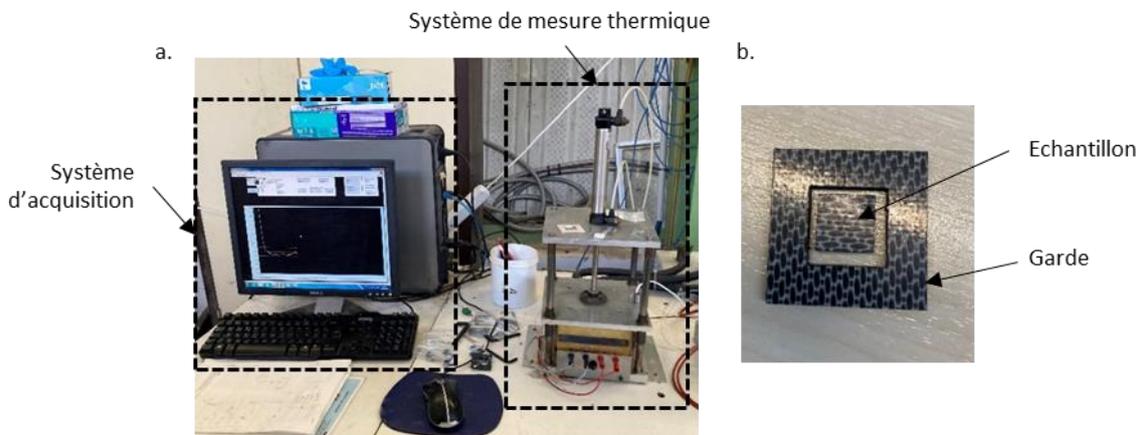


Figure 88 : a. Montage expérimental pour les essais de plaque chaude gardée ; b. Eprouvette de plaque chaude gardée.

Quatre essais ont été réalisés avec des conditions de températures différentes mais en conservant toujours un écart de 10 °C entre la température froide et la température chaude. Des températures

froides de 40 °C, 70 °C, 100 °C et 120 °C ont été utilisées. Ces températures ne couvrent cependant pas l'étendue des températures atteintes par le matériau lors du procédé de thermoformage-estampage.

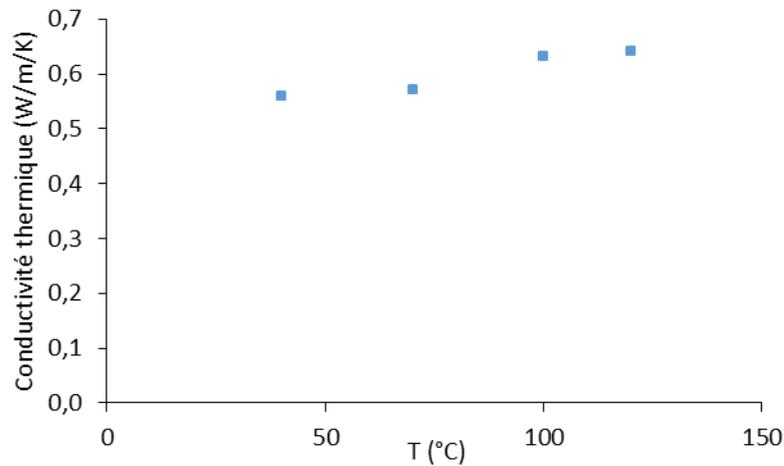


Figure 89 : Résultats des essais de plaque chaude gardée réalisés pour la caractérisation de la conductivité thermique du matériau C/PPS.

Ces résultats montrent que la valeur de la conductivité thermique du matériau varie peu en fonction de la température. On fait alors le choix d'utiliser les valeurs ainsi mesurées et de négliger l'influence de la température sur la valeur de la conductivité thermique du matériau : la valeur moyenne des relevés de conductivité thermique est utilisée.

En parallèle de ces essais, des essais de dilatométrie ont également été réalisés sur une éprouvette cubique de 4,3 mm de côté. Ces travaux ont permis de déterminer les coefficients d'expansion thermique du matériau C/PPS utilisé dans nos travaux dans la direction de son épaisseur. A partir des résultats de ces essais présentés sur la Figure 90, deux coefficients d'expansion thermique ont été calculés par interpolation linéaire, selon la valeur de la température par rapport à la température de transition vitreuse du matériau (notée  $T_g$ ).

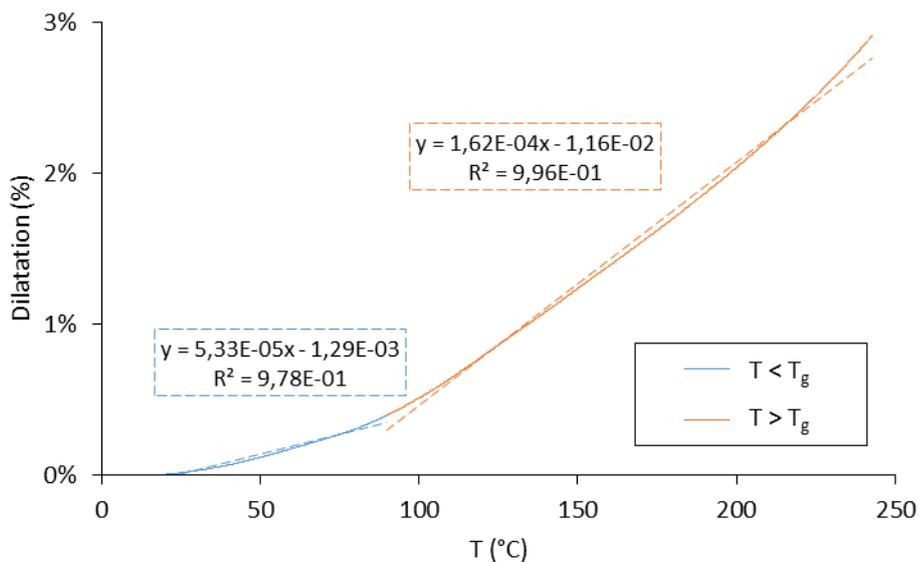


Figure 90 : Résultats des essais de dilatométrie montrant les interpolations linéaires utilisées pour déterminer les coefficients d'expansion thermique du matériau C/PPS.

Finalement, ces données ont permis d'établir une correction des valeurs de conductivité thermique précédemment mesurées par la méthode de la plaque chaude gardée. La conductivité thermique du matériau C/PPS a été évaluée à 0,61 W/m/K.

#### 6.2.4.2. Calorimétrie différentielle à balayage

Dans nos travaux, des essais de calorimétrie différentielle à balayage (DSC) avec le matériel DSC Q200 (TA) présenté sur la Figure 91-a ont également été réalisés afin de quantifier la capacité thermique ainsi que les enthalpies de fusion et de solidification du matériau C/PPS. Ces essais ont été réalisés sur deux échantillons : un échantillon de masse 8,84 mg et un de masse 11,5 mg. Pour chacun de ces échantillons, deux cycles de température différents ont été utilisés pour les essais DSC. Ces cycles sont présentés dans le Tableau 34. Pour ces essais, la quantité de matériau testée est de l'ordre de 10 mg ce qui implique que le taux de fibre des échantillons testé peut varier du taux de fibre moyen du matériau. Afin d'évaluer leur taux de fibre, les échantillons testés par DSC sont ensuite utilisés pour une analyse thermogravimétrique (ATG) en atmosphère inerte afin de dégrader la matrice et de conserver uniquement les fibres. Ces essais, réalisés avec l'ATG NETZSCH STA 449 F3 Jupiter® présenté sur la Figure 91-b, permettent alors de connaître la masse de fibre contenue dans les échantillons.

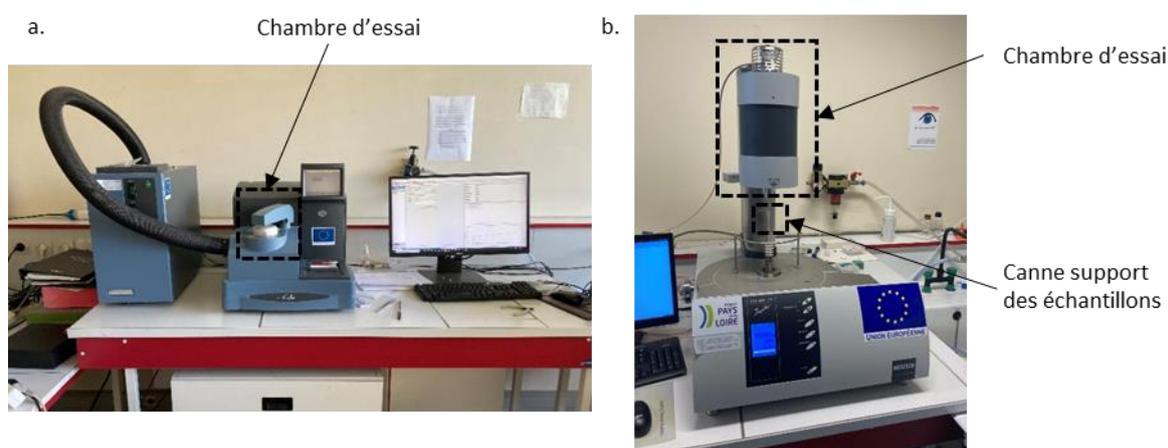


Figure 91 : a. Montage expérimental pour les essais DSC ; b. Montage expérimental pour les essais ATG.

Tableau 34 : Cycles thermiques utilisés lors des essais DSC.

<b>Cycle 1</b>	Chauffage à 15 °C/mn jusqu'à 300 °C
	Isotherme à 300 °C pendant 20 minutes
	Refroidissement à 10 °C/min jusqu'à 30 °C
<b>Cycle 2</b>	Chauffage à 5 °C/mn jusqu'à 310 °C
	Isotherme à 310 °C pendant 10 minutes
	Refroidissement à 5 °C/min jusqu'à 30 °C

Les résultats de ces essais, dont un exemple est présenté sur la Figure 92, ont permis d'établir la valeur d'enthalpie de fusion du matériau de 19,19 J/g et la valeur de capacité thermique massique de 1,27 J/K/kg.

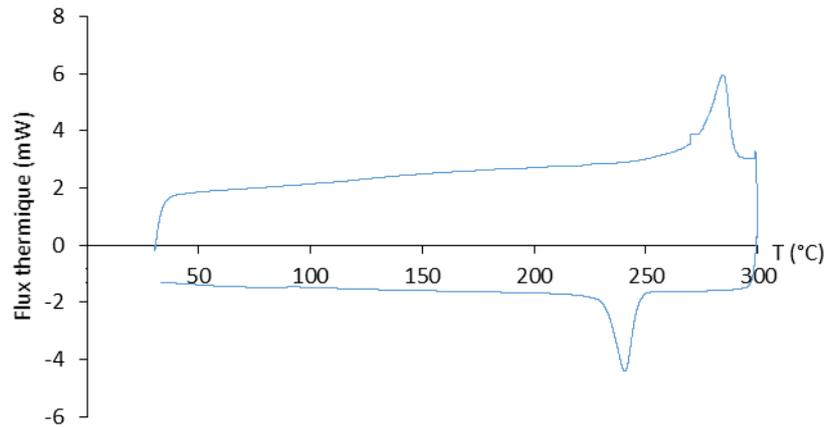


Figure 92 : Résultats d'un essai DSC : échantillon de 8,74 mg et réalisation du cycle thermique numéro 1.

#### 6.2.4.3. Bilan des propriétés thermiques du matériau C/PPS

Afin de compléter ces résultats, des recherches dans la littérature ont permis d'identifier les propriétés manquantes du matériau C/PPS de la pièce et de l'acier du moule. Le bilan des données matériau utilisées dans la modélisation du procédé de thermoformage-estampage que nous proposons est finalement présenté dans le Tableau 35. Dans ces travaux, plusieurs modes de collecte des données thermiques ont été utilisés et choisis avec une approche adaptée de celle proposée pour le choix de méthode de collecte des données d'inventaire (Figure 27).

Tableau 35 : Propriétés thermiques des matériaux des systèmes modélisés.

<b>Conductivité thermique C/PPS</b>	0,610 W/m/K	Plaque chaude gardée
<b>Enthalpie de fusion C/PPS</b>	19,19 J/g	DSC
<b>Capacité thermique massique C/PPS</b>	1,27 J/K/kg	DSC
<b>Densité C/PPS</b>	1,55 g/cm <sup>3</sup>	Fiche matériau Cetex® TC1100
<b>Taux massique de résine C/PPS</b>	43 %	Fiche matériau Cetex® TC1100
<b>Emissivité C/PPS</b>	0,9	[98]
<b>Conductivité thermique moule en acier</b>	45 W/m/K	[97]
<b>Masse volumique moule en acier</b>	7,88 g/cm <sup>3</sup>	[97]
<b>Capacité thermique massique moule en acier</b>	460 J/K/kg	[97]
<b>Emissivité moule en acier</b>	0,3	[99]
<b>Résistance thermique de contact</b>	0,001 m <sup>2</sup> .K/W	[100]

#### 6.2.5. Validation expérimentale du modèle thermique

##### 6.2.5.1. Motivations

Afin de s'assurer que le modèle développé représente bien le comportement du système réel, des relevés de température sont réalisés sur des pièces instrumentées lors de leur mise en œuvre sur le procédé de thermoformage-estampage du laboratoire. Ces relevés visent à être comparés aux résultats calculés par le modèle thermique du procédé développé dans ce chapitre. Cette comparaison permet alors de régler les paramètres du modèle, tels que les asservissements du four infrarouge et de la presse, pour que le modèle représente le plus fidèlement possible le comportement en température mesuré expérimentalement. Une fois cette étape de réglage et de validation du modèle réalisée, le modèle thermique pourra être exploité dans le but de calculer les consommations d'énergie des différentes étapes du procédé et ces données calculées pourront être comparées aux données électriques mesurées expérimentalement dans le chapitre 4.

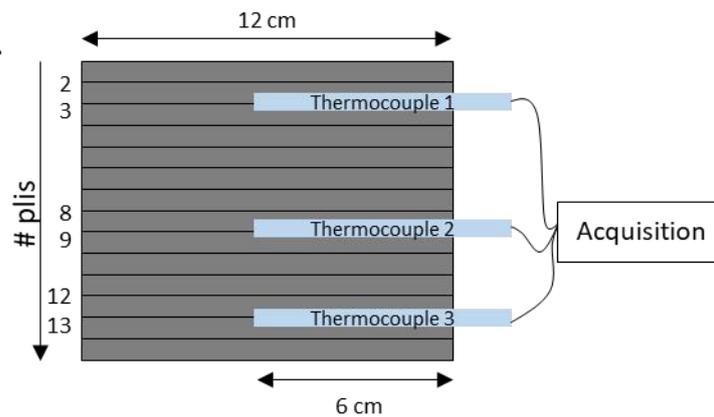
### 6.2.5.2. Protocole expérimental

Pour la validation de la modélisation thermique proposée dans ce chapitre, des essais sont réalisés sur le procédé du laboratoire décrit dans le chapitre 3. Deux pièces aux dimensions de 120 mm x 120 mm et d'épaisseurs de 4,3 mm (14 plis) et de 2,8 mm (9 plis) sont d'abord instrumentées avec des thermocouples. Pour cela, des thermocouples chemisés de type K de 0,5 mm de diamètre sont insérés dans les plaques de matériau à l'état fondu après un premier chauffage infrarouge (Figure 93-a.). Les thermocouples sont enfoncés de 6 cm dans le matériau, soit plus de 100 fois le diamètre des thermocouples, afin d'éviter les phénomènes de ponts thermiques pouvant perturber les relevés de température. Ces thermocouples sont positionnés entre les plis du matériau comme présenté sur la Figure 93-b. et la Figure 93-c. Pour terminer cette instrumentation, un cycle de thermoformage-estampage est enfin appliqué à ces pièces afin de reconsolider le matériau et de supprimer les porosités induites notamment par l'insertion des thermocouples (Figure 93-a).

a.



b.



c.

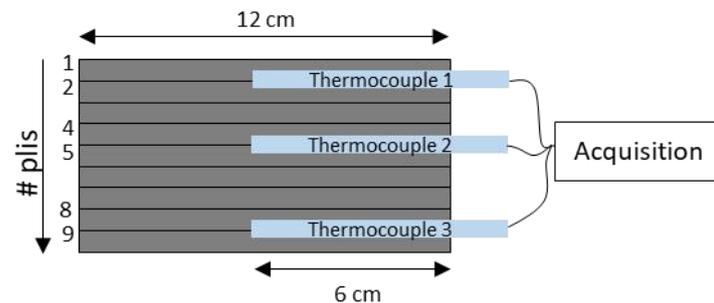


Figure 93 : Instrumentation des plaques par 3 thermocouples : a. Photographie d'une pièce instrumentée après insertion des thermocouples et avant reconsolidation ; b. Positionnement des thermocouples dans la pièce de 4,3 mm d'épaisseur ; c. Positionnement des thermocouples dans la pièce de 2,8 mm d'épaisseur.

Une fois les pièces instrumentées, elles sont utilisées pour plusieurs cycles de thermoformage-estampage avec différents jeux de paramètres du procédé. Pour chacune des pièces, les quatre jeux de paramètres présentés dans le Tableau 36 ont été utilisés, avec un effort d'emboutissage de 86 kN

imposé dans la presse. Afin de s'affranchir du régime transitoire du four infrarouge, cinq cycles de chauffage sont réalisés avant chaque essai.

Tableau 36 : Configurations de paramètres utilisées lors des essais de thermoformage-estampage avec les pièces instrumentées avec des thermocouples.

N° Essai	T <sub>IR</sub> consigne (°C)	T <sub>presse</sub> consigne (°C)	H <sub>paramètre</sub> (%)
1	310	50	100
2	370	50	100
3	310	50	70
4	310	230	100

Afin de travailler sur la modélisation des phases de chauffage et de maintien en température du moule de la presse, des relevés de température ont aussi été réalisés en utilisant les thermocouples intégrés dans les plateaux chauffants de la presse. Ces relevés ont été réalisés pour le chauffage des plateaux à la température de 230 °C.

#### 6.2.5.3. Résultats des mesures et comparaison avec la modélisation

Un exemple de résultat des relevés de température dans les pièces instrumentées est présenté sur la Figure 94. Ces résultats ont été comparés avec les résultats de la modélisation thermique développée dans ce chapitre, ce qui a permis d'identifier un réglage de l'asservissement du four : un gain proportionnel égal à 4, un gain intégral de 0,03 s<sup>-1</sup> et un gain dérivé nul. Sur la Figure 94, les résultats du modèle avec ces réglages sont superposés aux résultats mesurés expérimentalement pour un des essais réalisés. Sur cette figure, les résultats des mesures et du modèle sont numérotés par rapport à leur position dans l'épaisseur du matériau, en lien avec la numérotation des thermocouples présentée sur la Figure 93.

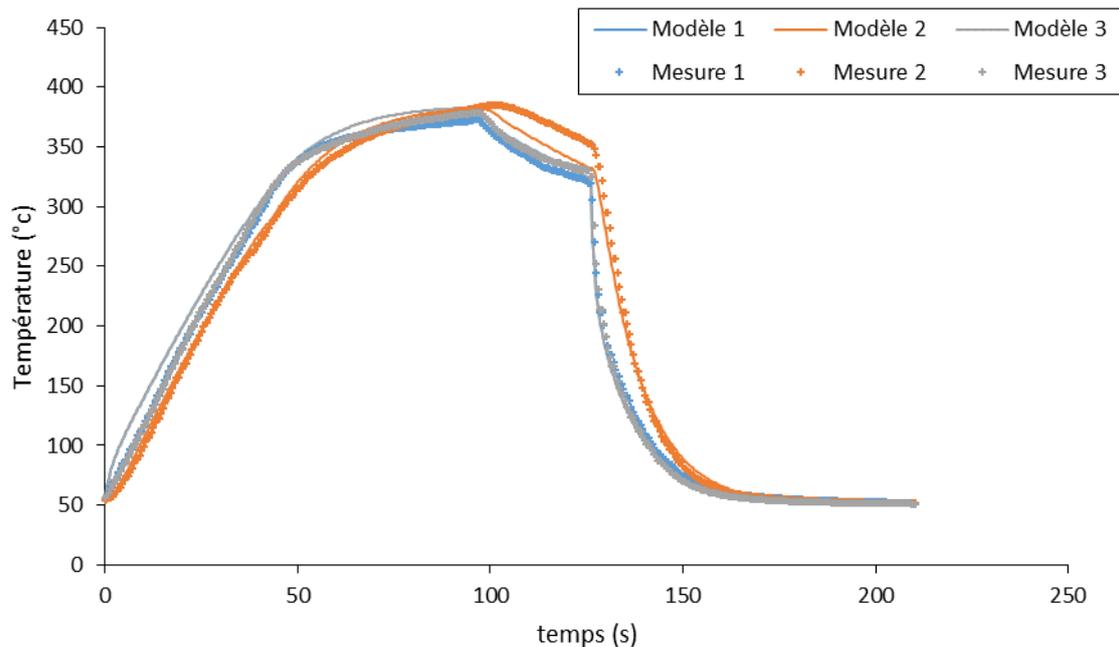


Figure 94 : Comparaison entre les résultats des mesures de température dans la pièce avec ceux issus de la modélisation développée dans la configuration de l'essai 2 et pour la plaque de 4,3 mm d'épaisseur.

