

UNIVERSITÉ DE NANTES  
FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES

---

ÉCOLE DOCTORALE  
SCIENCES POUR L'INGENIEUR, GEOSCIENCES, ARCHITECTURE DE NANTES

Année 2015

Numéro attribué par la bibliothèque

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

# Caractérisation et modélisation des transferts de chaleur lors de l'impression en transfert thermique

---

THÈSE DE DOCTORAT

Discipline : Sciences pour l'ingénieur  
Spécialité : Thermique

*Présentée  
et soutenue par*

**Franck LEMEUNIER**

*devant le jury ci-dessous*

Rapporteurs :	<b>Didier CHAUSSY</b> <b>Philippe LE MASSON</b>	Professeur des Universités Professeur des Universités	INP Pagora (Grenoble) Université de Bretagne Sud
Examineurs :	<b>Manuel GIRAULT</b> <b>Nadine ALLANIC</b> <b>Sofiane BELHABIB</b>	Chargé de recherche CNRS Maître de Conférences Maître de Conférences	Université de Poitiers Université de Nantes Université de Nantes
Invité(s) :	<b>Hélène BEDANE</b> <b>Pierre-Yves JOUAN</b>	Représentant industriel Professeur des Universités	Société ARMOR Université de Nantes
Directeur de Thèse :	<b>Pierre MOUSSEAU</b>	Professeur des Universités	Université de Nantes

ED : SPIGA



# Remerciements

Ce travail de thèse a été réalisé au sein du Laboratoire GEPEA équipe OPERP « Outillage et Procédés d'Élaboration Réactifs des Polymères » de l'Université de Nantes en partenariat avec l'entreprise ARMOR.

Il est l'aboutissement de huit années d'études que j'ai entamées à l'âge de 31 ans. C'est pourquoi je tiens à citer et remercier sincèrement ceux sans qui, bien qu'ils ne soient pas intervenus directement dans le cours de cette thèse, tout ceci n'aurait pas été possible. Je vais commencer par monsieur Michel HENRICHOT qui m'a offert la chance d'intégrer la faculté. Également Éric PHILIPPE, qui pendant plusieurs mois m'a donné régulièrement des cours de mathématiques, afin de me permettre d'intégrer la faculté des sciences de l'Université de Bretagne Sud. Je tiens à remercier également monsieur Philippe LE MASSON sans qui ce projet ne serait pas allé à son terme.

J'ai trouvé au sein du laboratoire GEPEA/OPERP, une équipe accueillante et dynamique. J'ai plaisir, en premier lieu, à exprimer ma gratitude à monsieur Rémi. DETERRE pour m'y avoir accueilli et pour m'avoir fourni les meilleures conditions à la réalisation de ce travail. Au cours de ces trois années, j'ai eu la chance, d'être dirigé par monsieur Pierre MOUSSEAU dont je tiens à souligner les qualités humaines ainsi que la grande compétence en matière scientifique. Également, je tiens à remercier madame Nadine ALLANIC et monsieur Sofiane BELHABIB qui, par leur soutien et leurs conseils avisés, m'ont permis de dépasser les difficultés liées aux multiples aspects de ce travail. À ce titre, je tiens à souligner l'apport technique de monsieur Christophe PLOT pour sa contribution efficace et monsieur Yannick MADEC pour la partie instrumentation. Ces remerciements à l'équipe qui m'a accueillie au sein de l'université ne seraient pas complets sans un mot sur mes collègues doctorants ou non, qui ont apporté chaleur et convivialité pendant ces trois années, avec peut-être une pensée particulière à mon camarade de bureau, monsieur Ali HARKOUS, pour sa bienveillance et nos nombreux échanges.

Ce travail n'aurait pas pu trouver son aboutissement sans le support et la disponibilité des membres de l'équipe appartenant à l'entreprise partenaire de ce projet. Mes meilleurs remerciements vont à madame Hélène BÉDANE qui a toujours su veiller à m'apporter les meilleures conditions de travail, ainsi que messieurs Jean-Marie PICQ, Baptiste AVELINE et Pierre POULLAOUËC pour nos tous nos échanges aussi instructifs que fructueux.

Je remercie messieurs Didier CHAUSSY et Philippe LE MASSON d'avoir accepté la lourde tâche de faire partie des membres du jury de cette thèse en la qualité de rapporteurs, ainsi que monsieur Manuel GIRAULT pour son apport en tant qu'examineur de ces travaux.

À titre plus personnel, je remercie chaleureusement ma compagne, Emmanuelle, pour la grande patience, l'encouragement et la confiance dont elle a su faire preuve. Je tiens à la remercier surtout pour son soutien moral ininterrompu et les nombreux conseils qu'elle m'a prodigués tout au long de ces trois années de thèse et au-delà, de ces huit années d'études.

Finalement je remercie mes parents et mon frère Vincent, pour leurs soutiens, ainsi que mes amis, qui ont su m'apporter réconfort dans les moments de difficulté.

Je dédie ce travail à ma compagne, Emmanuelle  
ainsi qu'à mes deux fils, Pierre et Rémi.

,

# Sommaire

Sommaire.....	v
Nomenclature.....	ix
Introduction .....	11
Chapitre I Contexte de l'étude .....	15
I.1. Introduction.....	15
I.1.1. Principe d'utilisation des codes à barres.....	15
I.1.2. Structure d'un code à barres .....	15
I.1.3. Lecture des codes à barres .....	16
I.1.4. Lisibilité des codes à barres .....	17
I.2. Technologies d'impression.....	18
I.2.1. Classement des technologies d'impression .....	18
I.2.2. Technologies d'impression par jet d'encre.....	19
I.2.2.1. Technologie d'impression électro photographique .....	21
I.2.2.2. Technologies d'impression thermique.....	22
I.3. Modélisation du procédé d'impression .....	25
I.3.1. Articles de référence.....	25
I.3.2. Conclusion .....	32
Chapitre II Description et caractérisation du système .....	33
II.1. Introduction .....	33
II.2. Description de l'imprimante.....	33
II.2.1. Accès consommables.....	34
II.2.2. Accès compartiment électronique.....	39
II.3. Description et caractérisation de la tête d'impression.....	42
II.3.1. Analyse dimensionnelle de la tête d'impression.....	43
II.3.2. Analyse de la composition de l'environnement de la source de chaleur.....	45
II.3.3. Propriétés thermiques .....	45
II.4. Description et caractérisation thermique des rubans et support d'impression .....	46
II.4.1. Analyse dimensionnelle .....	46
II.4.2. Caractérisation thermique.....	48
II.5. Conclusion .....	56
Chapitre III Caractérisation et modélisation de la micro-source de chaleur.....	59
III.1. Introduction .....	59

III.2. Analyse du signal électrique.....	61
III.2.1. Architecture du signal et nomenclature.....	62
III.2.2. Temps de cycle .....	63
III.2.3. Puissance délivrée .....	64
III.3. Mesure des températures de surface par thermographie infrarouge .....	66
III.3.1. Principe de mesure par thermographie infrarouge.....	66
III.3.2. Matériel et conditions expérimentales.....	68
III.3.3. Résultats expérimentaux .....	69
III.4. Modèle numérique de la tête d'impression .....	73
III.4.1. Géométrie.....	73
III.4.2. Modèle mathématique et conditions limites .....	74
III.4.3. Etude de sensibilité .....	76
III.4.4. Validation du modèle numérique de la source .....	79
III.5. Conclusion .....	81
Chapitre IV Modélisation du système d'impression.....	83
IV.1. Introduction.....	83
IV.2. Instrumentation de l'imprimante.....	85
IV.2.1. Mesures non-thermiques.....	86
IV.2.2. Mesures thermiques.....	91
IV.3. Expérimentation.....	93
IV.3.1. Description du code à barres de référence.....	94
IV.3.2. Répétabilité et reproductibilité des mesures de température .....	96
IV.3.3. Résultats expérimentaux.....	99
IV.4. Modélisation numérique 2D .....	103
IV.4.1. Modèle numérique .....	103
IV.4.2. Comparaison mesures / simulations numériques .....	108
IV.5. Etude thermique du système d'impression .....	110
IV.5.1. Champ de température à proximité de la micro-source de chaleur.....	111
IV.5.2. Influence des résistances thermiques de contact .....	113
IV.6. Conclusion.....	116
Chapitre V Imprimante virtuelle et exploitation du modèle numérique.....	117
V.1. Introduction.....	117
V.2. Présentation du concept d'imprimante virtuelle.....	118
V.2.1. Espace Eulérien et espace Lagrangien .....	118
V.2.2. Description lagrangienne du modèle numérique d'impression virtuelle.....	119
V.2.3. Définition du critère thermique d'impression.....	122
V.3. Validation du modèle numérique .....	122

## Sommaire

V.3.1. Mesure expérimentale.....	123
V.3.2. Comparaison expérimentation/simulation.....	126
V.3.3. Conclusion .....	129
V.4. Etude de l'influence thermique des paramètres du système .....	130
V.4.1. Introduction .....	130
V.4.2. Résultats de l'analyse de sensibilité réduite .....	132
V.4.3. Conclusion .....	135
Conclusion et perspectives.....	137
BIBLIOGRAPHIE.....	141
.....	145
ANNEXES.....	145
Annexe 1 : Dimensions tête d'impression Zebra 140 XiIII+ .....	145
Annexe 2 : Spécification Caméra Infrarouge FLIR .....	146
Annexe 3 : Méthode d'ajustement des paramètres .....	147
Annexe 4 : Instrumentation thermique complémentaire .....	151
Annexe 5 : Essais expérimentaux – Influence de l'indice énergétique .....	153