Afin d'évaluer la correspondance entre la modélisation proposée et les relevés expérimentaux, le coefficient de corrélation  $R^2$  et l'erreur absolue moyenne ont été calculés pour chaque configuration testée avec les deux pièces instrumentées. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 37. Au vu de ces résultats, la modélisation proposée est considérée comme satisfaisante pour nos travaux. Néanmoins, la corrélation entre le modèle et les résultats expérimentaux n'est pas parfaite. Cela peut s'expliquer par plusieurs choses. Les réglages des paramètres du modèle peuvent tout d'abord être optimisés. En effet, les coefficients des PID modélisés pour le four et la presse peuvent être améliorés afin d'améliorer le modèle. Ensuite, une source d'erreur du modèle peut être causée par le fait que la déconsolidation du matériau durant le chauffage n'est pas prise en compte. En effet, lors de la phase de chauffage infrarouge des porosités apparaissent dans le matériau en raison de la présence d'humidité dans le matériau ainsi qu'à cause de la relaxation des contraintes résiduelles [101]. Cependant, la variation de la conductivité thermique du matériau causée par l'apparition de ces lames d'air n'est pas prise en compte dans la modélisation proposée. Un axe d'amélioration de cette modélisation serait donc d'intégrer ce phénomène physique. Enfin, la modélisation proposée ne prend pas en compte les changements de phase du matériau mis en forme. Une autre piste d'amélioration du modèle consiste donc à intégrer ce comportement.

Tableau 37 : Coefficients de corrélation et erreur absolue moyenne entre les données mesurées et les résultats de la modélisation thermique.

	Plaque de 4,3 mm d'épaisseur				Plaque de 2,8 mm d'épaisseur			
	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4
<b>R<sup>2</sup> thermocouple 1</b>	0,995	0,998	0,999	0,970	0,994	0,997	0,997	0,996
<b>R<sup>2</sup> thermocouple 2</b>	0,993	0,998	0,999	0,985	0,993	0,997	0,997	0,994
<b>R<sup>2</sup> thermocouple 3</b>	0,994	0,998	0,999	0,977	0,993	0,997	0,996	0,995
<b>Erreur absolue moyenne thermocouple 1 (°C)</b>	10,6	8,4	8,2	14,2	8,2	7,7	5,7	7,5
<b>Erreur absolue moyenne thermocouple 2 (°C)</b>	9,3	6,0	3,6	11,5	11,6	8,7	7,8	8,9
<b>Erreur absolue moyenne thermocouple 3 (°C)</b>	8,6	6,3	5,5	17,0	10,5	8,7	7,8	9,9

Les résultats des mesures de température du four sont présentés sur la Figure 95. Ces résultats ont permis d'identifier des réglages du modèle d'asservissement du système thermique de la presse : un gain proportionnel égal à 3, un gain intégral de 0,0005 et un gain dérivé nul. Avec ces réglages, les données modélisées sont présentées sur la Figure 95. **Cette modélisation est alors considérée comme adaptée** dans nos travaux car le coefficient de corrélation  $R^2$  ainsi que la valeur de l'erreur absolue moyenne entre les données mesurées et la modélisation proposée valent respectivement 0,999 et 7,8 °C.

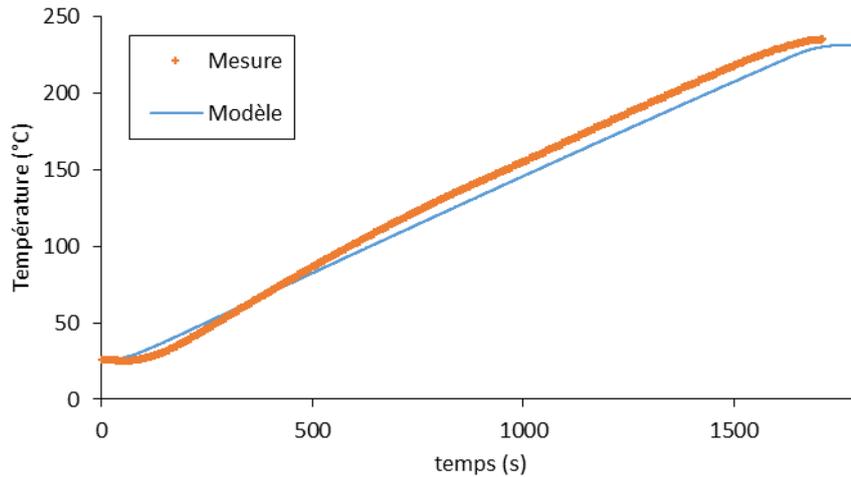


Figure 95 : Résultats des mesures et de la modélisation développée des températures pour la phase de chauffage du moule de la presse.

## 6.2.6. Exploitation du modèle thermique pour la quantification du potentiel de diminution de la consommation d'énergie

### 6.2.6.1. Principe d'exploitation de la modélisation thermique

Le modèle thermique du procédé de thermoformage-estampage présenté précédemment permet d'évaluer les consommations énergétiques du procédé. Plus précisément, ces consommations d'énergie sont celles du four ( $E_{chauffage\ IR\ modèle}$ ) et de la presse ( $E_{chauffage\ moule\ modèle}$ ), pour le chauffage respectif de la préforme et du moule. Ces consommations d'énergie sont définies en fonction de la surface de la pièce ( $S_{pièce}$ ) et de la surface du moule ( $S_{moule}$ ) ainsi que de la durée de chauffage de la pièce et du moule :

$$E_{chauffage\ IR\ modèle} = S_{pièce} \int_{t_0}^{t_{chauffage\ IR}} \varphi_{IR} dt$$

$$E_{chauffage\ moule\ modèle} = S_{moule} \int_{t_0}^{t_{chauffage\ moule}} \varphi_{chauffage\ moule} dt$$

La durée des phases de chauffage de la préforme ( $t_{chauffage\ IR}$ ) ainsi que de chauffage du moule ( $t_{chauffage\ moule}$ ) sont alors évaluées à partir de l'évolution de la température au cours du temps qui est donnée par la modélisation thermique développée. La durée de chauffage du moule correspondant à la durée de montée en température du moule, ajoutée à la durée de la série de production.

Afin d'être cohérent dans la comparaison avec les modèles d'inventaire développés dans le chapitre 4, l'énergie de chauffage du moule considérée sera calculée comme  $E_{chauffage\ moule\ modèle}$  divisée par le nombre de pièces produites dans une série. Les consommations d'énergie calculées de cette façon sont considérées comme l'énergie utile minimale nécessaire à la mise en œuvre du procédé. Ces énergies sont alors comparées aux consommations électriques mesurées expérimentalement. La différence entre les valeurs obtenues expérimentalement et la modélisation permet alors de quantifier le potentiel de diminution de la consommation d'énergie du procédé.

### 6.2.6.2. Application

La méthode de calcul du potentiel de diminution de la consommation d'énergie électrique du procédé de thermoformage-estampage est appliquée au cas de la fabrication d'une pièce plaque de

250 mm x 200 mm x 4,34 mm présenté dans le chapitre 5. La température de chauffage de la préforme est fixée à 370 °C à 90 % de la puissance maximale du four. Le matériau est ensuite mis en forme dans un moule maintenu à une température de 100 °C pour la fabrication d'une série de 10 pièces. Dans cette partie, on considère le chauffage de deux demi-moules en acier de 500 mm x 300 mm x 75 mm.

Grâce au modèle thermique qui est présenté dans ce chapitre, la consommation d'énergie du four infrarouge est calculée à partir des données de flux de chauffage  $\varphi_{IR}$ . La puissance de chauffage consommée, exprimée comme le produit de ce flux de chauffage et de la surface de la pièce  $S_{pièce}$  est représenté sur la Figure 96. L'intégration sur la durée de chauffage de ces résultats donne alors une énergie de chauffage de 437 kJ.

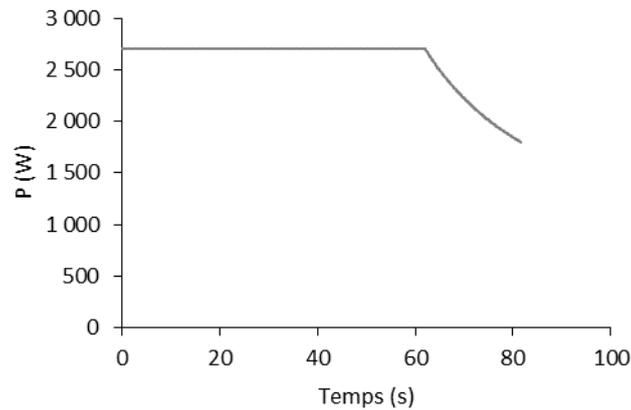


Figure 96 : Puissance nécessaire lors d'un cycle de chauffage infrarouge calculée avec la modélisation thermique du procédé.

De la même façon, le modèle thermique permet d'évaluer l'énergie consommée pour le chauffage et le maintien en température du moule. Calculée à partir des données de flux de chauffage  $\varphi_{chauffage\ moule}$ , la puissance consommée par la presse est calculée en multipliant ce flux par la surface du moule  $S_{moule}$ . L'intégration de cette puissance consommée présentée sur la Figure 97 permet de calculer une énergie consommée par le système thermique de la presse égale à 1 804 kJ pour la fabrication d'une pièce.

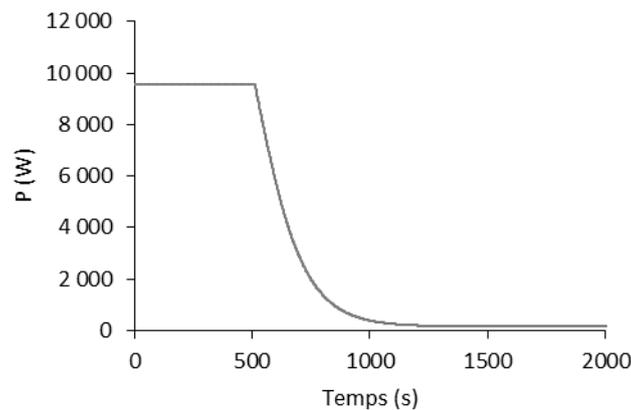


Figure 97 : Puissance nécessaire pour la presse calculée avec la modélisation thermique du procédé.

Les consommations d'énergie du procédé ainsi calculées avec le modèle thermique sont alors comparées aux données évaluées grâce aux modèles développés dans le chapitre 4. Les résultats de

ces comparaisons permettent de différencier l'énergie utile de celle qui est perdue lors du procédé. Ces résultats, présentés sur la Figure 98, montrent qu'il existe un potentiel important de diminution des consommations d'énergie des phases de chauffage et d'estampage. Dans le cas étudié, ce potentiel de réduction a été évalué à 86 % pour la phase de chauffage infrarouge et à 44 % pour les phases de chauffage et de maintien en température du moule. Par conséquent, la diminution de la consommation d'énergie des phases de chauffage et d'emboutissage peut être considérée comme un axe de travail prioritaire pour diminuer l'impact environnemental du procédé de thermoformage-estampage : il s'agit d'un flux élémentaire responsable d'impacts environnementaux majeurs et qui dispose d'un potentiel d'amélioration important. Ces résultats importants peuvent s'expliquer en partie par le fait que les machines utilisées sont de grandes dimensions par rapport à la taille des pièces produites. Cela implique par exemple des pertes d'énergie lors de la phase de chauffage puisque la totalité de la surface des panneaux radiants est mobilisée pour chauffer une préforme de surface inférieure.

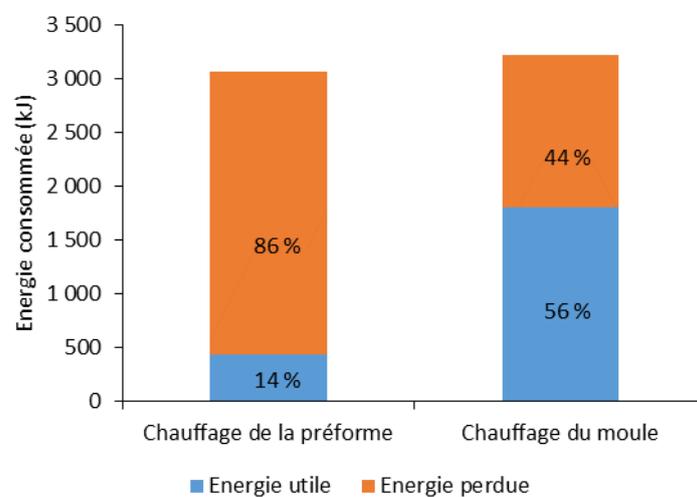


Figure 98 : Résultats de l'exploitation du modèle thermique et des données mesurées pour l'identification du potentiel de diminution de consommation d'énergie du procédé de thermoformage-estampage.

Afin d'évaluer l'influence du temps de transfert, le modèle thermique est aussi exploité pour calculer l'énergie perdue par la pièce lors du transfert, à cause des phénomènes de convection et de rayonnement. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 99. Ils montrent que la durée de transfert a une influence sur la quantité d'énergie perdue par le procédé estimé à environ 2 kJ par seconde (soit une perte moyenne de 2 kW) de transfert supplémentaire par une méthode d'interpolation linéaire. Par conséquent, une réduction du temps de transfert est un moyen de réduire la quantité d'énergie consommée par le procédé dans des proportions calculables grâce aux résultats de la modélisation proposée.

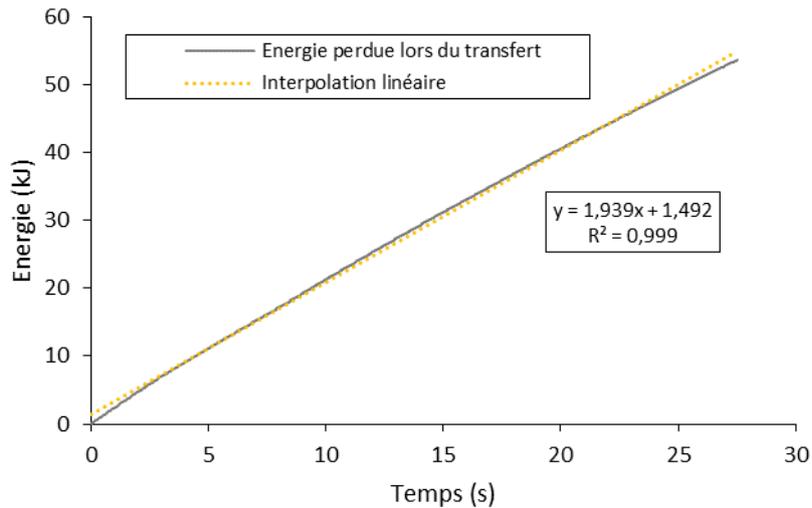


Figure 99 : Energie perdue au cours du temps par la pièce lors de l'étape de transfert calculée avec la modélisation thermique du procédé.

### 6.3. Modélisation du formage pour le calcul de taux de chute

#### 6.3.1. Objectif de la modélisation de la consommation de matériau

Dans le chapitre précédent, la surconsommation de matériau C/PPS a été identifiée comme le flux responsable des plus grands impacts environnementaux du procédé de thermoformage-estampage. Ces résultats se sont basés sur la modélisation de ce flux basée sur des données issues de la littérature et indépendante de la géométrie de la pièce fabriquée. Dans le chapitre 5, l'analyse de la criticité de ce modèle a cependant révélé que ces données d'inventaire doivent être précisées en priorité.

Afin d'améliorer l'évaluation de la consommation de matériau, il est nécessaire de prendre en considération la géométrie des pièces fabriquées dont cette donnée dépend fortement. Pour cela, on distinguera deux types de géométries : les surfaces développables et les surfaces non-développables. Concernant la mise en forme de composite sur des surfaces développables, la consommation de matériau associée est relativement simple à obtenir. En effet, il suffit de déplier la géométrie de la pièce pour la ramener en deux dimensions afin d'avoir un aperçu des dimensions de la préforme nécessaire à la fabrication d'une telle pièce. Cette opération est connue sous le nom de remise à plat. La mise en forme de composite sur des surfaces non développables est cependant plus complexe. En raison de la faible extensibilité des renforts fibreux à fibres continues, la mise en forme d'un flan composite plan sur ce type de surface provoque un phénomène de cisaillement plan qui engendre des déformations du matériau et donc influe sur les consommations de matières. Afin d'évaluer plus finement les consommations de matériau du procédé de thermoformage-estampage, une méthode de calcul basée sur la modélisation du formage de composite sur une surface en trois dimensions a donc été développée. **L'objectif visé étant le calcul des consommations minimales de matériau du procédé à partir d'une géométrie de pièce donnée.**

#### 6.3.2. Description de la méthode de formage cinématique

##### 6.3.2.1. Contexte de la simulation du formage et choix de la méthode cinématique

Dans la littérature, il existe principalement deux types de méthodes pour modéliser le formage de pièces composites sur des surfaces en trois dimensions [102]. La première méthode consiste à résoudre les équations de la mécanique associées au processus de formage. La seconde approche, dite de formage cinématique, est purement géométrique. Dans sa version la plus sophistiquée, cette

seconde approche utilise des résultats de la géométrie différentielle et ne prend pas en compte les caractéristiques matériaux. Durant la thèse, c'est cette deuxième approche qui est utilisée car elle permet des calculs rapides et une prédiction satisfaisante des champs de cisaillement des renforts avant l'apparition des défauts de plissements.

### 6.3.2.2. Principe de fonctionnement des méthodes de formage cinématiques

La méthode de formage cinématique a été introduite par Mack et Taylor en 1956 [103]. Dans leurs travaux, Mack et Taylor ont travaillé sur des pièces à symétrie de révolution pour simplifier le calcul analytique de solutions [103]. Depuis, la méthode de drapage cinématique a été mise en œuvre et adaptée par plusieurs équipes de recherche, notamment afin de travailler sur des géométries de pièces plus variées en utilisant des algorithmes numériques [104]–[107].

L'objectif de cette méthode est de déterminer la configuration finale d'un renfort tissé après formage dans un moule 3D. Afin de poser le problème, plusieurs hypothèses sont communément réalisées :

- Inextensibilité des fils de trame et de chaîne qui se croisent en des nœuds ;
- Non glissement aux nœuds ;
- Les fils sont droits entre les nœuds ;
- La rotation des fils est le seul mécanisme de déformation du renfort pris en considération ;
- Résistance nulle à la rotation des fils et à la flexion de la couche de renfort.

Le matériau est donc vu comme un treillis paramétré par l'espacement du maillage. Le matériau peut uniquement se déformer par des mécanismes de cisaillement (Figure 100). Cette hypothèse est justifiée par le fait que le cisaillement est identifié comme le principal mode de déformation lors du formage d'un matériau tissé [108].

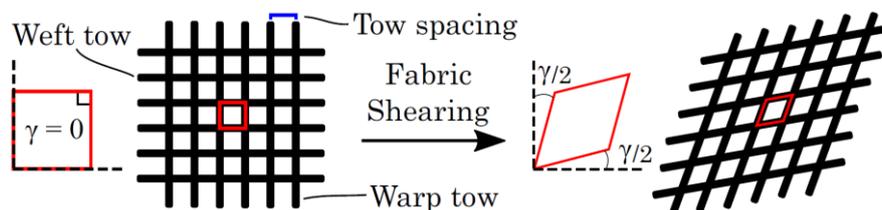


Figure 100 : Déformation d'un tissé par cisaillement avec les hypothèses de la méthode de formage cinématique [107].

Afin de mettre en œuvre la méthode de drapage cinématique, plusieurs étapes successives sont réalisées. En général, cette méthode nécessite en entrée de définir un point d'origine du drapage et une direction de drapage. Des lignes génératrices sont ensuite construites le long et perpendiculairement à la direction de drapage. Deux méthodes peuvent être utilisées pour générer ces lignes : une méthode planaire (intersection du moule avec un plan passant par le point d'origine) ou une méthode géodésique (les lignes géodésiques minimisent la distance sur une surface entre deux points et sont habituellement déterminées par intégration d'équation différentielles complexes) (Figure 101). Une fois les lignes génératrices construites, les hypothèses géométriques régissant le comportement du matériau (distance entre nœuds constante traduisant l'inextensibilité des fils et nœud coïncidant avec le moule) permettent de positionner les nœuds du maillage représentant le matériau tissé.

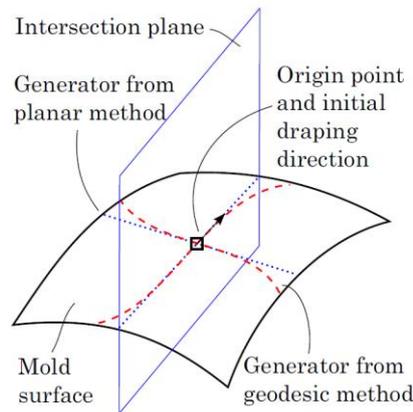


Figure 101 : Création de ligne génératrice par la méthode planaire (en bleu) et par la méthode géodésique (en rouge) [107].