# Nomenclature

## Notations grecques

$\alpha_e$	Absorptivité environnement	$\rho$	Masse volumique
$\Gamma_t$	Paroi	$\rho_0$	Masse volumique du liquide auxiliaire
$\delta L$	Variation de longueur	$\rho_r$	Masse volumique de l'air
$\Delta T$	Ecart de température	$\tau_{C_t}$	Temps de cycle
$\sigma$	Constante de Stephan-Boltzmann	$\tau_{cr_t}$	Temps de créneau
$\epsilon_0$	Emissivité de l'objet	$\varphi$	Flux
$\lambda$	Conductivité thermique	$\Omega_i$	Domaine de la tête d'impression
$\Lambda$	Architecture du signal électrique		

## Notations latines

$cp$	Capacité thermique massique	$P$	Puissance
$C_i$	Cycle	$Q$	Puissance volumique
$cr_i$	Créneau	$R$	Résistance électrique
$cr_{pci}$	Créneau de préchauffage	$S$	Sensibilité
$ds$	Pas d'espace	$\tilde{S}$	Sensibilité réduite
$dt$	Pas de temps	$t_i$	Temps
$E$	Effusivité thermique	$T$	Température
$E$	Énergie	$T_o$	Température de l'objet
$E_{vol}^i$	Élément de volume	$T_e$	Température de l'environnement
$h$	Coefficient de convection	$U$	Tension électrique
$I$	Intensité	$Up$	Unité paramétrique
$m_a$	Masse de l'air	$v$	vitesse
$m_b$	Masse de liquide auxiliaire		

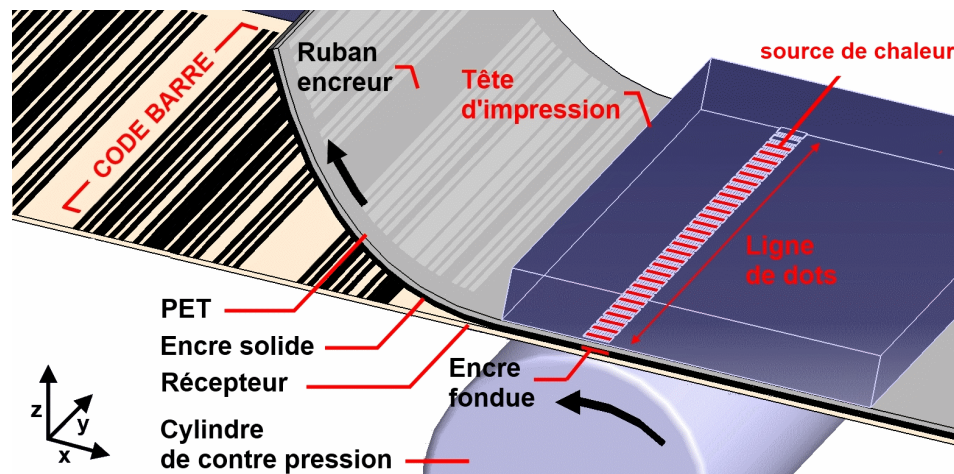
## Abréviations

<b>CaB</b>	Code à Barres	<b>INT</b>	Interface
<b>CCD</b>	Charge Coupled Device	<b>P<sub>E</sub></b>	Pourcentage Encre
<b>Cmos</b>	Complementary Metal Oxide Semiconductor	<b>PET</b>	PolyÉthylène Téréphtalate
<b>dpi</b>	Dot per inch	<b>PIV</b>	Programme d'Impression Virtuelle
<b>EDX</b>	Energy Dispersive X-ray spectrometry	<b>Rtc</b>	Résistance thermique de contact
<b>D2T2</b>	Dye Diffusion Thermal Transfer	<b>RVB</b>	Rouge Vert Bleu
<b>I<sub>E</sub></b>	Indice Énergétique	<b>TC</b>	Thermocouple
		<b>TT</b>	Transfert Thermique
		<b>TTD</b>	Transfert Thermique Direct

# Introduction

L'impression industrielle par transfert thermique est en pleine expansion. Ce mode d'impression a la capacité de répondre à un grand nombre d'exigences d'une grande variété d'utilisateurs (vitesse et qualité d'impression, types de supports, complexité des motifs à imprimer,...). Les imprimantes industrielles thermiques sont largement utilisées pour des étiquettes de marchandises, des billets et de nombreux autres articles tels que les cartes d'identité, les plaques d'immatriculation, les instructions de lavage,... L'impression de codes à barres est aussi classiquement réalisée par transfert thermique (TT) et ce sur des supports très divers (papiers, plastiques, textiles,..).

Lors de ce procédé, l'impression de l'image est générée par la fusion d'un revêtement encré, élément principal d'un ruban, sur un support récepteur où apparaît le motif (Figure 1).