### 6.3.2.3. Description de la méthode choisie

Dans nos travaux, une méthode développée récemment par Krogh *et al.* dans [107] a été choisie pour modéliser le formage de composite sur un moule en 3D. Dans ces travaux, les auteurs ont choisi d'adapter la méthode générale en introduisant l'utilisation de cellules génératrices carrées au lieu de lignes. Pour construire ces cellules génératrices, la méthode géodésique a été choisie car elle permet d'obtenir des résultats plus précis dans le cas de pièces aux géométries diverses. L'intérêt de la méthode développée par Krogh *et al.* réside dans la simplification de la méthode généralement employée, grâce à l'utilisation des propriétés des géodésiques. Afin de simplifier les calculs, les cellules génératrices sont en effet obtenues par un algorithme de minimisation des angles de cisaillement des cellules plutôt qu'en résolvant des équations différentielles complexes. La méthode proposée par les auteurs se décompose donc en trois étapes qui sont représentées sur la Figure 102 :

- a. Etant donné une direction de drapage et un point initial (qui correspond au premier point de contact avec la matrice), la première étape consiste à calculer la position d'un second point grâce à une distance de maillage choisie.
- b. Des cellules dites « génératrices » sont construites successivement à partir de deux sommets en minimisant la somme des angles de cisaillement des cellules. Cette approche est intéressante car elle permet de se placer sur les lignes géodésiques en utilisant leur propriété (plus court chemin entre deux points d'une surface engendrant le minimum de cisaillement).
- c. Les cellules sont successivement fermées en positionnant les sommets manquants grâce à la condition d'espacement d'une distance  $d$  constante entre les nœuds et à la condition d'appartenance des nœuds à la surface du moule. Il s'agit ici de la propagation de la fermeture des cellules, qui repose sur la connaissance des positions de 3 sommets parmi les 4 sommets de la cellule.

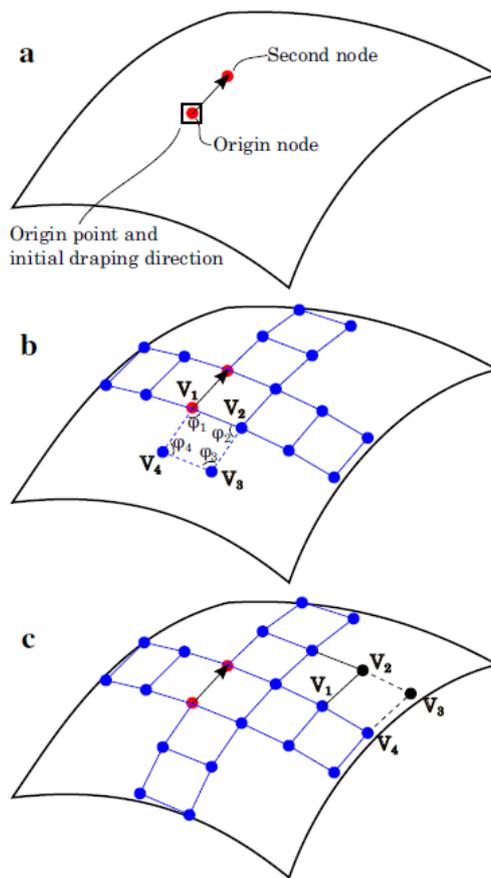


Figure 102 : Description de la méthode de drapage cinématique développée par Krogh *et al.* [107].

Dans leur article [107], Krogh *et al.* présentent leur méthodologie associée à un code de calcul écrit en Matlab et en Python dans sa version la plus simple. Ce code permet de calculer le cisaillement du matériau lors du formage en prenant comme paramètres :

- La dimension de la préforme (de forme rectangulaire, ce qui n'est pas forcément le cas lors d'applications industrielles) ;
- L'espacement entre les fils (dimension de maillage) ;
- Le point de premier contact et la direction de drapage (orientation de la préforme par rapport au moule).

Le code original a été modifié pour permettre la lecture et l'interprétation d'un maillage de la pièce à former. En effet il était limité à des formes décrites par des équations analytiques, ce qui convient pour des formes simples, mais limite le traitement de la géométrie de pièces industrielles.

Dans la suite on suppose que la présence du polymère thermoplastique fondu ne perturbe par le cisaillement du réseau de fils.

### 6.3.3. Application au calcul de surconsommations de matière

#### 6.3.3.1. Principe d'évaluation de la quantité de chutes de matière

Le code de formage développé par Krogh *et al.* qui est utilisé permet de calculer la position des points du maillage de la préforme dans sa configuration déformée. Une application de ce code au calcul du formage d'une calotte sphérique est présentée sur la Figure 103 qui montre le champ de cisaillement dans le renfort. Ce code prend en entrée plusieurs informations :

- La géométrie de la pièce fabriquée, donnée sous la forme de la liste des positions des nœuds d'un maillage qui est généré avec le logiciel Gmsh [109] ;
- Les dimensions de la préforme rectangulaire qui va être formée, données sous la forme des dimensions du treillis qui représente le matériau : nombre de colonnes, nombre de lignes et distance de discrétisation ;
- La direction de drapage.

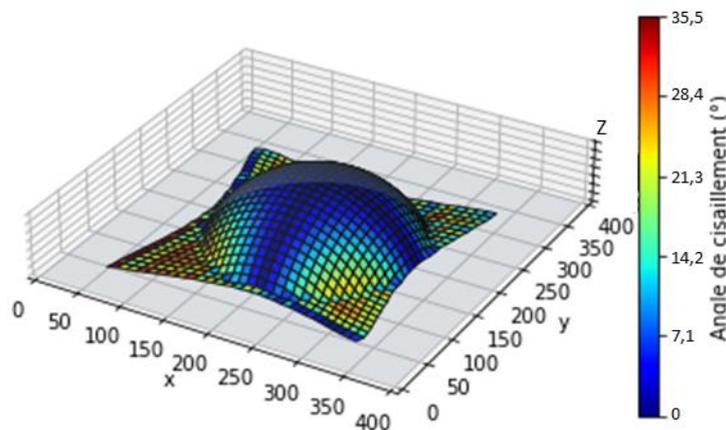


Figure 103 : Champ de cisaillement prédit par le code de Krogh *et al.* pour le formage de composite sur une calotte sphérique.

A partir des informations fournies par le code de formage, une procédure a été ajoutée afin d'évaluer la surconsommation de matériau associée au formage de la géométrie de pièce étudiée. Pour cela, la position des nœuds est utilisée pour tracer la surface projetée du flan déformé sur le plan (x,y) perpendiculaire à la direction d'emboutissage, comme présenté sur la Figure 104. Cette surface peut être divisée en deux parties : la surface projetée de la pièce fabriquée et la surface des excédents de matériau (les surconsommations de matière représentées en gris sur la Figure 104). Cette quantité de matière surconsommée, notée  $R_{surconso\ modèle}$ , est alors calculée comme la différence entre la surface projetée du flan de matériau déformé (en bleu sur la Figure 104) et la surface projetée de la pièce finie (en rouge sur la Figure 104). Ces résultats sont traités afin d'obtenir un taux de chute associé à la production de chaque pièce. Ce taux de chute est calculé à partir de la surface de matériau surconsommée évaluée lors de l'utilisation du modèle de formage ( $S_{surconsommée}$ ) et de la surface de la préforme initiale ( $S_{préforme\ initiale}$ ) :

$$R_{surconso\ modèle} = \frac{S_{surconsommée}}{S_{préforme\ initiale}}$$

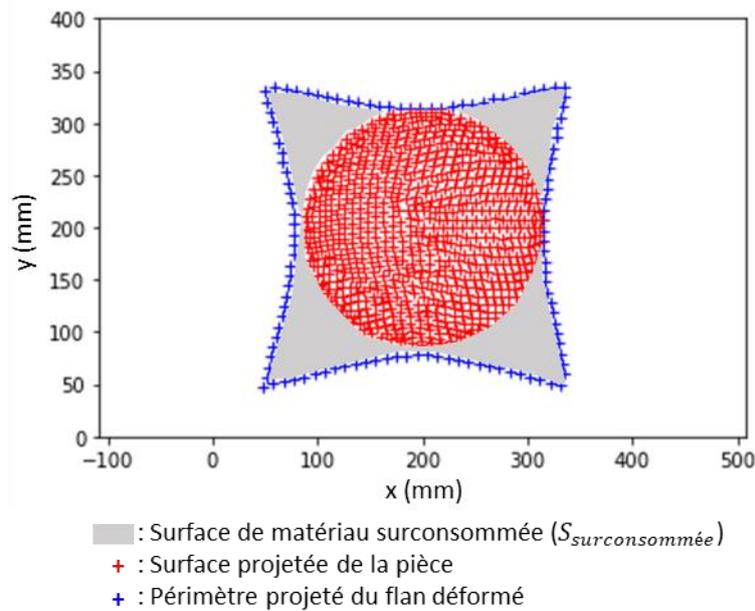


Figure 104 : Exemple sur le cas d'une calotte sphérique de la projection sur le plan (x,y) des résultats du calcul de formage pour le calcul de la quantité de matière surconsommée.

Le code de formage cinématique ainsi modifié permet de calculer les chutes de matériau associées au formage d'un flan composite. Les résultats obtenus sont cependant dépendants du choix de la taille de la préforme. Afin d'évaluer la consommation de matériau minimale pour le formage d'une pièce de géométrie donnée, la stratégie adoptée a consisté à rechercher les dimensions minimales de la préforme qui permet de produire la pièce étudiée. La donnée de surconsommation de matériau recherchée sera alors celle calculée pour la préforme aux dimensions identifiées.

Pour évaluer les dimensions d'une telle préforme, une procédure itérative a été mise en œuvre. Des simulations de formage de la pièce étudiée sont réalisées pour des dimensions de préforme de plus en plus petites. L'arrêt de cette boucle est alors défini par une condition de distance minimale entre le bord de la pièce et le bord du flan déformé. Cette condition permet de traduire la condition de bonne réalisation de la pièce : il faut que le matériau recouvre la totalité de la surface de la pièce. Un exemple de l'application de ce principe est présenté sur la Figure 105 pour le cas d'une calotte sphérique. La mise en place de cette stratégie est rendue possible par la rapidité d'exécution des calculs, puisque chaque exécution du code ne dure que quelques secondes.

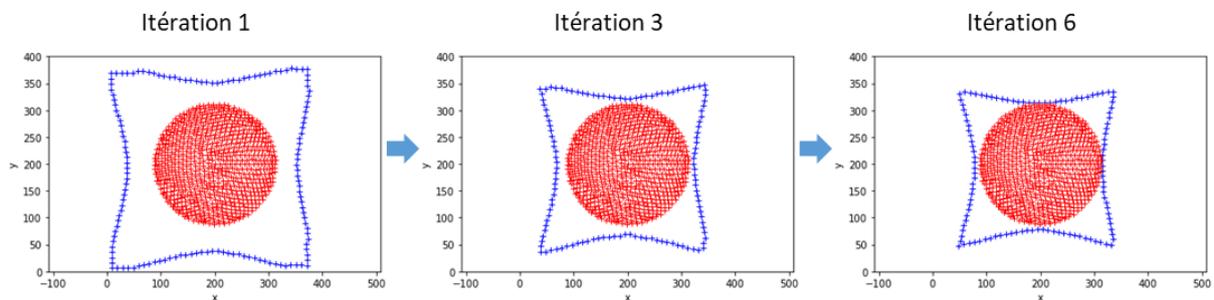


Figure 105 : Exemple d'itérations pour l'optimisation de la taille de la préforme dans le cas du formage d'une calotte sphérique.

### 6.3.3.2. Application à différentes géométries

Dans cette partie, la méthode de calcul des surconsommations de matériau est appliquée à trois géométries de pièces non développables présentées sur la Figure 106 : une calotte sphérique, une pyramide à base triangulaire et une pyramide à base carrée tronquée. Le choix d'étudier des géométries non-développable est guidé par le fait que c'est pour ce type de géométrie qu'il est le plus difficile d'estimer les surconsommations de matériau en raison de l'apparition de cisaillement lors du formage.

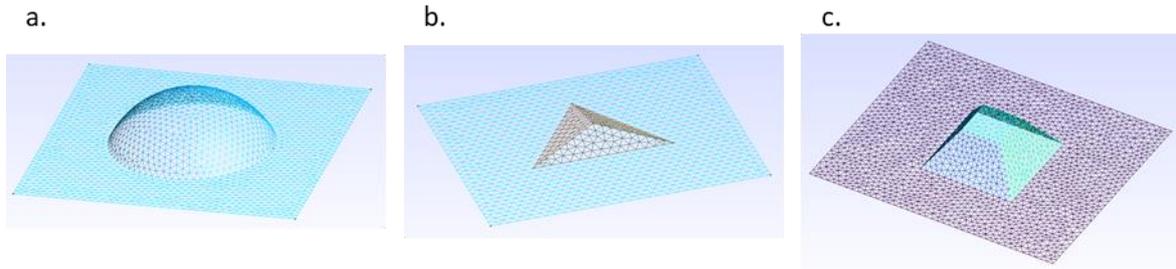


Figure 106 : Géométries non développables étudiées avec le modèle de calcul des surconsommations de matières lors du formage maillées sous Gmsh : a. Calotte sphérique ; b. Pyramide à base triangulaire ; c. Pyramide à base carrée tronquée.

Pour chacune de ces géométries, la procédure de calcul des surconsommations de matières précédemment expliquée a été appliquée avec une dimension de maillage de 10 mm qui assure la convergence des calculs. Afin de mettre en œuvre la méthodologie proposée, il est nécessaire de choisir une direction de drapage initiale. Cette direction de drapage est matérialisée par un angle de drapage initial. Dans le cas de pièces à symétrie de révolution telles que la calotte sphérique étudiée ici, le choix de cette direction importe peu. Cependant, pour d'autres géométries de pièces, ce choix peut avoir une influence sur les résultats de surconsommation de matériau obtenus. Dans le cas de la calotte sphérique et de la pyramide tronquée, l'angle de drapage a été choisi nul. Dans le cas de la pyramide à base triangulaire, l'angle de drapage initial a été choisi de 45°. Avec ces données d'entrée, les dimensions minimales des préformes permettant la mise en forme totale des pièces ont été identifiées par itérations. Ces configurations sont présentées sur la Figure 107 pour les trois géométries de pièces.

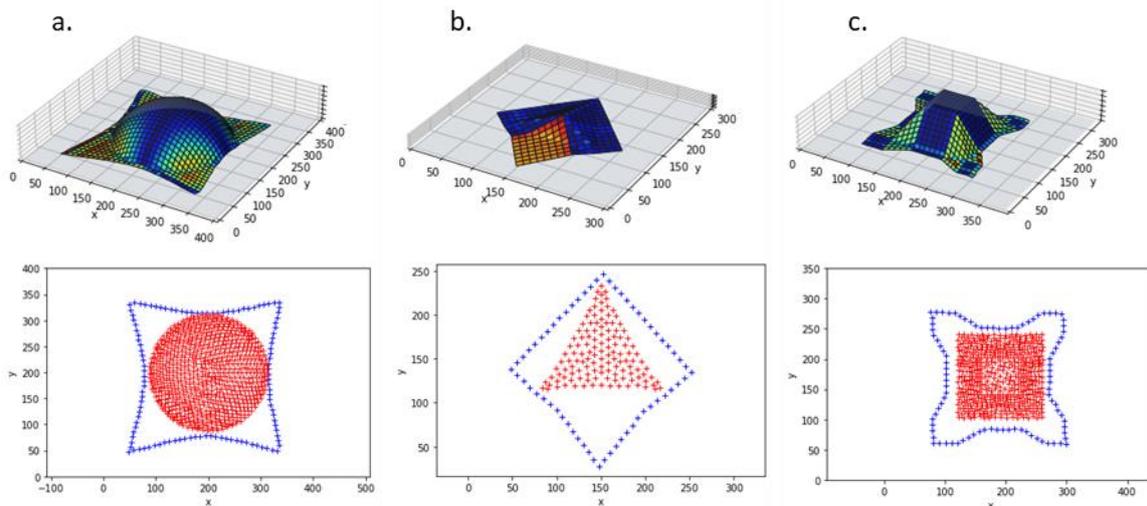


Figure 107 : Résultats de l'application de la procédure d'identification de la préforme minimale permettant de produire les pièces étudiées : a. Calotte sphérique ; b. Pyramide à base triangulaire ; c. Pyramide à base carrée tronquée.

Ce travail a alors permis d'établir les taux de chutes associés à chaque géométrie étudiée (Figure 108).

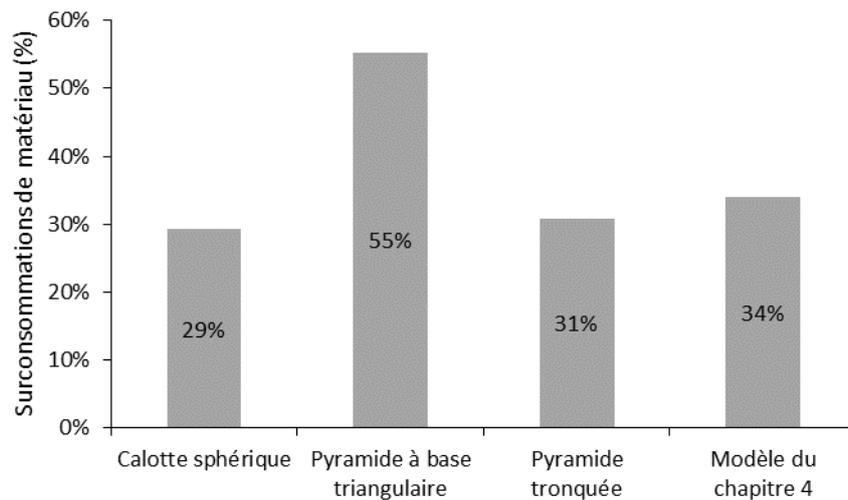


Figure 108 : Surconsommations de matériau calculées pour les différentes géométries étudiées.

Ces résultats soulignent l'influence significative de la géométrie des pièces sur la consommation de matériau du procédé et témoignent par conséquent de l'intérêt de la méthodologie développée pour obtenir des données d'inventaire plus fines. La méthode proposée ici pour évaluer les consommations de matériau présente également plusieurs avantages. Tout d'abord, elle est relativement ouverte puisqu'elle est codée en Python et utilise en entrée une description géométrique de pièces maillées sous Gmsh. Il n'est donc pas nécessaire de disposer de licence logiciel particulière, ce qui peut faciliter l'intégration de cette méthode dans les entreprises. Un autre aspect positif est que cette méthode est purement géométrique. Cela implique qu'elle ne nécessite aucune donnée matériau, évitant par conséquent des campagnes de caractérisation pouvant être longues et onéreuses. Enfin, un point fort de cette méthode réside dans la rapidité des calculs permettant par exemple l'utilisation d'une méthode itérative afin de déterminer la taille de préforme minimale pour la réalisation d'une pièce. En contrepartie, plusieurs aspects doivent être étudiés afin d'améliorer la méthodologie proposée. Tout d'abord, le calcul de formage cinématique nécessite de choisir une direction de drapage initiale dont dépendent les résultats. Des travaux sur ce sujet sont alors nécessaires afin d'aider au choix de ces paramètres du modèle. Par ailleurs, une évaluation de la justesse des résultats obtenus avec la méthodologie proposée est un axe de travail important. Pour cela, la comparaison des résultats obtenus de cette méthodologie avec des mesures expérimentales de formage ou encore avec les résultats d'un code de formage mécanique pourra être envisagée.

#### 6.4. Conclusion

Dans ce chapitre, des méthodes de modélisation des phénomènes physiques du procédé de thermoformage-estampage ont été développées afin de calculer des données d'inventaire. Un modèle du comportement thermique du procédé durant la mise en forme de pièces en C/PPS a d'abord été établi puis validé par des essais sur le procédé de thermoformage-estampage du laboratoire. Ces travaux de modélisation ont alors pu être exploités pour calculer des consommations d'énergie relatives aux phases de chauffage de la préforme et de chauffage du moule dans la presse. L'exploitation de cette modélisation a alors permis d'améliorer le niveau d'information initial qui reposait sur des relevés électriques sur les machines. En effet, la comparaison des données mesurées et calculées avec le modèle ont permis de quantifier le potentiel de diminution de la consommation d'énergie du procédé et par conséquent de valider que la réduction de la consommation d'énergie du four et de la presse est un axe prometteur pour réduire l'impact environnemental du procédé.

Dans ce chapitre, une modélisation de la consommation de matériau composite lors du formage a également été développée. Ce travail a permis d'améliorer la quantification de ce flux d'inventaire en prenant en compte la géométrie des pièces fabriquées. La méthodologie proposée se base alors sur un modèle de formage cinématique qui permet de calculer la déformation d'un flan composite sur une surface en trois dimensions à partir de laquelle la consommation de matériau est évaluée. D'un point de vue plus général, les travaux présentés dans ce chapitre ont permis de montrer le potentiel des méthodes de modélisation physique des procédés composites pour leur analyse environnementale. Habituellement exploités pour améliorer la qualité technique des pièces produites, ce type de modélisation peut être exploité de façon intéressante pour compléter des informations d'inventaire.