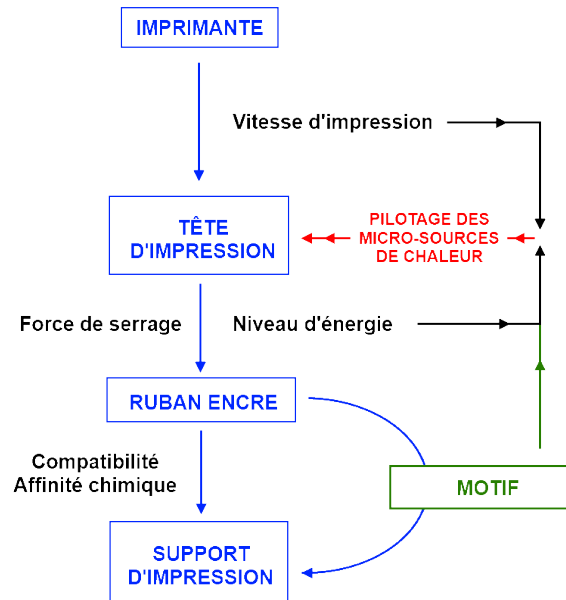


**Figure 1 – Principe d'impression en transfert thermique**

Dans ce mécanisme d'impression, le seul mouvement nécessaire est le déplacement simultané du ruban et du support récepteur sous la tête d'impression thermique. De ce fait, les imprimantes TT contiennent peu de pièces mobiles et sont donc fiables mécaniquement. Bien adaptées aux environnements hostiles, elles ont un fonctionnement relativement silencieux, nécessitant peu d'entretien. Si l'excellente durabilité de ce type d'imprimantes est un vecteur de développement, leur adaptabilité à des supports et motifs divers est aussi un atout fort. Pourtant, lors d'une impression par transfert thermique, les paramètres procédés permettant de s'adapter et d'assurer une bonne qualité d'impression sont limités (Figure 2).

- La vitesse d'impression est généralement contrainte par des cadences de production de plus en plus élevées.
- La force de serrage appliquée par la tête d'impression sur le ruban, paramètre impactant la qualité des transferts de chaleur entre les différentes couches du système, est difficilement maîtrisable sur les imprimantes.
- A l'intérieur de la tête d'impression, se trouve un ensemble de micro sources de chaleur dont le nombre définit la résolution d'impression. L'énergie qu'elles délivrent

dépend de plusieurs éléments tels que le motif, la vitesse d'impression ou la température de l'imprimante etc. Le système de pilotage des micro-sources est complexe et imposé par son fabricant. Le fonctionnement de la tête d'impression est donc totalement opaque à l'opérateur qui n'a pour possibilité de réglage qu'un seul potentiomètre de niveau d'énergie sur l'imprimante.



**Figure 2 – Interactions entre les composants du système d'impression**

Compte tenu du mode de fonctionnement très contrôlé des imprimantes TT, l'un des facteurs clefs de l'adaptabilité du procédé au produit est donc la formulation chimique et la structure du ruban encré. La société Armor, fabricant de rubans encrés, est constamment confrontée à modifier la composition de ses produits pour pouvoir répondre aux nouvelles demandes industrielles d'impression. Les défauts d'impression classiquement observés par la profession sont nombreux. Ils sont parfois attribués à l'encre (sensibilité, rectitude, compatibilité), au ruban (onglets et ruptures du ruban) ou bien à un encrassement prématuré des constituants de l'imprimante (tête d'impression, cylindre de contre-pression,...). Actuellement, la compatibilité et l'affinité chimique entre l'encre et le support d'impression sont au centre de l'opération de transfert thermique. Les matériaux sont adaptés au procédé. Dans un contexte où la variabilité des matières premières est de plus en plus importante et où l'exigence de développement de produits nouveaux plus respectueux de l'environnement (mais encore moins bien maîtrisés) est forte, il devient de plus en plus difficile de s'assurer du bon transfert de l'encre lors de l'impression. De ce fait, les tests machines et les contrôles qualité en laboratoire sont multipliés sans pour autant parfois pouvoir éviter l'apparition de certains défauts d'impression.

Ce travail de thèse vise à recentrer ce problème d'impression thermique sur le procédé, en analysant les phénomènes thermiques mis en jeu. L'objectif est, à travers la compréhension des mécanismes impliqués, de définir un critère procédé, témoin de la qualité d'impression. Si celui-ci se révèle suffisamment sensible, il pourrait devenir pertinent pour établir les préconisations d'utilisation de rubans, éviter l'apparition de certains types de défaut et faciliter l'élaboration des rubans encrés. Pour mener à bien cette étude, la modélisation des

## *Introduction*

transferts de chaleur opérant lors de ce processus d'impression est nécessaire. Elle doit tenir compte de plusieurs aspects spécifiques du procédé, à savoir :

- Les faibles dimensions et la complexité géométrique des micros sources de chaleur dans la tête d'impression.
- La composition hétérogène de l'ensemble des constituants du système (ruban, supports, tête d'impression)
- Le caractère multi échelle des différentes couches considérées ( $10^{-6}$  à  $10^{-3}$  m)
- Les faibles temps caractéristiques (ms) liés à des vitesses d'impression élevées (jusqu'à 400 mm/s).