## Chapitre 7

# Analyse multicritère du procédé à partir de modèles d'impacts environnementaux, de coût et de résistance mécanique

---

7.1.	Introduction .....	162
7.2.	Système étudié pour le développement des propositions méthodologiques.....	162
7.2.1.	Définition du système.....	162
7.2.2.	Indicateur de performance choisi.....	163
7.3.	Analyse et choix de paramètres multicritères par une méthode graphique.....	164
7.3.1.	Présentation conceptuelle.....	164
7.3.2.	Application au thermoformage-estampage .....	165
7.3.3.	Synthèse.....	169
7.4.	Choix de paramètres par minimisation d'un indicateur agrégé .....	169
7.4.1.	Présentation conceptuelle.....	169
7.4.2.	Application au choix de paramètre de thermoformage-estampage.....	171
7.4.3.	Définition d'un nouvel indicateur pour la prise en compte de la problématique de respect de critères techniques.....	174
7.4.4.	Synthèse.....	175
7.5.	Choix parmi les optimums de Pareto.....	176
7.5.1.	Présentation conceptuelle.....	176
7.5.2.	Application au thermoformage-estampage .....	177
7.5.3.	Synthèse.....	178
7.6.	Conclusion.....	179

---

## 7.1. Introduction

Pour répondre à l'objectif de réduction de l'impact environnemental et de maîtrise du coût de fabrication de pièces composites poursuivi dans nos travaux, une stratégie identifiée dans le chapitre 2 lors de l'analyse de la littérature consiste à jouer sur les réglages des paramètres du procédé. Pour cela, une approche pour identifier les paramètres les plus influents a été développée dans le chapitre 5, en s'appuyant sur la méthodologie proposée pour exprimer les impacts environnementaux et le coût d'un procédé de fabrication de pièces composites en fonction des réglages de ses paramètres. Cette approche, utile pour obtenir des indications sur les réglages à actionner en priorité, ne permet pas cependant de faire le choix des valeurs de paramètres à utiliser.

Dans ce chapitre, on propose de travailler sur la mise en œuvre de cette stratégie : le problème traité consiste à identifier les réglages de paramètres à utiliser pour répondre au problème multi-objectifs de réduction de l'impact environnemental et du coût du procédé sous contrainte de respecter un critère de qualité technique des pièces fabriquées, généralement défini par le cahier des charges. L'analyse de la littérature qui a été développée dans le chapitre 2 a montré que cette problématique était peu traitée pour les procédés composites, avec seulement quelques outils développés. Dans ce chapitre, trois méthodes différentes sont donc proposées pour répondre à ce problème de choix des réglages de procédés composites. Ces méthodes s'adressent alors principalement aux personnes en charge de la fabrication des pièces qui mettent en œuvre le procédé de fabrication et choisissent ses réglages. Le choix de travailler sur plusieurs approches est motivé par le fait qu'il n'existe pas aujourd'hui de méthodes pleinement satisfaisantes et acceptées par tous. Par conséquent, les travaux présentés dans ce chapitre s'attachent à souligner les avantages et inconvénients des méthodes proposées afin d'aider les potentiels utilisateurs dans le choix de l'approche qui leur conviendra le mieux. Dans ce chapitre, les méthodes proposées sont appuyées par une application au cas du thermoformage-estampage de C/PPS, pour lequel les impacts environnementaux et le coût ont déjà été exprimés comme des fonctions des paramètres de ce procédé dans le chapitre 5 de ce mémoire de thèse. L'application des méthodes à ce procédé sont le moyen de vérifier leur bon fonctionnement et de valider qu'elles répondent à la problématique d'aide au choix de la configuration de paramètres.

## 7.2. Système étudié pour le développement des propositions méthodologiques

### 7.2.1. Définition du système

Le procédé de thermoformage-estampage de C/PPS modélisé dans les chapitres précédents est étudié. Dans ces travaux, les modèles ont été simplifiés afin de faciliter les calculs et le développement de la méthodologie. Pour cela, quatre paramètres du procédé sont sélectionnés pour être étudiés : la température de chauffage ( $T_{IR\ consigne}$ ), la puissance de chauffage ( $H_{paramètre}$ ), la température du moule ( $T_{presse\ consigne}$ ) et la pression de consolidation ( $P_{consolidation}$ ). Les valeurs de ces paramètres sont comprises dans les plages identifiées dans le chapitre 3. Les autres paramètres du procédé sont fixés, comme présenté dans le Tableau 38. On considérera ici la production de pièces plaques de 250 mm x 200 mm x 4,34 mm dans des séries de production de 10 pièces. Un exemple de ce type de pièces plaques fabriquées par thermoformage-estampage durant nos travaux est présenté sur la Figure 109.

Tableau 38 : Valeurs des paramètres du procédé de thermoformage-estampage utilisées.

Processus unitaire	Paramètres du procédé		
Découpe de la préforme	$t_{DJE \text{ ralenti}}$	60	s
	$L_{DJE \text{ découpe}}$	0,94	m
	$R_{DJE \text{ chutes}}$	90	%
Chauffage de la préforme	$T_0 \text{ pièce}$	20	°C
	$T_{\text{émission}}$	20	°C
	$t_{IR \text{ ralenti}}$	8	s
Transfert	$t_{\text{robot déplacement}}$	8	s
	$t_{\text{robot ralenti}}$	91,5	s
Emboutissage	$N_{\text{pièce}}$	10	
	$t_{\text{presse fonctionnement}}$	99,5	s
	$t_{\text{presse estampage}}$	91,5	s
	$S_{\text{moule}}$	0,11	m <sup>2</sup>



Figure 109 : Exemple de pièce plaque en C/PPS fabriquée par le procédé de thermoformage-estampage étudié.

### 7.2.2. Indicateur de performance choisi

Dans ce chapitre, les expressions du coût et des impacts environnementaux développées dans le chapitre 5 sont utilisées. L'indicateur environnemental *Climate Change* est choisi dans ce chapitre comme l'indicateur de performance environnementale. Ce choix s'appuie sur les résultats des travaux de réduction du nombre d'indicateurs d'impacts environnementaux qui sont présentés dans le chapitre 5. Afin de traduire la qualité technique des pièces produites, la résistance au cisaillement interlaminaire (ILSS) est choisie dans ce chapitre comme indicateur. Dans le chapitre 3, une expression de cet indicateur en fonction des paramètres de température de chauffage ( $T_{IR \text{ consigne}}$ ), de température du moule ( $T_{\text{presse consigne}}$ ) et de la pression de consolidation ( $P_{\text{consolidation}}$ ) a été proposée en se basant sur des résultats expérimentaux. Bien que le niveau de confiance dans cette expression ne soit pas optimal puisqu'elle se base sur les résultats d'un petit nombre d'essais et un faible nombre de paramètres, elle est utilisée dans nos travaux pour développer les méthodologies d'analyse multicritère présentées dans ce chapitre.

## 7.3. Analyse et choix de paramètres multicritères par une méthode graphique

### 7.3.1. Présentation conceptuelle

Dans l'analyse de la littérature présentée dans le chapitre 2, une approche qui a été développée pour répondre à la problématique de choix de paramètres consiste à utiliser un outil graphique qui représente les performances environnementales, économiques et techniques en fonction des différentes valeurs des paramètres. Un diagramme radar est en effet proposé pour la comparaison d'un nombre fini de configurations de réglages de paramètres d'un procédé de fabrication additive par Le Gentil *et al.* [52]. Cette approche, détaillée dans le chapitre 2, permet alors de faciliter la comparaison entre différents scénarios de production dans le but d'aider à en choisir un parmi ceux représentés. Elle n'est cependant pas applicable dans nos travaux dans lesquels le nombre de configurations de paramètres est trop important puisqu'il s'agit de toutes les combinaisons de valeurs des paramètres prises dans les plages de valeurs identifiées dans le chapitre 3.

Pour proposer une réponse graphique au problème multi-objectifs de choix des paramètres du procédé, une méthode différente a donc été développée. Elle repose sur le tracé d'une figure de type surface de réponse. Cette figure représente l'ensemble des réponses possible du système sous la forme d'un graphique en deux dimensions avec en ordonnée la valeur de l'indicateur environnemental et en abscisse le coût du procédé. La valeur de l'indicateur de performance technique est quant à elle représentée par un code couleur.

Afin de représenter un critère de qualité technique des pièces fabriquées, une courbe appelée courbe iso-indicateur est tracée sur la surface de réponse. Cette courbe représente l'évolution de l'impact environnemental minimal en fonction du coût en se restreignant aux configurations de paramètres du procédé qui permettent de remplir le critère de qualité technique donné. Dans le cas du thermoformage-estampage, ces courbes sont appelées courbes iso-ILSS puisque l'indicateur de performance technique retenu est la résistance au cisaillement interlaminaire (ILSS). L'étude de cette courbe permet d'aider au choix d'une configuration de paramètres du procédé qui réponde au problème multi-objectif. Dans le cas où la courbe iso-critère est monotone (Figure 110-a.), l'identification de la solution est facilitée car cela signifie que les mêmes réglages du procédé permettent d'atteindre le minimum de coût et d'impact environnemental. Dans le cas où un changement de monotonie est observé (Figure 110-b.), une configuration de paramètres pourra être choisie sur la partie décroissante de la courbe iso-critère afin de trouver un compromis entre réduction de l'impact environnemental et réduction du coût. Cette information est alors utile en phase de production pour régler les paramètres du procédé.

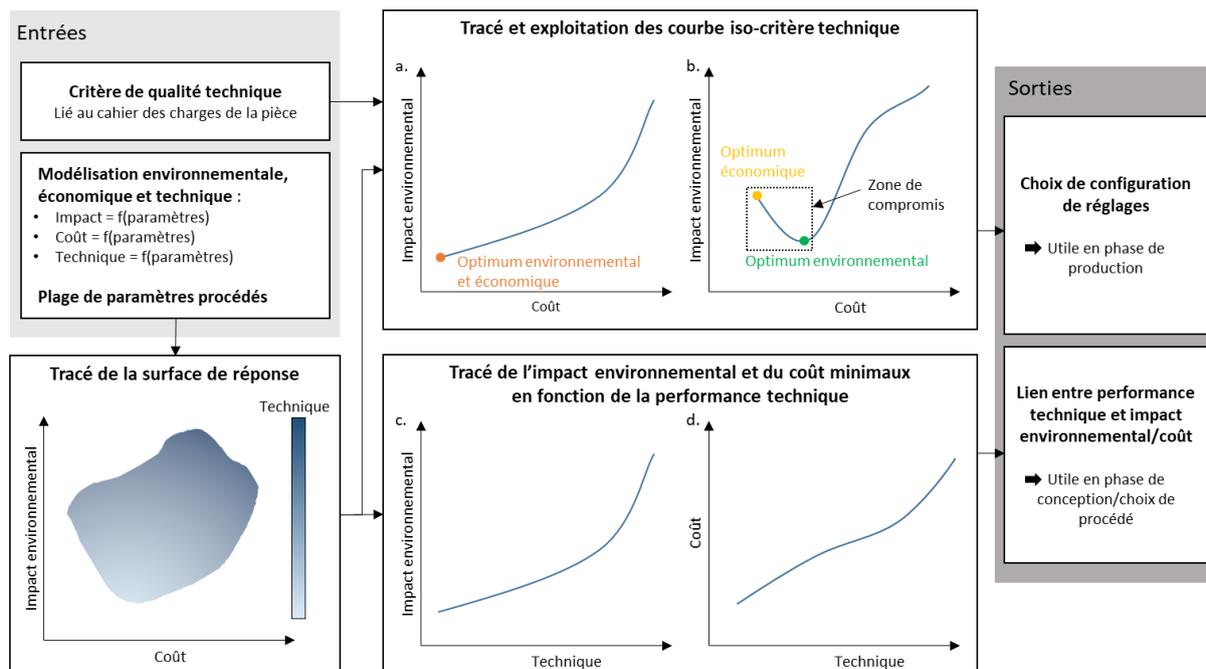


Figure 110 : Représentation conceptuelle des différentes étapes de la méthode d'analyse multicritère graphique.

Afin de compléter ce travail de choix de configuration de paramètres, une autre exploitation graphique des modèles est proposée afin d'analyser le comportement du système étudié. Cette approche se base sur le tracé de deux courbes représentées sur la Figure 110-a. et la Figure 110-b. : l'impact environnemental minimal et le coût minimal du procédé en fonction du critère de qualité technique des pièces fabriquées. Ces courbes sont particulièrement intéressantes pour représenter le comportement du système étudié car elles font le lien entre la qualité technique des pièces produites et le coût ou l'impact environnemental du procédé : elles montrent par exemple combien coûte une augmentation des propriétés techniques des pièces fabriquées.

### 7.3.2. Application au thermoformage-estampage

#### 7.3.2.1. Choix de paramètres

Afin de tracer la surface de réponse du procédé de thermoformage-estampage, les trois indicateurs ont été codés sous la forme de fonctions Python. Les valeurs de chaque indicateur sont ensuite calculées en faisant varier chaque paramètre dans toute sa plage de valeur identifiée dans le chapitre 3 avec un pas fixé dans le Tableau 39. Ces calculs permettent ainsi de tracer la surface de réponse du procédé de thermoformage-estampage de C/PPS représenté sur la Figure 111.

Tableau 39 : Valeurs des paramètres du procédé utilisées pour le calcul des données lors de la construction de la surface de réponse.

	max	min	pas
<b>H paramètre (%)</b>	70	100	2
<b>T<sub>IR</sub> consigne (°C)</b>	310	370	5
<b>T<sub>presse</sub> consigne (°C)</b>	50	230	2
<b>P consolidation (MPa)</b>	2,2	6	2

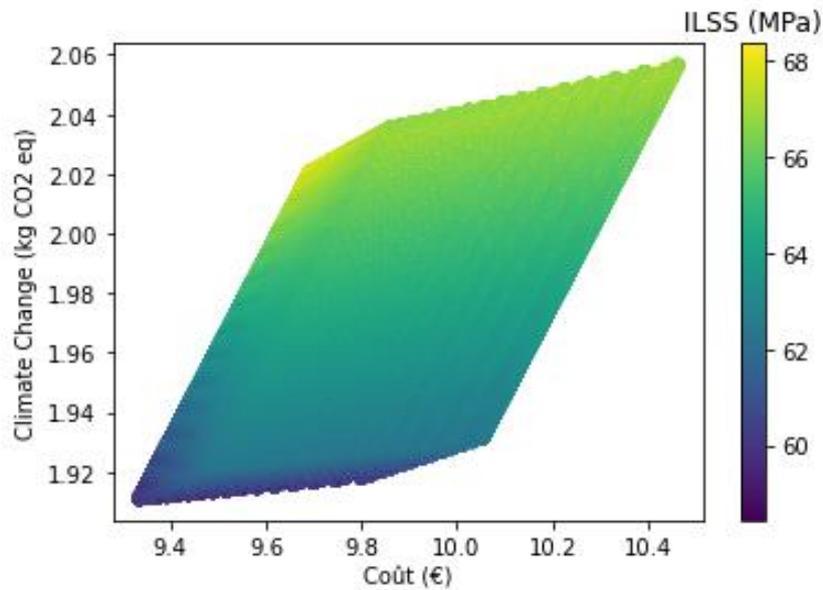


Figure 111 : Surface de réponse du procédé de thermoformage-estampage de C/PPS.

Les données permettant le tracé de la surface de réponse sont également exploitées pour tracer des courbes iso-ILSS. Pour cela, le minimum de l'indicateur environnemental *Climate change* positionné sur l'axe des ordonnées est recherché de façon successive sur des intervalles de la plage de variation du coût en abscisse pour un pas fixé de 0,1 €. Sur la Figure 112, cette procédure a été appliquée pour trois valeurs différentes de minimum de résistance au cisaillement interlaminaire qui permettent d'illustrer les deux comportements représentés sur la Figure 110-a et la Figure 110-b. Ces trois critères de résistance mécanique traduisent trois scénarios d'utilisation des pièces selon le besoin d'un niveau de qualité technique bas (60 MPa), moyen (65 MPa) ou bien haut (68 MPa) que l'on peut mettre en lien avec des applications plus ou moins structurales.

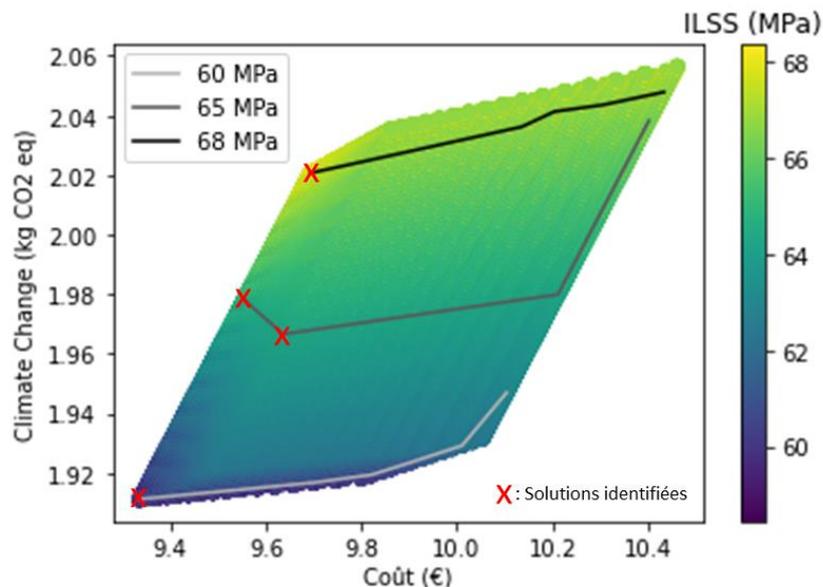


Figure 112 : Tracé des courbes iso-ILSS sur la surface de réponse du procédé de thermoformage-estampage pour trois critères minimaux de résistance au cisaillement interlaminaire : 60 MPa, 65 MPa, et 68 MPa.

Les courbes obtenues montrent que pour la fabrication de pièces ayant une résistance au cisaillement interlaminaire de 60 MPa et de 68 MPa au minimum, l'impact environnemental est une fonction

croissante du coût de production (similaire au cas représenté sur la Figure 110-a.). Cela signifie donc qu'il existe une configuration unique qui permet de répondre au critère de résistance mécanique en minimisant l'impact environnemental et le coût du procédé. Par contre, pour le cas du critère de résistance au cisaillement interlaminaire de 65 MPa minimum on observe un changement de monotonie de la courbe d'évolution de l'impact environnemental en fonction du coût du procédé avec une phase initiale de décroissance (Figure 110-b.). De ce fait, il apparaît que la configuration qui minimise le coût du procédé ne coïncide pas avec la configuration de paramètre qui minimise l'impact environnemental. L'analyse graphique de cette courbe permet cependant d'identifier les deux solutions qui permettent de minimiser respectivement le coût et l'impact environnemental. Il sera ensuite nécessaire de faire un choix parmi ces deux solutions afin de déterminer les réglages du procédé à employer. Pour chacun des trois critères sur la résistance au cisaillement interlaminaire, les solutions identifiées sont représentées par des croix rouges sur la Figure 112. Ces solutions sont détaillées dans le Tableau 40. Pour chacune de ces solutions, les réglages de paramètres associés sont détaillés, montrant lesquels adopter pour répondre à la problématique de réduction de l'impact environnemental et du coût tout en respectant le cahier des charges technique lors de la phase de production des pièces.

Tableau 40 : Configurations des paramètres des procédés optimales à adopter en phase de production pour les trois critères de résistance au cisaillement interlaminaire étudiés.

Contrainte ILSS (MPa)	H <sub>paramètre</sub> (%)	T <sub>IR consigne</sub> (°C)	T <sub>presse consigne</sub> (°C)	P <sub>consolidation</sub> (MPa)	Coût (€)	Climate change (kg CO <sub>2</sub> eq)
68	100	310	230	5,8	9,69	2,02
65	100	370	120	2,2	9,64	1,97
	100	310	160	6,0	9,55	1,98
60	100	310	50	5,4	9,34	1,91

### 7.3.2.2. Etude de l'influence de contraintes de résistance au cisaillement interlaminaire

Pour étudier l'influence de contraintes de résistance au cisaillement interlaminaire sur l'impact environnemental et le coût minimal du procédé, deux figures sont tracées sur la Figure 113, conformément à l'étape de la méthodologie présentée sur la Figure 110-c et Figure 110-d. Pour cela, les données calculées pour le tracé de la surface de réponse sont utilisées. Le minimum de l'impact environnemental *Climate change* est recherché de façon successive en balayant l'amplitude de résistance au cisaillement interlaminaire avec un pas de 0,5 MPa. Les résultats obtenus permettent de tracer l'évolution de l'impact environnemental minimal en fonction du critère technique de résistance au cisaillement interlaminaire présenté sur la Figure 113-a. Avec une approche similaire, l'évolution du coût minimal en fonction du critère de résistance au cisaillement interlaminaire est tracé sur la Figure 113-b.

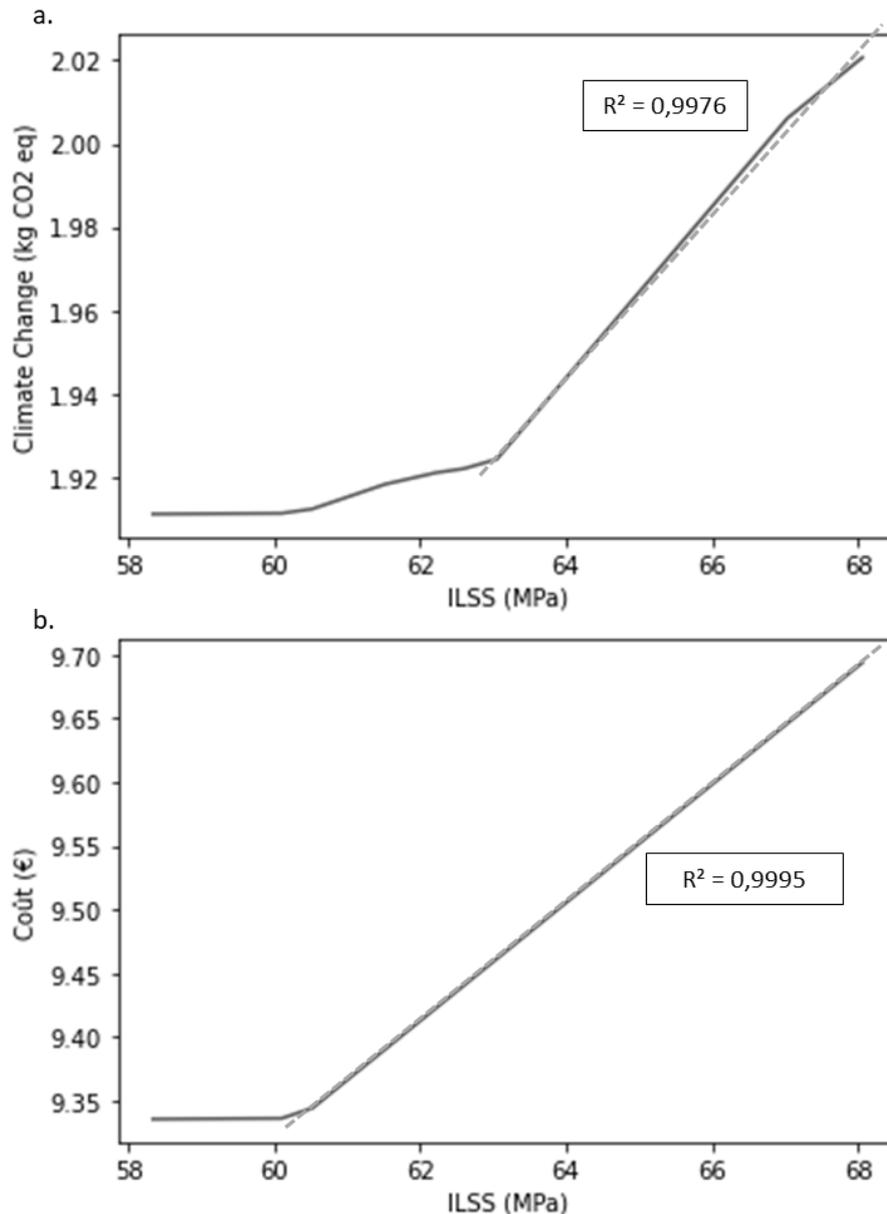


Figure 113 : a. Evolution de l'impact environnemental minimal du procédé en fonction du critère de résistance au cisaillement interlaminaire (ILSS) ; b. Evolution du coût du procédé en fonction du critère ILSS.

Ces figures montrent que le coût et l'impact environnemental *Climate change* du procédé sont des fonctions croissantes de la résistance au cisaillement interlaminaire des pièces produites. On observe également que la pente des courbes présentées sur la Figure 113 n'est pas constante. En effet, l'augmentation du coût du procédé est relativement faible jusqu'à environ 60 MPa avant d'augmenter de façon à peu près constante à 0,046 €/MPa (Figure 113-b.). De façon similaire, il apparaît que l'impact environnemental du procédé augmente lentement jusqu'à 63 MPa avant d'augmenter de façon à peu près constante à 0,0197 kg CO<sub>2</sub>eq/MPa. Cette valeur représente alors le coût environnemental d'un accroissement de la résistance mécanique des pièces produites. La connaissance du lien entre des choix de critères de performance technique et les minimums d'impacts environnementaux et de coût de fabrication qui en découlent peut être utile lors des phases en amont de la fabrication des pièces. Cela permet par exemple d'évaluer les répercussions de choix de conception, comme le critère de résistance mécanique du matériau utilisé pour le dimensionnement des pièces. Ces informations sont également intéressantes dans le cadre de la comparaison de

procédés puisqu'elles permettent d'estimer l'impact environnemental et le coût minimal de fabrication d'une pièce en prenant en compte ses spécifications techniques. Par conséquent, l'application de l'approche développée dans ce mémoire à d'autres procédés est une perspective de nos travaux.

### 7.3.3. Synthèse

Dans cette partie, la méthode graphique d'analyse multicritère qui a été proposée se base sur la construction d'une surface de réponse et de courbes qui traduisent les liens entre des critères de performance environnementaux, économiques et techniques. L'application de cette approche sur le cas du thermoformage-estampage de C/PPS a permis de valider sa capacité à identifier les réglages de paramètres à utiliser en phase de production pour réduire l'impact environnemental et le coût, sous contrainte de respect de critères de qualité technique des pièces produites. Cependant, cette approche ne permet pas toujours d'identifier une solution unique et il est dans ce cas nécessaire de réaliser un arbitrage entre l'objectif de réduction de l'impact environnemental et celui de réduction du coût pour choisir la configuration de paramètres à utiliser.

Un autre résultat de l'approche graphique proposée sont les informations qui lient le critère de qualité technique que doivent respecter les pièces avec les minimums d'impact environnemental et de coût que peut causer leur fabrication. Ces informations sont alors exploitables en amont de la phase de production, par exemple par les concepteurs des pièces, puisqu'elles permettent d'évaluer les conséquences environnementales et économiques des hypothèses de résistance des matériaux réalisées lors du dimensionnement des pièces. De plus, ce type de résultats est aussi intéressant pour faire un choix de procédé en fonction des caractéristiques techniques à respecter pour les pièces à produire. Une perspective de travail consiste donc à réaliser le même travail sur d'autres procédés composites.

Une force de l'approche graphique présentée dans cette section est son côté visuel qui facilite l'identification et l'analyse des solutions par rapport au comportement du système étudié. En effet, les bénéfices environnementaux et économiques de ces solutions sont directement observables sur la figure combinant surface de réponse et courbes iso-critères puisque ces solutions sont positionnées par rapport à l'impact environnemental, au coût et à la résistance mécanique de toutes les configurations de paramètres admissibles. Une difficulté de cette approche réside néanmoins dans sa mise en œuvre puisque le tracé des figures nécessite de choisir des paramètres adaptés, comme par exemple les pas de discrétisation utilisés pour la construction des courbes iso-critères.

Enfin, la méthode graphique présentée dans cette section a été développée pour un problème utilisant uniquement trois indicateurs de performance. Cependant, ce type de problème est souvent plus complexe puisque plusieurs critères de qualité technique sont souvent définis dans le cahier des charges des pièces. Il s'agit par exemple d'autres critères de résistance mécanique ou bien encore de critères géométriques. Par conséquent, une perspective de développement de la méthodologie proposée consiste à travailler sur son adaptation à des problématiques comprenant un plus grand nombre de critères.

## 7.4. Choix de paramètres par minimisation d'un indicateur agrégé

### 7.4.1. Présentation conceptuelle

#### 7.4.1.1. Description générale de la méthode

Afin de déterminer le jeu de paramètres des procédés composites qui répond le mieux à la problématique multi-objectifs, une approche développée dans la littérature par Katsiropoulos et

Pantelakis [53] et détaillée dans le chapitre 2, consiste à utiliser un indicateur unique qui agrège les indicateurs de performance afin de simplifier la recherche de la configuration de paramètre optimale. Il s'agit alors de simplifier le problème multicritère traité en un problème monocritère sur lequel des méthodes de minimisation classique peuvent être utilisées. Cet indicateur est alors défini comme la somme pondérée (avec les facteurs  $\lambda_i$ ) d'indicateurs environnementaux, économiques et techniques normalisés (notés  $N_i$ ). L'optimisation de cet indicateur sous contrainte de qualité technique, à l'aide par exemple d'outils numériques, permet d'obtenir les valeurs de paramètres pour lesquels une valeur optimale de l'indicateur agrégé est atteinte. La configuration de paramètre ainsi identifiée sera celle qui devra être utilisée en phase de production des pièces.

Dans cette partie, cette méthodologie est employée puis elle est adaptée en proposant des modifications de façon à mieux répondre à l'objectif de réduction de l'impact environnemental et du coût de la fabrication de pièces composites sous contrainte de respect de critères techniques. Les différentes étapes de cette méthodologie sont présentées sur la Figure 114.

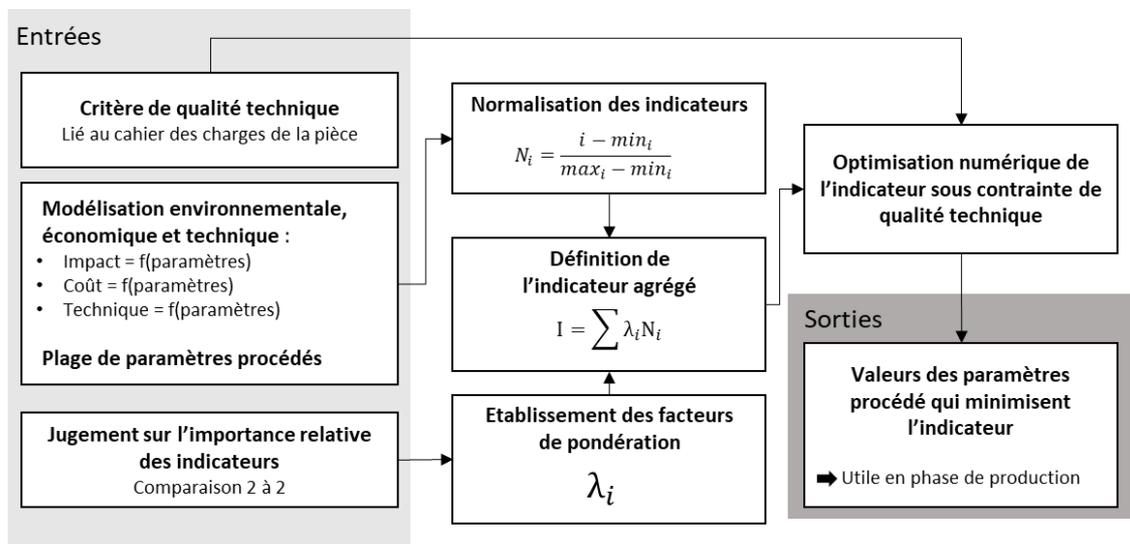


Figure 114 : Méthodologie d'analyse multicritère par indicateur agrégé.

#### 7.4.1.2. Définition de l'indicateur

Dans nos travaux, les indicateurs agrégés sont définis grâce à des facteurs de pondération  $\lambda_i$  associés aux indicateurs normalisés  $N_i$ . Le premier indicateur  $I_1$  utilisé dans cette partie est celui proposé par Katsiropoulos et Pantelakis dans leurs travaux détaillés dans le chapitre 2 qui visent à répondre à un problème semblable à celui posé dans ce chapitre : déterminer les réglages de paramètres d'un procédé de placement automatisé de fibres pour la fabrication d'un panneau de fuselage de Boeing 747 [53]. Cet indicateur intègre la dimension technique de la performance du procédé aux indicateurs environnementaux et économique :

$$I_1 = \lambda_{\text{Impact environnemental}} \cdot N_{\text{Impact environnemental}} + \lambda_{\text{Coût}} \cdot N_{\text{Coût}} - \lambda_{\text{Technique}} \cdot N_{\text{Technique}}$$

#### 7.4.1.3. Méthode de normalisation

Pour calculer l'indicateur agrégé, les indicateurs de performance  $i$  doivent être normalisés. Le choix de la méthode de normalisation employée peut alors avoir une influence sur les résultats obtenus. Parmi les différentes méthodes de normalisation possible, nous avons choisi de définir les indicateurs normalisés  $N_i$  en fonction des extrema  $\max_i$  et  $\min_i$  des valeurs des indicateurs  $i$  :

$$N_i = \frac{i - \min_i}{\max_i - \min_i}$$

Ce choix est motivé par la volonté de considérer de façon égale chaque indicateur sans juger de l'importance de l'amplitude de leur variation dans la plage de paramètres étudiée. Dans leurs travaux, Katsiropoulos et Pantelakis [53] ont fait un choix différent en décidant de normaliser les indicateurs de performance en les divisant par la valeur de ces indicateurs pour le procédé de fabrication en autoclave choisi comme référence.

#### 7.4.1.4. Evaluation des facteurs de pondération

Dans ces définitions, les facteurs de pondération  $\lambda_i$  sont l'expression de préférences entre les indicateurs. Leur évaluation dépend en fait d'un choix de la part de la personne qui déploie la méthode proposée dans ce chapitre. Afin de déterminer les valeurs à utiliser pour ces facteurs de pondération  $\lambda_i$ , une méthode de comparaison par paires est appliquée. Cette méthode, développée par Thurstone [110], [111] pour classer une liste d'éléments par ordre d'importance est appliquée. Cette approche se base sur le jugement de l'utilisateur de la méthode, ce qui est un avantage puisque cela permet de s'adapter aux exigences de chaque utilisateur. Avec cette méthode, une matrice est d'abord construite grâce à la comparaison deux à deux des importances relatives de chacun des éléments comparés. Ces importances relatives sont exprimées grâce à l'échelle de valeurs qui est présentée dans le Tableau 41. Dans nos travaux, les éléments comparés sont les indicateurs environnementaux, économiques et techniques.

Tableau 41 : Echelle d'évaluation pour la comparaison par paires des indicateurs utilisés.

Évaluation numérique	Évaluation verbale
1	Importance égale entre les indicateurs
3	Un indicateur est un peu plus important que l'autre
5	Un indicateur est plus important que l'autre
7	Un indicateur est beaucoup plus important que l'autre
9	Un indicateur est absolument plus important que l'autre
2, 4, 6, 8	Valeurs intermédiaires entre deux jugements, utilisées pour affiner le jugement

Une fois la matrice de comparaison établie, des indicateurs d'importance sont calculés. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour calculer ces indicateurs, aboutissant à des résultats de quantification différents. Il est par exemple possible de faire la moyenne arithmétique ou géométrique sur les lignes ou les colonnes. Dans ces travaux, on utilise une autre approche qui consiste à utiliser les valeurs du vecteur propre associé à la valeur propre la plus élevée de la matrice car il s'agit de la méthode la plus souvent employée [57]. Les indicateurs d'importance ainsi calculés sont alors choisis comme facteurs de pondération  $\lambda_i$ .

#### 7.4.2. Application au choix de paramètre de thermoformage-estampage

##### 7.4.2.1. Définition de l'indicateur

Dans le cas du thermoformage-estampage étudié dans ce chapitre, l'indicateur agrégé  $I_1$  s'écrit :

$$I_1 = \lambda_{\text{climate change}} \cdot N_{\text{climate change}} + \lambda_{\text{coût}} \cdot N_{\text{coût}} - \lambda_{\text{ILSS}} \cdot N_{\text{ILSS}}$$

Pour cet indicateur, six scénarios ont été étudiés pour calculer différentes configurations de facteurs de pondération :

#### Scénario 1 : Scénario mixte techno-enviro-centré

Les aspects techniques et environnementaux sont d'importance équivalente et les aspects économiques sont d'importance inférieure.

#### Scénario 2 : Scénario mixte techno-éco-centré

Les aspects techniques et économiques sont d'importance équivalente et les aspects environnementaux sont d'importance inférieure.

#### Scénario 3 : Scénario enviro-centré

Les aspects techniques et économiques sont d'importance équivalente et les aspects environnementaux sont d'importance supérieure.

#### Scénario 4 : Scénario éco-centré

Les aspects techniques et environnementaux sont d'importance équivalente et les aspects économiques sont d'importance supérieure.

#### Scénario 5 : Scénario techno-centré avec sensibilité environnementale

Les aspects techniques sont les plus importants, suivis des aspects environnementaux puis des aspects économiques.

#### Scénario 6 : Scénario techno-centré avec sensibilité économique

Les aspects techniques sont les plus importants, suivis des aspects économiques puis des aspects environnementaux.

#### 7.4.2.2. Calcul des facteurs de pondération

Avec la méthode de comparaison par paires, les matrices de comparaison sont construites pour chacun des scénarios. Le Tableau 42 présente un exemple de ce type de matrice, construite dans ce cas pour le scénario **mixte techno-éco-centré** (scénario 2). Dans cet exemple, l'indicateur économique est jugé plus important que l'indicateur environnemental (donnant lieu à une notation de 5 d'après le Tableau 41). Les aspects économiques et techniques sont jugés d'importance équivalente (la note de 1 est utilisée). L'exploitation de ces matrices permet d'obtenir les coefficients de pondérations associés à chacun des scénarios qui sont présentés sur la Figure 115. Pour cela, le vecteur propre associé à la plus grande valeur propre est utilisé comme pondération pour chacun des trois indicateurs. Dans le cas de l'exemple présenté dans le Tableau 42 pour le scénario mixte techno-éco-centré (scénario 2), la plus grande valeur propre vaut 3 et est associée au vecteur propre [0,70 ; 0,14 ; 0,70]. En normalisant les valeurs de ce vecteur propre, on obtient les facteurs de pondérations associés à ce scénario :  $\lambda_{Climate\ change} = 9\%$ ,  $\lambda_{Coût} = \lambda_{ILSS} = 45\%$ .

Tableau 42 : Matrice de comparaison par paires construite pour le scénario mixte techno-éco centré (scénario 2) utilisé avec l'indicateur  $I_1$ .

Indicateurs	Coût (€)	Climate change (kg CO <sub>2</sub> eq)	ILSS (MPa)
Coût (€)	1,0	5,0	1,0
Climate change (kg CO <sub>2</sub> eq)	0,2	1,0	0,2
ILSS (MPa)	1,0	5,0	1,0

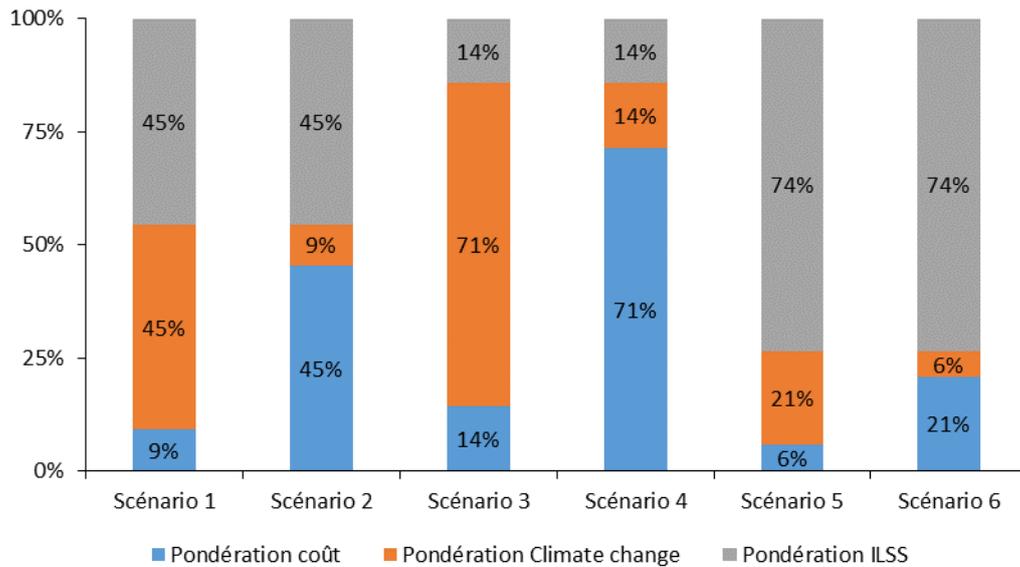


Figure 115 : Coefficients de pondération du coût ( $\lambda_{\text{coût}}$ ), de l'impact environnemental Climate change ( $\lambda_{\text{climate change}}$ ) et de la résistance mécanique ILSS ( $\lambda_{\text{ILSS}}$ ) de l'indicateur  $I_1$  pour les 6 scénarios étudiés.

#### 7.4.2.3. Identification des réglages de paramètres par minimisation de l'indicateur $I_1$

Pour chacun de ces six scénarios, l'indicateur  $I_1$  est exprimé sous la forme d'une fonction Python. Ces fonctions sont ensuite minimisées en utilisant la méthode *minimize* de la librairie *scipy* [112]. L'application de cette méthode de minimisation nécessite de définir une configuration de paramètres pour son initialisation. Une complexité de cette étape réside dans la possibilité d'erreurs de minimisation qui identifieraient un minimum local de la fonction  $I_1$ . Pour éviter cela, plusieurs configurations de paramètres initiaux sont testées pour chaque scénario étudié. Les résultats de ces travaux de minimisation sont présentés dans le Tableau 38. Ils permettent d'identifier une solution unique de configuration de paramètres qui minimise l'indicateur  $I_1$ . Ces configurations de paramètres sont celles qui devront être choisies en phase de production selon les différents scénarios étudiés.