Pour obtenir un modèle représentatif de l'impression TT, plusieurs étapes préliminaires sont nécessaires. Après avoir défini le contexte de cette étude (Chapitre I), nous présentons dans le Chapitre II, la définition géométrique des éléments et la caractérisation thermo physique des différents matériaux. Pour appréhender et modéliser le fonctionnement de la tête d'impression, des mesures expérimentales, électriques et thermiques, sont exploitées dans le Chapitre III. Le Chapitre IV concerne l'instrumentation fine d'une imprimante et la validation d'un modèle thermique du procédé sur un code à barres de référence. Le Chapitre V définit le critère d'impression retenu et présente l'imprimante virtuelle développée au sein de ce travail. La pertinence de cet outil numérique au regard de la qualité d'impression est alors discutée.



# Chapitre I

## Contexte de l'étude

### I.1. Introduction

Depuis quelques décennies maintenant, l'utilisation des codes à barres est devenue incontournable dans l'étiquetage des produits. Ils se sont imposés en un laps de temps très court dans la traçabilité et la gestion des flux et des stocks. Ils sont omniprésents dans notre environnement quotidien et leurs domaines d'application sont divers et variés. On peut citer à titre d'exemple :

- les caisses enregistreuses à lecture optique des supermarchés,
- le contrôle de la production dans l'industrie,
- le contrôle du flux international des marchandises,
- la gestion des prêts d'une bibliothèque,
- l'identification des patients et des médicaments,
- le suivi des envois postaux, comme les colis ou les lettres recommandées.

La très large diffusion du code à barres est liée aux nombreux avantages qu'il offre. Il est fiable, adaptable, permet de répondre à des contraintes d'utilisation variées et de surcroît, est bon marché.

#### I.1.1. Principe d'utilisation des codes à barres

Les codes à barres sont composés d'une série de barres parallèles juxtaposées ayant une épaisseur variable fondée sur une unité élémentaire. Ce sont leur taille et leur position les unes par rapport aux autres qui constitue le support d'information (Figure I-1). Afin de décoder le contenu crypté, on a recours à un outil optique doté d'un scanner.

Il existe plus de 200 normes de codes à barres différents dans le monde, que l'on peut classer en trois catégories [1].

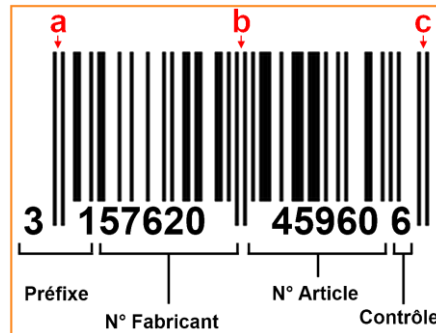
- **les codes-barres unidimensionnels** : Certains sont uniquement numériques (UPC, EAN, 2/5 entrelacé...). D'autres sont alphanumériques (Code 39, Code 128...).
- **les codes unidimensionnels empilés** : Il s'agit d'un agencement de codes à barres unidimensionnel lu par balayage (Code 49, PDF 417).
- **les codes-barres bidimensionnels**: Le recours au vocable de « barres » dans ce cas est impropre puisqu'ils sont en réalité constitués de points (carré, hexagone etc.). Chaque point représente selon qu'il est blanc ou noir, un bit d'information.

#### I.1.2. Structure d'un code à barres

Chacune des normes de code à barres existante est constituée d'une structure qui lui est propre. Prenons l'exemple des codes à barres de type EAN13 (European Article Numbering)

(Figure I-1). Cette norme, développée pour les besoins du commerce européen, crypte 13 chiffres. Les codes à barres EAN13 peuvent être décomposés en 4 sous-groupes d'information.

- Le préfixe : il correspond au pays ayant délivré le numéro de fabrication du produit (2 ou 3 chiffres).
- Le numéro de fabricant : Il est délivré par l'organisme en charge de la norme EAN du pays concerné (4 ou 5 chiffres suivants).
- Le numéro d'article attribué par le producteur (5 chiffres)
- Le chiffre de contrôle qui est calculé à partir des 12 précédents



**Figure I-1 – Structure d'un code à barres EAN13 [2]**

Dans le cas de la norme EAN13, 3 groupes de deux barres supplémentaires sont intégrés au code à barres (Figure I-1 – a-b-c). Ils ont pour but de délimiter le début et la fin du cryptage et dans le cas présent, également, la séparation entre les numéros de fabricant et de produit.

Des centaines d'autres normes de codes à barres unidimensionnels existent. Cependant, elles se fondent toutes sur une même architecture du type : « début de code, code, contrôle, fin de code ».

### I.1.3. Lecture des codes à barres

Le décodage d'un code à barres se fait à l'aide d'un lecteur relié à un ordinateur. Il existe différentes technologies de lecture qui reposent toutes sur la détermination précise des zones sombres et claires qui constituent le code à barres physique. On peut distinguer trois technologies :

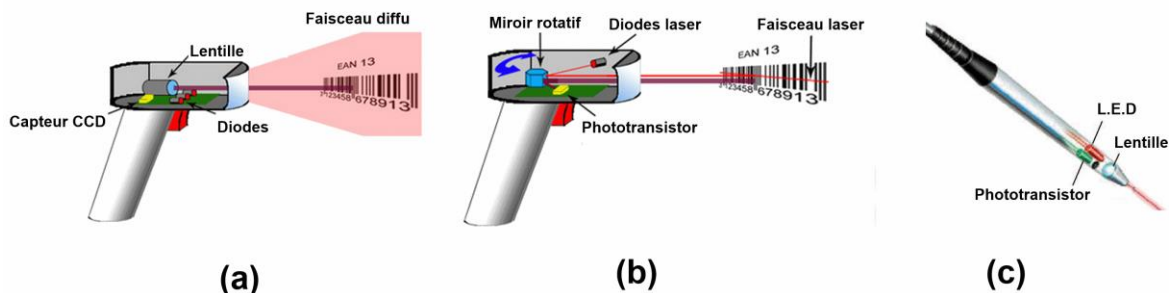
- Le lecteur CCD (Charged-Coupled Device): Il s'agit d'un système composé de plusieurs diodes - lorsqu'elles sont allumées, elles produisent un faisceau de lumière rouge diffus, qui intensifie le contraste entre les barres (généralement Noires & Blanches). Un capteur CCD se charge ensuite de récupérer l'image générée et la communique au support informatique. Ce mode de lecture permet de capter de façon quasi-instantanée l'intégralité du code à barres (Figure I-2 a).
- Le lecteur LASER : Ce mode de lecture recourt à l'utilisation conjointe d'un faisceau lumineux généré par une diode et d'un miroir rotatif destiné à assurer le balayage intégrale du code. Ce miroir permet également la redirection du faisceau réémis par la surface du code vers un phototransistor chargé de commuter le signal lumineux en information numérique. Ce système permet



## Contexte de l'étude

une lecture automatique du code sans qu'il y ait besoin de balayer manuellement sa longueur (Figure I-2 b).

- Le stylet lecteur qui analyse la lumière émise par une LED et réfléchié par les différents éléments du code à barres. Ce mode de lecture impose de parcourir manuellement le code à vitesse constante (Figure I-2 c).



**Figure I-2 – Technologies de lecture de codes à barres**

Quel que soit le mode de lecture du code à barres considéré, le principe reste le même : un flux lumineux est émis par l'appareil puis captée après réflexion sur le code à barres. Le signal reçu est commué en signal analogique, puis en signal numérique après transmission au système informatique. L'information portée par le code à barres est ensuite décodée via un algorithme dédié, en données alpha numérique.

Les systèmes de principe présentés sont appelés à être utilisés manuellement. Ils sont maintenant de plus en plus intégrés à des parcs productifs automatisés.

### I.1.4. Lisibilité des codes à barres

Les chaînes logistiques, l'automatisation des procédés industriels, l'accroissement du besoin de traçabilité des produits à des fins de sécurisation, dépendent totalement de la fiabilité de la lecture des codes à barres. Celle-ci repose aussi bien sur la technologie de décodage utilisée que sur la qualité d'inscription du code lui-même. Une mauvaise qualité d'impression peut se mesurer aussi bien en termes de retard de production, de déstabilisation de la chaîne logistique, de risque pour la santé etc. La maîtrise de la qualité d'impression est donc primordiale. Les fabricants de rubans d'impression doivent garantir des produits assurant une écriture de la meilleure qualité possible dans un contexte concurrentiel fort. Il est évident que cela passe par un travail de recherche et développement dont le but est de mieux comprendre la physique qui régit le transfert de l'encre portée par le ruban vers le support d'impression. C'est dans ce contexte que s'inscrit le travail de thèse que nous allons présenter.

Afin de contextualiser le procédé d'impression par transfert thermique, nous allons dans ce qui suit, donner un aperçu des principales technologies décrites dans le livre «The Electronics Handbook [3]».