Tableau 43 : Paramètres du procédé identifiés après la minimisation de l'indicateur agrégé  $I_1$ .

Scénario	H paramètre (%)	T <sub>IR</sub> consigne (°C)	T <sub>moule</sub> consigne (°C)	P consolidation (MPa)	Coût (€)	Climate change (kg CO <sub>2</sub> eq)	ILSS (MPa)
1	100	370	50	2,2	9,49	1,92	63
2	100	310	230	6,0	9,69	2,02	68
3	100	310	50	6,0	9,34	1,91	60
4	100	310	50	6,0	9,34	1,91	60
5	100	370	230	2,2	9,86	2,04	68
6	100	370	230	2,2	9,86	2,04	68

L'approche par indicateur agrégé qui vient d'être présentée et appliquée au cas du thermoformage-estampage de C/PPS permet d'apporter une réponse au problème de choix d'une configuration de paramètres avec des objectifs environnementaux, économiques et techniques. L'utilisation de l'indicateur  $I_1$  proposée par Katsiropoulos et Pantelakis [53] implique la recherche de la configuration de paramètres qui minimise le coût, l'impact environnemental et maximise aussi les performances techniques. Par conséquent, **la solution donnée par la recherche de l'optimum de l'indicateur  $I_1$  ne répond pas tout à fait à la problématique rencontrée en production dans l'industrie, où la qualité technique des pièces est considérée comme un niveau à respecter fixé par le cahier des charges**

**plutôt que des propriétés à maximiser.** Avec la définition de l'indicateur agrégé  $I_1$ , les configurations de paramètres identifiées peuvent emmener à produire des pièces présentant une surqualité, au détriment des objectifs de réduction de l'impact environnemental et du coût de production. Bien que cette approche puisse être pertinente dans le cas où la qualité technique veut être maximisée, la réponse au problème traité dans ce chapitre nécessite de modifier la définition de l'indicateur agrégé qui sera utilisé.

#### 7.4.3. Définition d'un nouvel indicateur pour la prise en compte de la problématique de respect de critères techniques

##### 7.4.3.1. Définition d'un nouvel indicateur agrégé $I_2$

Un second indicateur  $I_2$  est défini dans le but de mieux répondre au type de problématique qui est rencontrée dans l'industrie : réduire le coût et l'impact environnemental du procédé tout en assurant la conformité des pièces produites au cahier des charges, matérialisée par un seuil minimal de qualité technique. Pour cela,  $I_2$  n'intègre pas directement la dimension technique dans sa définition :

$$I_2 = \lambda_{Impact\ environnemental} \cdot N_{Impact\ environnemental} + \lambda_{coût} \cdot N_{coût}$$

Avec cet indicateur  $I_2$ , la prise en compte de la dimension technique de la performance du procédé est réalisée lors de l'étape de minimisation de l'indicateur par la définition d'une contrainte de qualité technique.

##### 7.4.3.2. Application au cas du thermoformage-estampage

Dans le cas du thermoformage-estampage, l'indicateur  $I_2$  est défini comme :

$$I_2 = \lambda_{Climate\ change} \cdot N_{Climate\ change} + \lambda_{coût} \cdot N_{coût}$$

Trois scénarios différents sont étudiés :

##### Scénario 1 : Scénario mixte

Les aspects économiques et environnementaux sont d'importance équivalente.

##### Scénario 2 : Scénario enviro-centré

Les aspects environnementaux sont plus importants que les aspects économiques.

##### Scénario 3 : Scénario éco-centré

Les aspects économiques sont plus importants que les aspects environnementaux.

Avec la méthode de comparaison par paires, les facteurs de pondération  $\lambda_i$  de ces scénarios sont établis. Pour le scénario enviro-centré (scénario 2), la matrice de comparaison est présentée dans le Tableau 44. Le critère environnemental étant plus important que le critère économique, la valeur de 5 est assignée à la case correspondant à cette comparaison conformément aux règles établies dans le Tableau 41.

Tableau 44 : Matrice de comparaison par paire construite pour le scénario enviro-centré (scénario2) utilisé avec l'indicateur  $I_2$ .

Indicateurs	Coût (€)	Climate change (kg CO <sub>2</sub> eq)
Coût (€)	1,0	0,2
Climate change (kg CO <sub>2</sub> eq)	5,0	1,0

L'exploitation des matrices ainsi construites permet ensuite d'établir les valeurs des pondérations de chaque scénario qui sont présentés sur la Figure 116. Pour le scénario enviro-centré, le traitement de la matrice du Tableau 44 permet d'identifier une valeur propre maximale égale à 2, associée au vecteur propre  $[0,20 ; 0,98]$ . Après normalisation, on obtient pour ce scénario les pondérations suivantes :  $\lambda_{Climate\ change} = 83\%$ ,  $\lambda_{Coût} = 17\%$ .

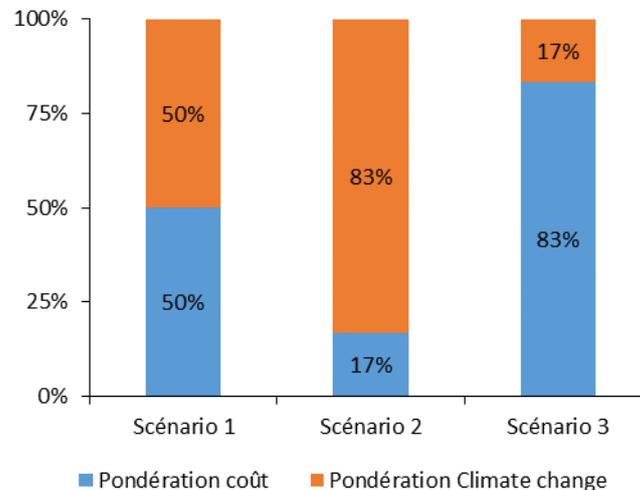


Figure 116 : Facteurs de pondération du coût ( $\lambda_{Coût}$ ) et de l'impact environnemental Climate change ( $\lambda_{Climate\ change}$ ) de l'indicateur  $I_2$  pour les 3 scénarios étudiés.

Avec ces facteurs de pondération, l'indicateur  $I_2$  est exprimé pour chaque scénario sous la forme d'une fonction en Python. Il est ensuite minimisé pour chaque scénario avec une contrainte de résistance au cisaillement interlaminaire de 65 MPa en utilisant la librairie *scipy* de Python et sa fonction *minimize*. Comme précédemment, plusieurs configurations initiales de paramètres du procédé sont utilisées lors de la minimisation afin d'éviter de conserver un minimum local comme solution. Les résultats de ces calculs sont présentés dans le Tableau 45. Seulement deux configurations de paramètres minimisent l'indicateur  $I_2$  pour les trois scénarios étudiés. Ces deux configurations de paramètres sont semblables à celles identifiées avec la méthode graphique d'exploitation des modèles (Tableau 40).

Tableau 45 : Paramètres du procédés identifiés après la minimisation de l'indicateur agrégé  $I_2$ .

Scénario	H paramètre (%)	T <sub>IR</sub> consigne (°C)	T <sub>moule</sub> consigne (°C)	P consolidation (MPa)	Coût (€)	Climate change (kg CO <sub>2</sub> eq)	ILSS (MPa)
1	100	370	118	2,2	9,63	1,97	65
2	100	370	118	2,2	9,63	1,97	65
3	100	310	158	6,0	9,55	1,98	65

#### 7.4.4. Synthèse

Dans cette section, la méthode de choix de paramètres des procédés composites grâce à la définition puis l'optimisation d'un indicateur agrégé, initialement développée par Katsiropoulos et Pantelakis [53], a été appliquée puis adaptée aux objectifs de réduction de l'impact environnemental et du coût de procédés composites avec comme contrainte le respect de critères de qualité technique des pièces. Pour cela, un nouvel indicateur agrégé a été défini afin de mieux répondre aux types de problématiques rencontrées dans l'industrie et d'éviter de développer une surqualité des pièces produites au détriment des objectifs économiques et environnementaux. Afin de valider cette approche, elle a pu être appliquée avec succès pour déterminer, pour plusieurs scénarios, la

configuration optimale de paramètres à utiliser pour fabriquer des pièces plaques en C/PPS par thermoformage estampage.

La méthodologie proposée dans cette section présente l'avantage de diminuer la complexité du problème multicritère à l'étude d'un seul indicateur. Cela permet d'appliquer des stratégies d'optimisation qui fournissent une solution unique au problème posé et répondant complètement à la problématique du choix de paramètre qui est traitée dans ce chapitre. Un inconvénient de cette méthodologie consiste cependant en sa mise en œuvre qui nécessite de maîtriser des outils d'optimisation afin d'éviter, par exemple, des erreurs d'identification des solutions dues à la considération d'extremums locaux plutôt que globaux de l'indicateur agrégé. L'application de cette méthodologie nécessite aussi la normalisation des indicateurs environnementaux, économiques et techniques. Pour cela, plusieurs méthodes existent parmi lesquelles nous avons fait un choix. L'approfondissement de l'influence du choix de la méthode de normalisation est alors une perspective d'amélioration de cette méthodologie.

Un avantage de la méthode détaillée dans cette section est sa flexibilité puisqu'elle peut être appliquée dans différents contextes et s'adapter aux objectifs de chaque utilisateur, grâce à son système de pondérations. C'est d'ailleurs ce qui a pu être démontré par son application à plusieurs scénarios de préférences entre les enjeux économiques et environnementaux. Néanmoins, une problématique sous-jacente à cette flexibilité est le caractère subjectif des jugements sur lesquels se base le calcul des pondérations qui rend les résultats dépendant de l'utilisateur, posant ainsi des problèmes de reproductibilité.

## 7.5. Choix parmi les optimums de Pareto

### 7.5.1. Présentation conceptuelle

Afin de choisir les réglages des paramètres du procédé étudié, une approche développée consiste à utiliser la définition d'optimalité de Pareto qui considère optimales les configurations de paramètres pour lesquelles il est impossible d'améliorer un indicateur de performance sans en dégrader un autre. D'un point de vue pratique, l'approche développée dans nos travaux consiste à rechercher les optimums de Pareto avec deux objectifs : la diminution du coût et de l'impact environnemental du procédé. Le critère de qualité technique est pris en compte par la définition d'une contrainte dans la procédure de recherche des optimums. La recherche d'optimums de Pareto sous contrainte de qualité technique permet d'identifier des solutions au problème multi-objectifs de choix de paramètre sans avoir besoin de choisir un ordre d'importance entre l'indicateur environnemental et économique. Cette approche réduit le problème initial de choix de paramètres dans un espace continu en un problème discret de choix parmi une quantité réduite de configurations de paramètres. Une description de cette méthode est présentée sur la Figure 117.

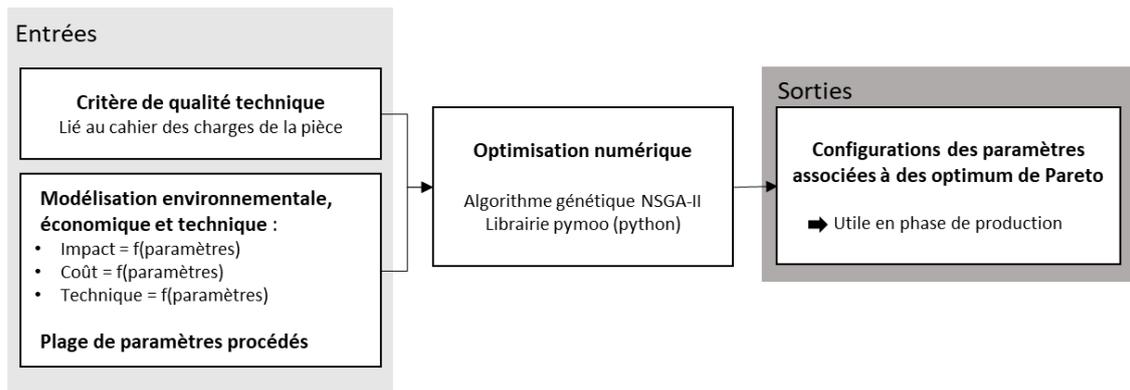


Figure 117 : Méthodologie de choix de paramètres par la recherche d'optimum de Pareto.

### 7.5.2. Application au thermoformage-estampage

La méthode de choix de paramètre basée sur la recherche d'optimum de Pareto est appliquée sur le cas du procédé de thermoformage-estampage. Pour cela, l'algorithme NSGA-II de la librairie *pymoo* [113] de python est utilisé avec une taille de population égale à 100 et un nombre de générations égal à 200. Une contrainte de résistance minimale au cisaillement interlaminaire de 65 MPa a alors été défini. Les résultats obtenus avec cette approche sont présentés dans le Tableau 46. Ils permettent d'identifier deux configurations de paramètres optimales au sens de Pareto. Pour exploiter ces résultats en production, il est nécessaire de faire un choix entre ces deux solutions qui dépendra de l'inclination de l'utilisateur à favoriser les aspects environnementaux ou économiques.

Tableau 46 : Solutions de Pareto identifiées avec une contrainte de résistance au cisaillement interlaminaire de 65 MPa.

	H <sub>paramètre</sub> (%)	T <sub>IR consigne</sub> (°C)	T <sub>moule consigne</sub> (°C)	P <sub>consolidation</sub> (MPa)	Coût (€)	Climate change (kg CO <sub>2</sub> eq)	ILSS (MPa)
<b>Solution 1</b>	100	370	118	2,20	9,63	1,97	65
<b>Solution 2</b>	100	310	159	5,99	9,55	1,98	65

Une remarque intéressante sur ces résultats est qu'ils coïncident avec les résultats précédemment obtenus pour une contrainte de résistance mécanique de 65 MPa avec la méthode de l'indicateur agrégé (Tableau 45) et avec ceux obtenus par la méthode graphique (Tableau 40). Une comparaison de ces résultats est présentée dans le Tableau 47. On retrouve par exemple la même solution que celle identifiée avec l'indicateur agrégé  $I_2$  pour le scénario éco-centré. L'autre solution identifiée correspond aussi à une solution identifiée avec l'indicateur agrégé, avec cependant une différence d'1 °C pour la température de consigne et de 10 kPa pour la pression de consolidation entre ces deux solutions. Néanmoins, ces légères différences n'impliquent pas d'écarts significatifs entre le coût et l'impact environnemental des solutions trouvées avec les différentes méthodes.

Tableau 47 : Comparaison entre les résultats obtenus avec l'approche de Pareto et ceux obtenus avec les autres méthodes pour le cas d'une contrainte de résistance au cisaillement interlaminaire fixée à 65 MPa.

	H <sub>paramètre</sub>	T <sub>IR consigne</sub>	T <sub>presse consigne</sub>	P <sub>consolidation</sub>	Coût	Climate change
<b>Méthode graphique</b>	=	=	+2 °C	=	+1 ct	=
	=	=	+1 °C	+10 kPa	=	=
<b>Indicateur agrégé (<math>I_2</math>)</b>	=	=	=	=	=	=
	=	=	-1 °C	+10 kPa	=	=

Solution 1 ; Solution 2 ; = : même valeur

### 7.5.3. Synthèse

Dans cette section, une stratégie basée sur la définition d'optimalité de Pareto a été proposée pour identifier les réglages de paramètres qui permettent de répondre aux objectifs de réduction du coût et de l'impact environnemental du procédé tout en assurant une qualité technique des pièces conforme aux attentes. L'application de cette méthodologie au cas du thermoformage-estampage a permis de valider sa capacité à proposer des solutions à ce problème en réduisant l'ensemble des possibilités de réglages du procédé à un nombre fini de configurations de paramètres. Un inconvénient de cette approche est cependant qu'il n'y a pas systématiquement unicité des solutions. Dans ce cas, il est alors nécessaire de faire un choix parmi les différents optimums de Pareto identifiés afin de trouver le meilleur compromis entre les objectifs environnementaux et économiques.

L'avantage de cette approche réside dans le fait qu'elle ne nécessite pas d'établir un ordre d'importance entre les critères environnementaux, économiques et techniques au travers des pondérations, ce qui la rend indépendante de l'utilisateur. De plus, aucune normalisation des indicateurs environnementaux, économiques et technique n'est nécessaire avec cette approche, ce qui permet d'éviter le choix d'une méthode de normalisation qui peut influencer les résultats obtenus. Cependant, la mise en œuvre du processus d'optimisation peut être complexe car elle nécessite de maîtriser des outils de minimisation pour s'assurer la convergence des résultats.

## 7.6. Conclusion

Dans ce chapitre, trois méthodes différentes sont proposées pour aider au choix de paramètres afin de répondre au problème multi-objectifs de diminution de l'impact environnemental et du coût des procédés composites sous contrainte de qualité technique des pièces produites. L'application de ces méthodes au cas du thermoformage-estampage a permis de valider que ces méthodologies apportent une solution à la problématique de choix de paramètres traitée dans ce chapitre. Cela a également mis en évidence la cohérence des résultats fournis par les différentes méthodes qui sont proposées puisque les mêmes configurations de paramètres ont par exemple été identifiées comme optimales pour un critère de résistance mécanique de 65 MPa.

L'application de ces trois méthodes a aussi permis de faire ressortir les avantages et les inconvénients de chacune qui sont présentés dans le Tableau 48. Tout d'abord, la méthode graphique de choix de paramètre est intéressante car elle permet de visualiser le comportement du système qui était initialement traduit par les modèles économique, environnemental et technique. Cette approche semble donc réduire la complexité d'interprétation des modèles en facilitant leur compréhension, ce qui a d'ailleurs été le ressenti des industriels du programme PERFORM de l'IRT Jules Verne lors des présentations et échanges autour de nos travaux. La complexité de cette approche réside par contre dans le tracé des surfaces de réponse et des courbes iso-critères car il nécessite de choisir un certain nombre de facteurs de tracés (ensemble des configurations de paramètres procédés étudiés, pas de paramètres). Une perspective de travail sur cette méthode consiste donc à établir une procédure plus détaillée pour le tracé des graphiques. La méthode de minimisation d'indicateurs agrégés présente quant à elle l'avantage de diminuer la complexité du problème multi-objectifs en le transformant en un problème monocritère. Un autre point positif de cette méthode est qu'elle permet d'identifier une unique configuration optimale de réglages du procédé, contrairement aux approches graphique et d'optimum de Pareto. Avec cette méthodologie, la définition des facteurs de pondérations se base sur le jugement de préférence entre les trois indicateurs de performance utilisés. L'avantage est alors que cette méthode peut s'adapter à de nombreux scénarios selon les besoins industriels. Cependant, cela pose aussi de potentiels problèmes de reproductibilité liés à l'utilisation de jugements subjectifs de celui qui réalise l'étude pour le calcul des pondérations. Une piste de poursuite de ces travaux consiste donc en l'approfondissement de procédures pour établir des scénarios de pondération en faisant appel par exemple à des questionnaires pour solliciter l'avis de plusieurs parties prenantes (industriels, experts du domaine, ...). Concernant l'étape de normalisation de cette méthode, une approche a été choisie dans nos travaux parmi toutes les normalisations possibles. Une perspective de poursuite de ces travaux consiste donc à évaluer l'influence de la méthode de normalisation sur les résultats obtenus. Concernant enfin la méthode de recherche d'optimum de Pareto présentée dans ce chapitre, elle a l'avantage de ne nécessiter aucun jugement subjectif sur l'ordre d'importance des trois critères étudiés, contrairement à la méthode utilisant un indicateur agrégé. Cependant, elle partage les mêmes difficultés que la méthode de minimisation d'un indicateur agrégé : la mise en œuvre du processus de recherche d'optimum peut être complexe. Pour terminer, une perspective de ce travail consiste à appliquer ces approches à d'autres cas que le thermoformage-estampage de façon à les améliorer et de consolider l'analyse comparative de ces méthodes.

Tableau 48 : Bilan des avantages et inconvénients des méthodes de choix de paramètres proposées.

Méthode	Avantages	Inconvénients
<b>Méthode graphique</b>	+ Méthode visuelle + Facilite l'analyse	- Nécessite de bien choisir les paramètres de tracé - Unicité de la solution non systématique
<b>Indicateur agrégé</b>	+ Diminue la complexité du problème + Unicité de la solution + Adaptée à différents scénarios (choix de pondérations)	- Repose sur un choix subjectif de pondération - Minimisation complexe à mettre en œuvre - Incertitude sur la méthode de normalisation
<b>Optimum de Pareto</b>	+ Pas de pondérations et normalisations	- Minimisation complexe à mettre en œuvre - Unicité de la solution non systématique

# Chapitre 8

## Conclusion générale

---

8.1. Synthèse.....	182
8.2. Bilan des contributions .....	183
8.3. Perspectives .....	184

---

## 8.1. Synthèse

Dans le contexte de transition environnementale de l'industrie, nos travaux se sont focalisés sur l'étape de fabrication de pièces en composites à matrices organiques avec pour objectif de participer à la réduction de son impact environnemental. Le choix d'étudier cette famille de matériaux a été motivé par le développement de leur utilisation depuis plusieurs années ainsi que par le potentiel de réduction des impacts environnementaux de leur utilisation pour certaines applications de transport comme dans l'aéronautique. En effet, le remplacement de pièces métalliques par des pièces composites à matrice polymère entraîne un allègement des structures qui permet, grâce aux économies de carburants effectuées, de réduire l'impact environnemental des pièces sur leur cycle de vie complet, en plus d'une réduction des coûts d'exploitation. Ces travaux se sont concentrés en particulier sur les composites à matrice thermoplastique. L'enjeu était de déterminer comment évaluer les impacts environnementaux des procédés d'élaboration de composites puis comment exploiter les résultats obtenus en vue d'atteindre l'objectif de réduction des impacts sous les contraintes technico-économiques du monde industriel. Afin de répondre à cette problématique, nous avons proposé d'apporter une solution méthodologique générique dans l'idée qu'elle puisse s'adapter aux différentes configurations de production et couples matériaux-procédés rencontrés dans l'industrie. Pour cela, nos travaux se sont particulièrement intéressés au cas du thermoformage-estampage couramment utilisé dans l'industrie aéronautique, ce qui a permis de développer et valider les différentes approches proposées.

En premier lieu, nous nous sommes intéressés aux méthodes décrites dans la littérature pour évaluer les impacts environnementaux de la fabrication de pièces composites dans le but d'en réduire les impacts environnementaux. L'analyse de l'état de l'art a permis de montrer que la méthode standardisée d'Analyse de Cycle de Vie était systématiquement utilisée pour les évaluations environnementales des procédés composites. Néanmoins, un verrou méthodologique a tout de même été identifié : aucun consensus n'a été observé sur la façon d'appliquer les différentes étapes de cette méthode qui est très générale puisqu'elle a été conçue pour être applicable à l'évaluation environnementale de n'importe quel système. Certains travaux ont par exemple montré la dépendance des impacts environnementaux des procédés de fabrication de pièces composites aux réglages de leurs paramètres, mais aucune méthode n'a permis d'établir comment intégrer cela lors du processus d'évaluation environnementale.

Afin d'exploiter les résultats environnementaux dans un contexte industriel, il est nécessaire de les coupler à des analyses techniques et économiques qui conditionnent aussi le bon fonctionnement des entreprises de ce secteur. Sur ce sujet, l'analyse de l'état de l'art a également montré plusieurs verrous : il n'existe pas de convention sur les postes de coûts à intégrer dans l'évaluation économique ni sur les outils d'aide à la décision multicritère à exploiter, notamment en raison du petit nombre d'outils qui ont été proposés pour traiter le cas des procédés composites.

Pour répondre aux verrous identifiés lors de l'analyse de l'état de l'art, nos travaux se sont structurés autour de deux enjeux : l'évaluation du processus de fabrication d'un point de vue environnemental mais aussi technico-économique et l'exploitation des résultats de l'analyse pour aider la prise de décision. Des précisions pour l'application de la méthode ACV aux procédés composites ont ainsi été proposées dans les chapitres 3, 4 et 5 qui traitent respectivement des étapes de définition du périmètre de l'étude, d'analyse d'inventaire et de l'évaluation des impacts environnementaux et du coût. Pour compléter les informations d'inventaire, l'utilisation de modèles physiques du procédé a aussi été développée dans le chapitre 6 de ce mémoire. De plus, des travaux sur l'exploitation des résultats des évaluations environnementales et économiques ont pu être présentés dans le chapitre 5 qui détaille des méthodes d'exploitation distinctes des modèles environnementaux et économiques.

Ces travaux ont alors été complétés dans le chapitre 7 qui traite également de cet enjeu d'exploitation des résultats des analyses mais avec une approche multicritère intégrant les aspects environnementaux, économiques et techniques.

## 8.2. Bilan des contributions

Dans nos travaux, les contributions majeures que nous pouvons mettre en avant sont méthodologiques, appuyées par leur mise en œuvre réussie sur le cas du thermoformage-estampage de C/PPS. Des apports intéressants résultent également des travaux sur le cas du thermoformage-estampage. Ces contributions s'articulent en six points :

- **Méthode de définition du périmètre de l'étude :**  
Définition sous la forme d'un arbre des processus dans un périmètre combiné à la prise en compte des enjeux de qualité technique des pièces produites par l'identification de plages de réglages dans lesquelles est restreinte la mise en œuvre du procédé afin de produire des pièces conformes aux attentes de qualité technique.
- **Méthode d'analyse d'inventaire :**
  - Méthodologie d'aide au choix de la méthode initiale de collecte de données pour chaque flux d'inventaire et définition d'un indicateur de criticité qui permet d'établir les flux à améliorer en priorité pour augmenter le niveau de confiance dans les résultats de l'étude.
  - Méthodes de collecte de données d'inventaire puis d'exploitation des résultats pour la modélisation des données d'inventaire sous la forme de fonctions qui dépendent des paramètres du procédé.
  - Outils de simulation physique pour le calcul de données complémentaires de consommation d'énergie et de matériau qui permettent l'identification des potentiels de réduction de ces flux.
- **Méthode de calcul d'impacts environnementaux et de coût :**  
Construction de modèles environnementaux et économiques sous la forme de fonctions des paramètres du procédé à partir des modèles d'inventaire.
- **Méthode d'exploitation des résultats pour apporter des réponses à l'objectif de réduction des impacts environnementaux :**
  - Méthode d'identification des postes d'impacts environnementaux et de coût les plus importants pour identifier des pistes d'amélioration du procédé étudié.
  - Méthode d'identification des paramètres les plus influents sur lesquels jouer en priorité.
  - Proposition et comparaison d'outils d'analyse multicritère pour aider au choix du réglage des paramètres du procédé par rapport à des objectifs de réduction de l'impact environnemental et du coût ainsi que de respect de la qualité technique attendue.
- **Données d'inventaire pour le procédé de thermoformage-estampage de C/PPS :**  
Des modèles d'inventaire sont proposés pour le procédé de thermoformage-estampage, qui avait été étudié d'un point de vue environnemental dans un seul article à notre connaissance [35]. Bien que développées à l'échelle du laboratoire, ces données sont cohérentes avec l'échelle plus industrielle des équipements de l'IRT Jules Verne.
- **Pistes d'amélioration du procédé de thermoformage-estampage :**  
L'évaluation environnementale du procédé a permis d'identifier la surconsommation de matériau C/PPS et les consommations d'énergie des étapes de chauffage et d'estampage comme postes principaux d'impacts. La mise en œuvre de méthodes de modélisation physique

pour le calcul de données d'inventaire de consommations d'énergie et de matériau ont d'ailleurs permis de valider le fort potentiel de réduction de ces flux d'inventaire. Des pistes d'amélioration ont par conséquent pu être proposées, comme par exemple l'isolation thermique des outillages. Par ailleurs, la température du moule de la presse et le nombre de pièces produites dans une série ont été identifiés comme les paramètres qui influencent le plus l'impact environnemental du procédé. Cela a permis de préconiser une réduction de la température de moule et une augmentation de la taille des séries pour réduire l'impact environnemental du procédé.

### 8.3. Perspectives

Les travaux que nous avons réalisés ouvrent la voie à un certain nombre de perspectives parmi lesquelles nous avons choisi de mettre en avant les points suivants :

- **Améliorer la méthodologie pour son intégration dans le monde industriel :**  
L'objectif visé serait de favoriser la pénétration de la méthodologie dans le monde industriel en facilitant sa mise en œuvre. L'application de la méthodologie proposée dans ce mémoire à d'autres procédés composites serait alors l'occasion d'identifier les difficultés qui peuvent être rencontrées. Cela aiderait à l'améliorer et à généraliser les approches proposées qui n'ont pour l'instant été appliquées qu'au thermoformage-estampage.
- **Comparer des procédés :**  
L'application de la méthodologie à d'autres procédés serait également l'occasion d'accumuler des données environnementales de différents procédés composites qui prennent en compte l'influence des réglages des procédés sur les impacts environnementaux, le coût et la qualité technique des pièces produites. De telles données seraient pertinentes dans la perspective de faire des comparaisons de procédés. Elles permettraient de prendre en compte le niveau de qualité technique des pièces qui est attendu dans la comparaison et de voir si cela influence le choix du procédé : pour deux niveaux de qualité différents, est-ce que la comparaison de plusieurs procédés fait toujours ressortir le même procédé comme le moins impactant sur l'environnement ?
- **Étendre l'exploitation des résultats de l'application de la méthodologie à d'autres pièces ou matériaux :**  
Les résultats de l'approche proposée dans ce mémoire de thèse sont spécifiques à la géométrie de la pièce étudiée et à son matériau constitutif. Dans nos travaux, on s'est en effet concentré sur le cas de pièces plaques en C/PPS. La question qui peut alors se poser est la suivante : dans quelle mesure les résultats de l'étude d'une ligne de production mise en œuvre pour la fabrication d'une pièce donnée dans un matériau fixé peut être exploitée pour le cas d'une autre pièce ou la mise en forme d'un matériau différent ? Pour répondre à cette question, un premier travail sur le procédé de thermoformage-estampage en faisant varier la géométrie et les matériaux des pièces serait l'occasion d'évaluer l'influence de ces deux paramètres sur les résultats environnementaux. Ces travaux seraient ensuite l'occasion de compléter la méthodologie proposée dans ce mémoire avec une approche permettant d'étendre l'exploitation des résultats obtenus sur une pièce à d'autres pièces.
- **Développer les méthodes d'exploitation multicritères pour la prise en compte de problèmes plus complexes :**  
Dans le chapitre 7, les méthodes d'aide à la décision multicritère proposées ont été mises en œuvre pour le choix de réglages du procédé de thermoformage-estampage selon trois indicateurs : un indicateur économique, un indicateur environnemental (*Climate change*) et un indicateur technique (ILSS). Une perspective serait alors d'étendre ces méthodes aux cas

ou un nombre plus important d'indicateurs doit être pris en compte. C'est par exemple le cas en pratique lorsque le cahier des charges d'une pièce établit plusieurs critères de qualité techniques à respecter comme des critères de respect de la géométrie et de résistance mécanique des pièces.

# Références

- [1] P. Robert, 'Le "smog" : quand la pollution de l'air a tué 12 000 Londoniens', France culture, 2022. <https://www.radiofrance.fr/franceculture/grand-smog-quand-la-pollution-de-l-air-a-tue-12-000-londoniens-1340681> (consulté le 28 avril 2023).
- [2] GIEC, 2021 : Résumé à l'intention des décideurs. In: Changement climatique 2021: les bases scientifiques physiques. Contribution du Groupe de travail I au sixième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [publié sous la direction de Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, et B. Zhou]. Cambridge University Press.
- [3] IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- [4] IPCC, 2023: *Climate Change 2023: Synthesis Report*. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, (in press)
- [5] UN, 'Sustainable Development Goals', 2015. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/> (consulté le 15 novembre 2022).
- [6] 'Règlement (CE) no 1907/2006', Off. J. Eur. Union, 2007.
- [7] 'Plan de Soutien à l'Aéronautique : pour une industrie verte et compétitive', 2020. <https://www.economie.gouv.fr/plan-soutien-aeronautique> (consulté le 18/04/2023).
- [8] 'ISO 14001:2015 - Management environnemental', 2015.
- [9] EMC2, 'Soutenez l'industrie éco-responsable !', 2020. <https://www.pole-emc2.fr/soutenez-industrie-eco-responsable/> (consulté le 21 avril 2023).
- [10] G. H. Brundtland et al., 'Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development', 1987.
- [11] H. T. Lee, J. Hyeon, S. Soo, H. Min, H. Sung, L. Ki, Y. Song et C. Nam, 'Research Trends in Sustainable Manufacturing : A Review and Future Perspective based on Research Databases', Int. J. Precis. Eng. Manuf. Technol., no. 0123456789, 2019, doi: 10.1007/s40684-019-00113-5.
- [12] 'The composites industry bounces back at different speeds', JEC Compos. Mag., no. April-May, 2023.
- [13] B. Y. Zeyrek, B. Aydogan, E. Dilekcan et O. Fahrettin, 'Review of Thermoplastic Composites in Aerospace Industry', Int. J. Eng. Technol. Informatics, vol. 3, no. 1, pp. 1–6, Jun. 2022, doi: 10.51626/ijeti.2022.03.00031.
- [14] 'Sprouting growth of thermoplastic composites in Aerospace. Market Research Firm.' <https://www.stratviewresearch.com/articles/Sprouting-growth-of-Thermoplastic-Composites-in-Aerospace> (consulté le 20 avril 2023).

- [15] J. B. Guinée, R. Heijungs, G. Huppes, A. Zamagni, P. Masoni, R. Buonamici, T. Ekvall et T. Rydberg, 'Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future', *Environ. Sci. Technol.*, vol. 45, no. 1, pp. 90–96, Jan. 2011, doi: 10.1021/es101316v.
- [16] 'ISO 14040 - Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework', 2006.
- [17] K. Kellens, W. Dewulf, M. Overcash, M. Z. Hauschild et J. R. Dufloy, 'Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life cycle inventory (UPLCI) CO2PE! initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 2: case studies', *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 17, no. 2, pp. 242–251, Feb. 2012, doi: 10.1007/s11367-011-0352-0.
- [18] J. R. Dufloy, K. Kellens et W. Dewulf, 'Unit process impact assessment for discrete part manufacturing: A state of the art', *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 4, no. 2, pp. 129–135, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.cirpj.2011.01.008.
- [19] K. Kellens, W. Dewulf, M. Overcash, M. Z. Hauschild et J. R. Dufloy, 'Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life-cycle inventory (UPLCI)—CO2PE! initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 1: Methodology description', *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 17, no. 1, pp. 69–78, Jan. 2012, doi: 10.1007/s11367-011-0340-4.
- [20] 'NF ISO 14955-1 - Machines-outils - Évaluation environnementale des machines-outils - Partie 1 : méthode de conception pour l'efficacité énergétique des machines-outils', 2018.
- [21] 'NF ISO 14955-2 - Machines-outils - Évaluation environnementale des machines-outils - Partie 2 : méthode pour mesurer l'énergie apportée aux machines-outils et aux composants de machines-outils', 2018.
- [22] 'NF ISO 14955-5 - Machines-outils - Évaluation environnementale des machines-outils - Partie 5: Principes d'essai des machines-outils pour le travail du bois concernant l'énergie fournie', 2020.
- [23] 'NF ISO 14955-3 - Machines-outils - Évaluation environnementale des machines-outils - Partie 3: Principes des essais des machines travaillant par enlèvement de métal à l'égard de l'efficacité énergétique', 2020.
- [24] 'NF ISO 14955-4 - Machines-outils - Évaluation environnementale des machines-outils - Partie 4 : principes de mesurage de l'efficacité énergétique des machines-outils de formage des métaux et des machines-outils à laser', 2019.
- [25] R. Hsissou, R. Seghiri, Z. Benzekri, M. Hilali, M. Rafik et A. Elharfi, 'Polymer composite materials: A comprehensive review', *Compos. Struct.*, vol. 262, no. November 2020, p. 113640, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.113640.
- [26] H. R. Shercliff and M. F. Ashby, 'Elastic Structures in Design', in *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, no. June 2015, Elsevier, 2016, pp. 1–8.
- [27] J. Fleischer, R. Teti, G. Lanza, P. Mativenga, H. Möhring et A. Caggiano, 'Composite materials parts manufacturing', *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 67, no. 2, pp. 603–626, 2018, doi: 10.1016/j.cirpj.2018.05.005.

- [28] R. Bernatas, S. Dageou, A. Despax-Ferreres et A. Barasinski, 'Recycling of fiber reinforced composites with a focus on thermoplastic composites', *Clean. Eng. Technol.*, vol. 5, p. 100272, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.clet.2021.100272.
- [29] J. R. Duflou, Y. Deng, K. Van Acker et W. Dewulf, 'Do fiber-reinforced polymer composites provide environmentally benign alternatives? A life-cycle-assessment-based study', *MRS Bull.*, vol. 37, no. 4, pp. 374–382, Apr. 2012, doi: 10.1557/mrs.2012.33.
- [30] A. J. Timmis, A. Hodzic, L. Koh, M. Bonner, C. Soutis, A. W. Schäfer et L. Dray, 'Environmental impact assessment of aviation emission reduction through the implementation of composite materials', *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 20, no. 2, pp. 233–243, Feb. 2015, doi: 10.1007/s11367-014-0824-0.
- [31] R. A. Witik, J. Payet, V. Michaud, C. Ludwig et J.-A. E. Månson, 'Assessing the life cycle costs and environmental performance of lightweight materials in automobile applications', *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 42, no. 11, pp. 1694–1709, Nov. 2011, doi: 10.1016/j.compositesa.2011.07.024.
- [32] C. Fauriel, 'Connaissez-vous la durée de vie maximale d'une voiture essence ?', *AUTONEWS*, 2021. <https://www.autonews.fr/actualite/connaissez-vous-la-duree-de-vie-maximale-d-une-voiture-essence-decryptage-99171>.
- [33] J. Sloan, 'Inside a Thermoplastic Composites Hotbed', *High-Performance Compos. Mag.*, no. January, 2014.
- [34] R. McCool, A. Murphy, R. Wilson, Z. Jiang, M. Price, J. Butterfield et P. Hornsby, 'Thermoforming carbon fibre-reinforced thermoplastic composites', *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.*, vol. 226, no. 2, pp. 91–102, Apr. 2012, doi: 10.1177/1464420712437318.
- [35] S. Wegmann, C. Rytka, M. Diaz-Rodenas, V. Werlen, C. Schneeberger, P. Ermanni, B. Caglar, C. Gomez et V. Michaud, 'A life cycle analysis of novel lightweight composite processes: Reducing the environmental footprint of automotive structures', *J. Clean. Prod.*, vol. 330, no. October 2021, p. 129808, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129808.
- [36] A. Forcellese, T. Mancina, M. Simoncini, S. Gentili, M. Marconi, A. Vita, A. Nardinocchi et V. Castorani, 'Comparative life cycle assessment of carbon fiber reinforced composite components for automotive industry', *ESAFORM 2021*, vol. 06, pp. 1–12, Apr. 2021, doi: 10.25518/esaform21.2542.
- [37] A. Forcellese, M. Marconi, M. Simoncini et A. Vita, 'Life cycle impact assessment of different manufacturing technologies for automotive CFRP components', *J. Clean. Prod.*, vol. 271, p. 122677, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122677.
- [38] I. Bianchi, A. Forcellese, M. Simoncini, A. Vita, V. Castorani, M. Arganese et C. De Luca, 'Life cycle impact assessment of safety shoes toe caps realized with reclaimed composite materials', *J. Clean. Prod.*, vol. 347, no. October 2021, p. 131321, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131321.
- [39] A. Salles, T. Reichert, A. M. Ruiz et J. Cordero, 'Gate-to-Gate Study for Collaborative Robot-Assisted Composite Parts Manufacturing Using a Work Effort Unit Approach', *Macromol. Symp.*, vol. 405, no. 1, p. 2100239, Oct. 2022, doi: 10.1002/masy.202100239.

- [40] C. V. Katsiropoulos, A. Loukopoulos et S. G. Pantelakis, 'Comparative Environmental and Cost Analysis of Alternative Production Scenarios Associated with a Helicopter's Canopy', *Aerospace*, vol. 6, no. 1, p. 3, Jan. 2019, doi: 10.3390/aerospace6010003.
- [41] A. Loukopoulos, C. V. Katsiropoulos et S. G. Pantelakis, 'Carbon footprint and financial evaluation of an aeronautic component production using different manufacturing processes', *Int. J. Struct. Integr.*, vol. 10, no. 3, pp. 425–435, Jun. 2019, doi: 10.1108/IJSI-07-2018-0043.
- [42] R. A. Witik, F. Gaille, R. Teuscher, H. Ringwald, V. Michaud et J. E. Månson, 'Economic and environmental assessment of alternative production methods for composite aircraft components', *J. Clean. Prod.*, vol. 29–30, pp. 91–102, Jul. 2012, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.02.028.
- [43] A. Vita, V. Castorani, M. Germani et M. Marconi, 'Comparative life cycle assessment and cost analysis of autoclave and pressure bag molding for producing CFRP components', *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 105, no. 5–6, pp. 1967–1982, Dec. 2019, doi: 10.1007/s00170-019-04384-9.
- [44] J. R. Gouveia, M. Gonçalves, R. Rocha, A. J. Baptista et H. Monteiro, 'Efficiency framework to assess aeronautic composite panel production: Tracking environmental and process performance', *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 31, pp. 419–431, May 2022, doi: 10.1016/j.spc.2022.03.007.
- [45] M. Müller, A. Liebsch, R. Kupfer, M. Stegelmann et M. Gude, 'Process chain based data capture for a flexible and reliable life cycle inventory of a glass fiber-reinforced thermoplastic lightweight structure', *Procedia CIRP*, vol. 85, pp. 32–36, 2019, doi: 10.1016/j.procir.2019.09.001.
- [46] A. Hohmann, S. Albrecht, J. P. Lindner, B. Voringner, D. Wehner, K. Drechsler et P. Leistner, 'Resource efficiency and environmental impact of fiber reinforced plastic processing technologies', *Prod. Eng.*, vol. 12, no. 3–4, pp. 405–417, Jun. 2018, doi: 10.1007/s11740-018-0802-7.
- [47] A. Al-Lami, P. Hilmer et M. Sinapius, 'Eco-efficiency assessment of manufacturing carbon fiber reinforced polymers (CFRP) in aerospace industry', *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 79, pp. 669–678, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.ast.2018.06.020.
- [48] A. Alemam and S. Li, 'Eco-design improvement for the diaphragm forming process', *Int. J. Sustain. Eng.*, vol. 9, no. 6, pp. 401–410, Nov. 2016, doi: 10.1080/19397038.2016.1144829.
- [49] C. Brecher, R. Schmitt, F. Lindner, T. Peters, M. Emonts et M. G. Böckmann, 'Increasing Cost and Eco Efficiency for Selective Tape Placement and Forming by Adaptive Process Design', *Procedia CIRP*, vol. 57, pp. 769–774, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.11.133.
- [50] I. Bianchi, A. Forcellese, T. Mancina, M. Simoncini et A. Vita, 'Process parameters effect on environmental sustainability of composites FFF technology', *Mater. Manuf. Process.*, vol. 37, no. 5, pp. 591–601, Apr. 2022, doi: 10.1080/10426914.2022.2049300.
- [51] M. Rani, P. Carlone et S. Zafar, 'Analysis of mechanical performance and energy consumption of microwave cured GFRP composites: A low-energy footprint manufacturing process', *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 42, pp. 36–46, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.cirpj.2023.01.015.