## **I.2. Technologies d'impression**

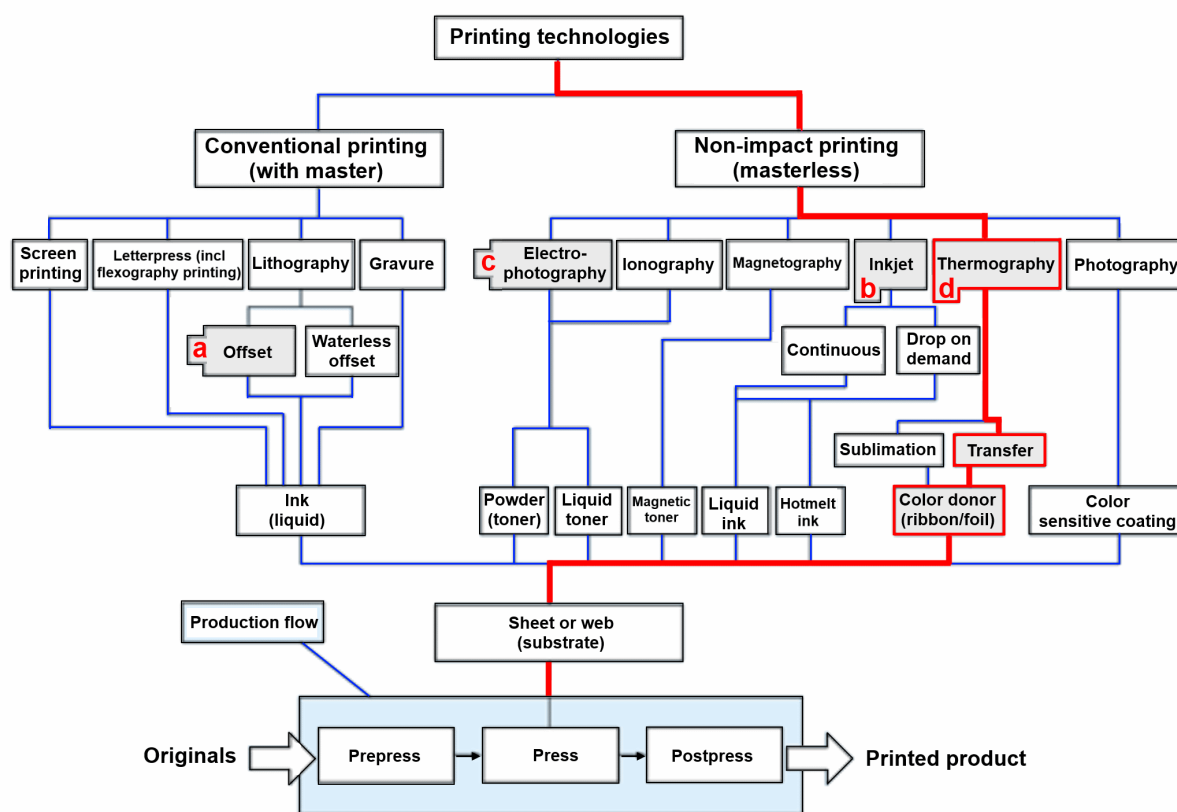
En analysant les différentes technologies d'impression, on retrouve quatre éléments de base qui sont : (i) l'adressage des données au procédé de marquage, (ii) la substance de marquage, son stockage et son convoyage, (iii) transfert de la substance de marquage vers le support d'impression ainsi que (iv) la fixation du marquage [3]. Ces quatre éléments fondamentaux varient d'une technologie à une autre. Pour exemple, la substance de marquage peut contenir divers colorants, divers matériaux supports destinés au transport, des liants pour fixer les colorants sur le papier ainsi que des additifs technologiques spécifiques tels que des substances biocides pour les encres liquides et autres stabilisants. Le processus de transfert, quant à lui, renvoie au mécanisme physique fondamental par lequel une quantité spécifique de la substance de marquage est prélevée et transférée sur le papier. Il diffère fortement selon que l'on considère l'une ou l'autre des technologies d'impression. Enfin, la fixation du marquage englobe les procédés de collage, de séchage ou de solidification de la matière sur le papier pour former un motif durable.

Ces éléments fondamentaux interagissent les uns avec les autres pour donner à chacune des technologies ses propres caractéristiques et par extension, son domaine d'application.

### **I.2.1. Classement des technologies d'impression**

On peut distinguer deux classes de technologies d'impression: les technologies d'impression avec impact et sans impact. Par méthodes avec impact, nous faisons référence à un transfert qui se fait via l'application mécanique directe sur le support d'écriture, d'un effort par un élément de marquage. La représentation la plus simple que l'on puisse se faire de tels procédés est la machine sténo dactylographique. Les méthodes sans impact, quant à elles, couvrent un large éventail de technologies qui réalisent un transfert à travers une variété de moyens qui peuvent se faire avec ou sans contact.

La Figure I-3 donne une vue d'ensemble de l'étendue des procédés d'impression [4].



**Figure I-3 – Technologies d'impression couleur**

D'un point de vue général, le recours à l'une ou l'autre de ces technologies est souvent dicté par le nombre de reproductions attendues ou les propriétés que l'on souhaite conférer à l'impression. L'exemple type est celui de la fabrication des journaux qui sont produits le plus souvent par le procédé offset (Figure I-3 a). Il s'agit d'une technologie issue de l'évolution de la lithographie, dans lequel un motif encré porté par un cylindre ou une plaque est transféré à un support souple. L'impression est réalisée par mise en contact de ce dernier avec le papier. Ce type d'impression met souvent en jeu une machinerie importante connue sous le nom de rotative offset. D'autres procédés nous sont beaucoup plus familiers. Il s'agit par exemple des technologies d'impression à jet d'encre (Figure I-3 b). Celles-ci bien que de plus en plus utilisées sont généralement dévolues à de plus faibles tirages ou bien à des reproductions de grandes dimensions.