- [52] T. Le Gentil, D. Therriault et O. Kerbrat, 'A comprehensive methodology to support decision-making for additive manufacturing of short carbon-fiber reinforced polyamide 12 from energy, cost and mechanical perspectives', *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, no. section II, Mar. 2023, doi: 10.1007/s00170-023-11161-2.
- [53] C. V. Katsiropoulos and S. G. Pantelakis, 'A Novel Holistic Index for the Optimization of Composite Components and Manufacturing Processes with Regard to Quality, Life Cycle Costs and Environmental Performance', *Aerospace*, vol. 7, no. 11, p. 157, Oct. 2020, doi: 10.3390/aerospace7110157.
- [54] A. Dér, A. Kaluza, L. Reimer, C. Herrmann et S. Thiede, 'Integration of Energy Oriented Manufacturing Simulation into the Life Cycle Evaluation of Lightweight Body Parts', *Int. J. Precis. Eng. Manuf. Technol.*, Jan. 2022, doi: 10.1007/s40684-021-00412-w.
- [55] F. Lindner and R. Schmitt, 'Goal-oriented Life Cycle Investigations for Composite Manufacturing Chains', *Procedia CIRP*, vol. 29, pp. 438–443, 2015, doi: 10.1016/j.procir.2015.02.043.
- [56] V. Lunetto, M. Galati, L. Settineri et L. Iuliano, 'Sustainability in the manufacturing of composite materials: A literature review and directions for future research', *J. Manuf. Process.*, vol. 85, no. August 2022, pp. 858–874, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2022.12.020.
- [57] S. M. Gupta and M. A. Ilgin, *Multiple Criteria Decision Making Applications in Environmentally Conscious Manufacturing and Product Recovery*, vol. 13, no. 1. CRC Press, 2017.
- [58] S. H. Patel and M. Xanthos, 'Environmental issues in polymer processing: A review on volatile emissions and material/energy recovery options', *Adv. Polym. Technol.*, vol. 20, no. 1, pp. 22–41, 2001, doi: 10.1002/1098-2329(200121)20:1<22::AID-ADV1002>3.0.CO;2-O.
- [59] P. Han, J. Butterfield, M. Price, S. Buchanan et A. Murphy, 'Experimental investigation of thermoforming carbon fibre-reinforced polyphenylene sulphide composites', *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, vol. 28, no. 4, pp. 529–547, Apr. 2015, doi: 10.1177/0892705713486133.
- [60] T. Joppich, D. Doerr, L. van der Meulen, T. Link, B. Hangs et F. Henning, 'Layup and process dependent wrinkling behavior of PPS/CF UD tape-laminates during non-isothermal press forming into a complex component', in *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 170011, p. 170012, doi: 10.1063/1.4963568.
- [61] T. Jamin, M. Dubé et L. Laberge Lebel, 'Effect of stamp-forming parameters and bend radius on the mechanical performance of curved beam carbon fiber/polyphenylene sulfide specimens', *J. Compos. Mater.*, vol. 50, no. 9, pp. 1213–1225, Apr. 2016, doi: 10.1177/0021998315590261.
- [62] F. Sacchetti, W. J. B. Grouve, L. L. Warnet et I. F. Villegas, 'Effect of cooling rate on the interlaminar fracture toughness of unidirectional Carbon/PPS laminates', *Eng. Fract. Mech.*, vol. 203, no. February, pp. 126–136, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.engfracmech.2018.02.022.
- [63] S. Oshima, R. Higuchi, M. Kato, S. Minakuchi, T. Yokozeki et T. Aoki, 'Cooling rate-dependent mechanical properties of polyphenylene sulfide (PPS) and carbon fiber reinforced PPS (CF/PPS)', *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 164, no. September 2022, p. 107250, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.compositesa.2022.107250.

- [64] R. A. Brooks, H. Wang, Z. Ding, J. Xu, Q. Song, H. Liu, J. P. Dear et N. Li, 'A review on stamp forming of continuous fibre-reinforced thermoplastics', *Int. J. Light. Mater. Manuf.*, p. 118159, May 2022, doi: 10.1016/j.ijlmm.2022.05.001.
- [65] 'ISO 14130 Fibre-reinforced plastic composites — Determination of apparent interlaminar shear strength by short-beam method', 1997.
- [66] G. F. L. Ehlers, K. R. Fisch et W. R. Powell, 'Thermal degradation of polymers with phenylene units in the chain. I. Polyphenylenes and poly(phenylene oxides)', *J. Polym. Sci. Part A-1 Polym. Chem.*, vol. 7, no. 10, pp. 2931–2953, Oct. 1969, doi: 10.1002/pol.1969.150071015.
- [67] L. H. Perng, 'Thermal decomposition characteristics of poly(phenylene sulfide) by stepwise Py-GC/MS and TG/MS techniques', *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 69, no. 3, pp. 323–332, 2000, doi: 10.1016/S0141-3910(00)00077-X.
- [68] J. Walter, M. Hustedt, R. Staehr, S. Kaierle, P. Jaeschke, O. Suttmann et L. Overmeyer, 'Laser cutting of carbon fiber reinforced plastics – investigation of hazardous process emissions', *Phys. Procedia*, vol. 56, pp. 1153–1164, 2014, doi: 10.1016/j.phpro.2014.08.030.
- [69] S. Kumagai, M. Sato, C. Ma, Y. Nakai et T. Kameda, 'A comprehensive study into the thermo-oxidative degradation of sulfur-based engineering plastics', *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 168, no. September, p. 105754, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105754>.
- [70] K. Yamashita, N. Yamamoto, A. Mizukoshi, M. Noguchi, Y. Ni et Y. Yanagisawa, 'Compositions of Volatile Organic Compounds Emitted from Melted Virgin and Waste Plastic Pellets', *J. Air Waste Manage. Assoc.*, vol. 59, no. 3, pp. 273–278, Mar. 2009, doi: 10.3155/1047-3289.59.3.273.
- [71] P. T. Mativenga, A. A. M. Sultan, J. Agwa-Ejon et C. Mbohwa, 'Composites in a Circular Economy: A Study of United Kingdom and South Africa', *Procedia CIRP*, vol. 61, pp. 691–696, 2017, doi: 10.1016/j.procir.2016.11.270.
- [72] J. Rybicka, A. Tiwari, P. Alvarez Del Campo et J. Howarth, 'Capturing composites manufacturing waste flows through process mapping', *J. Clean. Prod.*, vol. 91, pp. 251–261, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.12.033.
- [73] A. D. La Rosa, G. Recca, J. Summerscales, A. Latteri, G. Cozzo et G. Cicala, 'Bio-based versus traditional polymer composites. A life cycle assessment perspective', *J. Clean. Prod.*, vol. 74, pp. 135–144, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.03.017.
- [74] J. Zhang, V. S. Chevali, H. Wang et C.-H. Wang, 'Current status of carbon fibre and carbon fibre composites recycling', *Compos. Part B Eng.*, vol. 193, no. December 2019, p. 108053, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108053.
- [75] G. Carabin, E. Wehrle et R. Vidoni, 'A review on energy-saving optimization methods for robotic and automatic systems', *Robotics*, vol. 6, no. 4, 2017, doi: 10.3390/robotics6040039.
- [76] D. Meike and L. Ribickis, 'Energy efficient use of robotics in the automobile industry', *IEEE 15th Int. Conf. Adv. Robot. New Boundaries Robot. ICAR 2011*, pp. 507–511, 2011, doi: 10.1109/ICAR.2011.6088567.
- [77] M. Chemnitz, G. Schreck et J. Kruger, 'Analyzing energy consumption of industrial robots', in *ETFA2011*, Sep. 2011, pp. 1–4, doi: 10.1109/ETFA.2011.6059221.

- [78] A. Othman, K. Belda et P. Burget, 'Physical modelling of energy consumption of industrial articulated robots', ICCAS 2015 - 2015 15th Int. Conf. Control. Autom. Syst. Proc., no. Iccas, pp. 784–789, 2015, doi: 10.1109/ICCAS.2015.7364727.
- [79] M. Hann Chua, B. M. Smyth, A. Murphy et J. Butterfield, 'Understanding aerospace composite components' supply chain carbon emissions', 2015, [Online]. Available: [https://pure.qub.ac.uk/ws/files/17077495/Chua\\_etal\\_IMC32\\_2015\\_v7.pdf](https://pure.qub.ac.uk/ws/files/17077495/Chua_etal_IMC32_2015_v7.pdf).
- [80] J. B. Guinée, M. Gorrée, R. Heijungs, G. Huppes, R. Kleijn, A. de Koning, L. van Oers, A. Wegener Sleeswijk, S. Suh, H. A. Udo de Haes, J. A. De Bruijn, R. van Duin, et M. A. J. Huijbregts. *Handbook on Life Cycle Assessment*, vol. 7. Dordrecht: Springer Netherlands, 2002.
- [81] M. Goedkoop and R. Spriensma, 'Eco-indicator 99, a damage oriented method for lifecycle impact assessment, methodology report', pp. 1–2, 2000.
- [82] M. Hauschild and J. Potting, 'Spatial differentiation in life cycle impact assessment—the EDIP2003 methodology', *Environ. News* no. 80, 2005.
- [83] B. Steen, 'A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS). Version 2000-general system characteristics', 1999.
- [84] O. Jolliet, M. Margni, R. Charles, S. Humbert, J. Payet, G. Rebitzer et R. Rosenbaum, 'IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology', *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 8, no. 6, p. 324, Nov. 2003, doi: 10.1007/BF02978505.
- [85] N. Itsubo, M. Sakagami, T. Washida, K. Kokubu et A. Inaba, 'Weighting across safeguard subjects for LCIA through the application of conjoint analysis', *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 9, no. 3, pp. 196–205, May 2004, doi: 10.1007/BF02994194.
- [86] L. Toffoletto, C. Bulle, J. Godin, C. Reid et L. Deschênes, 'LUCAS - A New LCIA Method Used for a Canadian-Specific Context', *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 12, no. 2, pp. 93–102, 2007.
- [87] M. Goedkoop, R. Heijungs, M. Huijbregts, A. De Schryver, J. Struijs et R. Van Zelm, 'ReCiPe 2008—a life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level', vol. 1, 2009.
- [88] J. C. Bare, 'Traci', *J. Ind. Ecol.*, vol. 6, no. 3–4, pp. 49–78, Jun. 2002, doi: 10.1162/108819802766269539.
- [89] M. Z. Hauschild, M. Goedkoop, J. Guinée, R. Heijungs, M. Huijbregts, O. Jolliet, M. Margni, A. De Schryver, S. Humbert, A. Laurent et S. Sala., 'Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment', *Int. J. Life Cycle Assess.*, pp. 683–697, 2013, doi: <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0489-5>.
- [90] European Commission-Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: ILCD Handbook - General guide on LCA - Detailed guidance. First edition March 2010. EUR 24708 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union. 2010.
- [91] L. Zampori and R. Pant, 'Méthode de l'empreinte environnementale de produit (PEF)', *Off. des Publ. l'Union Eur. Luxemb.*, 2019, doi: 10.2760/265244, JRC115959.
- [92] L. Guérin-Schneider, M. Tsanga-Tabi, P. Roux, L. Catel et Y. Biard, 'How to better include environmental assessment in public decision-making: Lessons from the use of an LCA-

- calculator for wastewater systems', *J. Clean. Prod.*, vol. 187, pp. 1057–1068, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.03.168.
- [93] B. P. Weidema and M. S. Wesnæs, 'Data quality management for life cycle inventories—an example of using data quality indicators', *J. Clean. Prod.*, vol. 4, no. 3–4, pp. 167–174, Jan. 1996, doi: 10.1016/S0959-6526(96)00043-1.
- [94] R. Frischknecht, N. Jungbluth, H.J. Althaus, G. Doka, R. Dones, T. Heck, S. Hellweg, R. Hischier, T. Nemecek, G. Rebitzer et M. Spielmann, 'The ecoinvent Database: Overview and Methodological Framework (7 pp)', *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 10, no. 1, pp. 3–9, Jan. 2005, doi: 10.1065/lca2004.10.181.1.
- [95] J. R. Dufloy, J. De Moor, I. Verpoest et W. Dewulf, 'Environmental impact analysis of composite use in car manufacturing', *CIRP Ann.*, vol. 58, no. 1, pp. 9–12, 2009, doi: 10.1016/j.cirp.2009.03.077.
- [96] Y. F. Khalil, 'Eco-efficient lightweight carbon-fiber reinforced polymer for environmentally greener commercial aviation industry', *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 12, no. April, pp. 16–26, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.spc.2017.05.004.
- [97] M. N. Ozisik, *Heat Transfer: A Basic Approach*. New York : McGraw-Hill, 1985.
- [98] W. J. B. Groupe, 'Weld strength of laser-assisted tape-placed thermoplastic composites', PhD thesis, University of Twente, 2012.
- [99] Y. F. Liu, Z. L. Hu, D. H. Shi et K. Yu, 'Experimental Investigation of Emissivity of Steel', *Int. J. Thermophys.*, vol. 34, no. 3, pp. 496–506, Mar. 2013, doi: 10.1007/s10765-013-1421-3.
- [100] S. C. Somé, D. Delaunay, J. Faraj, J. L. Bailleul, N. Boyard et S. Quilliet, 'Modeling of the thermal contact resistance time evolution at polymer-mold interface during injection molding: Effect of polymers' solidification', *Appl. Therm. Eng.*, vol. 84, pp. 150–157, 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.03.037.
- [101] L. Amedewovo, A. Levy, B. de Parscau du Plessix, J. Aubril, A. Arrive, L. Orgéas et S. Le Corre, 'A methodology for online characterization of the deconsolidation of fiber-reinforced thermoplastic composite laminates', *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 167, no. October 2022, p. 107412, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.compositesa.2022.107412.
- [102] A. Cherouat and H. Borouchaki, 'Present state of the art of composite fabric forming: Geometrical and mechanical approaches', *Materials (Basel)*, vol. 2, no. 4, pp. 1835–1857, 2009, doi: 10.3390/ma2041835.
- [103] C. Mack and H. M. Taylor, '39—The Fitting of Woven Cloth to Surfaces', *J. Text. Inst. Trans.*, vol. 47, no. 9, pp. T477–T488, Sep. 1956, doi: 10.1080/19447027.1956.10750433.
- [104] R. B. Ramgulam and P. Potluri, 'A differential geometry approach to forming simulation of biaxial preforms', *ICCM Int. Conf. Compos. Mater.*, pp. 1–6, 2007.
- [105] B. YANG, T. JIN, F. BI et J. LI, 'A Geometry Information Based Fishnet Algorithm for Woven Fabric Draping in Liquid Composite Molding', *Mater. Sci.*, vol. 20, no. 4, pp. 513–521, Dec. 2014, doi: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.ms.20.4.6075>.
- [106] R. B. Ramgulam, 'A novel algorithm for fitting a woven-cloth to complex surfaces', *Int. J. Cloth. Sci. Technol.*, vol. 13, no. 3–4, pp. 198–207, 2001, doi: 10.1108/09556220110396551.

- [107] C. Krogh, B.L.V. Bak, E. Lindgaard, A.M. Olesen, S. M. Hermansen, P. H. Broberg, J. A. Kepler, E. Lund, J. Jakobsen, 'A simple MATLAB draping code for fiber-reinforced composites with application to optimization of manufacturing process parameters', *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 64, no. 1, pp. 457–471, 2021, doi: 10.1007/s00158-021-02925-z.
- [108] T. Gereke, O. Döbrich, M. Hübner et C. Cherif, 'Experimental and computational composite textile reinforcement forming: A review', *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 46, no. 1, pp. 1–10, 2013, doi: 10.1016/j.compositesa.2012.10.004.
- [109] C. Geuzaine and J.-F. Remacle, 'Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities', *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 79, no. 11, pp. 1309–1331, Sep. 2009, doi: 10.1002/nme.2579.
- [110] L. L. Thurstone, 'A law of comparative judgment.', *Psychol. Rev.*, vol. 34, no. 4, pp. 273–286, Jul. 1927, doi: 10.1037/h0070288.
- [111] L. L. Thurstone, 'The measurement of opinion.', *J. Abnorm. Soc. Psychol.*, vol. 22, no. 4, pp. 415–430, Jan. 1928, doi: 10.1037/h0070476.
- [112] P. Virtanen, R. Gommers, T. E. Oliphant, M. Haberland, T. Reddy, D. Cournapeau, E. Burovski et al., 'SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python', *Nat. Methods*, vol. 17, no. 3, pp. 261–272, Mar. 2020, doi: 10.1038/s41592-019-0686-2.
- [113] J. Blank and K. Deb, 'Pymoo: Multi-Objective Optimization in Python', *IEEE Access*, vol. 8, pp. 89497–89509, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2990567.



**Titre :** Evaluation environnementale des procédés composites pour l'analyse multicritère des systèmes de production : méthodologies, outils et applications

**Mots clés :** Composites thermoplastiques, Procédés de fabrication, Impacts environnementaux, Analyse multicritère, Thermoformage-estampage, C/PPS

**Résumé :** Dans le contexte actuel de transition environnementale, cette thèse vise à participer à la réduction des impacts environnementaux de la fabrication de pièces en composites, qui est un secteur en croissance depuis plusieurs années. Pour cela, une méthodologie d'analyse environnementale spécifique aux procédés composites est fondamentale pour développer et évaluer des stratégies de réduction des impacts environnementaux. Pour être applicables dans l'industrie, ces stratégies se doivent de respecter les impératifs techniques et économiques des entreprises. Pour réaliser des évaluations environnementales, la méthode standardisée d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) peut être employée. Cependant, le caractère général de cette approche laisse des latitudes sur son application qui n'ont pour le moment pas fait l'objet d'un consensus de la part de la communauté scientifique dans le cas des procédés composites.

Ces travaux de thèse proposent alors des précisions de chaque étape de la méthode ACV pour construire une modélisation des impacts environnementaux du procédé qui dépendent de ses paramètres, comme par exemple les températures de mise en forme et les efforts de consolidation. Une approche similaire est aussi développée pour l'évaluation d'indicateurs économique également fonction de ces paramètres. Des outils d'exploitation multicritères sont enfin proposés pour trouver des réponses à l'objectif de réduction des impacts environnementaux et du coût de fabrication tout en assurant la conformité au cahier des charges techniques des pièces produites. Dans ce mémoire, le cas du thermoformage-estampage de pièces en polysulfure de phénylène renforcées par des fibres de carbone (C/PPS) est étudié pour appuyer la construction et la présentation des méthodologies proposées.

**Title :** Environmental assessment of composite manufacturing processes for the multi-criteria analysis of manufacturing systems : methodologies, tools and applications

**Keywords :** Thermoplastic composites, Manufacturing process, Environmental impact, Multi-criteria assessment, Thermo-stamping, C/PPS

**Abstract :** In the current context of environmental transition, this thesis aims to participate in the reduction of environmental impacts related manufacturing of composite parts, which has been a growing sector for several years. To this purpose, an environmental assessment methodology dedicated to composite manufacturing processes is fundamental to develop and evaluate strategies for reducing environmental impacts. To be applicable in the industry, these strategies must respect the technical and economic imperatives of companies. To carry out environmental assessments, the standardized Life Cycle Assessment (LCA) method can be used. However, the general nature of this approach leaves latitudes on its application which have not been yet the subject of a scientific consensus in the case of composite manufacturing.

Thus, our work proposes details for each step of the LCA method to build a model of the environmental impacts of the manufacturing process which depend on its parameters, such as the forming temperatures and the consolidation efforts. A similar approach is also developed for the evaluation of economic indicators based on the same parameters. Finally, multi-criteria decision-making tools are offered to find solutions to the objective of reducing environmental impacts and manufacturing costs while ensuring compliance with the technical specifications of the parts produced. In this thesis, the case of thermo-stamping of polyphenylene sulfide reinforced with carbon fibres (C/PPS) parts is studied to support the construction and presentation of the proposed methodologies.