Dans la famille des technologies d'impression sans impact, à laquelle appartient le transfert thermique, nous retrouvons plusieurs sous-familles elles-mêmes englobant plusieurs variantes. Dans ce qui suit nous allons décrire d'une manière succincte les plus caractéristiques et les plus courantes d'entre elles. Nous verrons par-là, les particularités de l'impression par transfert thermique.

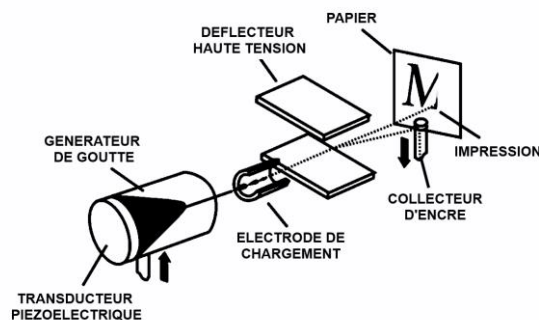
### 1.2.2. Technologies d'impression par jet d'encre

Il s'agit du seul procédé d'impression sans contact. La technologie d'impression par jet d'encre consiste à projeter une encre liquide à partir d'une tête d'impression mobile, en lui

conférant une vitesse et une amplitude suffisante pour qu'elle se dépose sur un substrat proche. L'impression à jet d'encre, outre son usage domestique, est généralement utilisée dans les zones de forte production où la fabrication de codes à barres et de polices lisibles ont besoin d'être obtenus à des vitesses élevées. Il existe trois grandes techniques : (i) L'impression jet d'encre continue, (ii) l'impression par dépôt à la demande et (iii) l'impression par jet d'encre électrostatique.

### *1.2.2.1 Jet d'encre continu (continuous ink jet)*

Le jet continu consiste en la formation de gouttes régulières en volume et en fréquence. Elles sont chargées et orientées selon le motif à générer et peuvent donc être déviées dans un réceptacle si elles ne sont pas désirées. Le principe de base du jet d'encre continu repose sur le principe thermodynamique de l'énergie minimale. Un fluide, en l'occurrence ici une encre, s'écoulant au travers d'un orifice, va minimiser son énergie de surface. Il va être éjecté sous forme de gouttes si les conditions de pression qui lui sont appliquées, la dimension de l'orifice de sortie ainsi que les perturbations imposées au système par le biais d'un transducteur piézoélectrique, sont adéquates. En influant sur ces paramètres, on obtient la formation de gouttes calibrées à une fréquence donnée. Celles-ci sont volontairement chargées électriquement afin de pouvoir être dirigées ou non vers le support à imprimer.



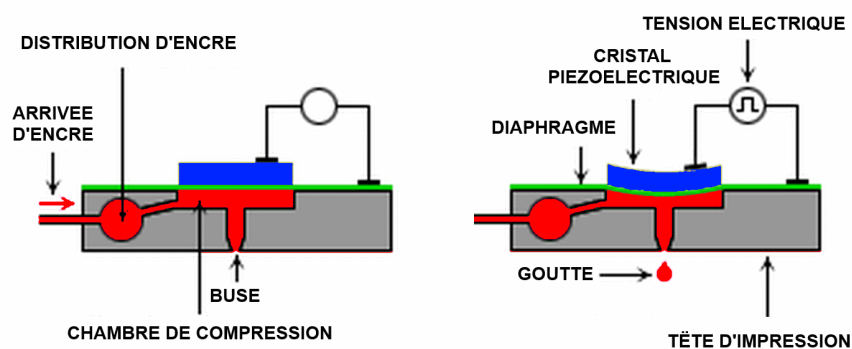
**Figure I-4 –impression d'un caractère par jet d'encre continu [3]**

### *1.2.2.2 Impression par dépôt à la demande (drop on demand ink jet)*

Dans ces dispositifs, la production de gouttes est fonction du motif à imprimer. Le principe de formation des gouttes consiste à produire une variation de volume de l'encre dans un espace confiné doté d'un orifice, en l'occurrence soit dans le canal d'alimentation en fluide, soit dans une chambre adjacente à la buse, de telle sorte que l'onde de pression qui en résulte provoque l'éjection de la goutte [3]. On distingue deux méthodes de fonctionnement différentes.

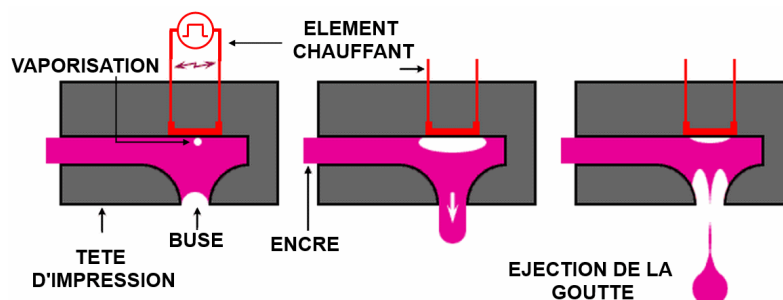
Une première repose sur le recours à un cristal piézoélectrique soumis à une tension. La déformation de celui-ci selon qu'il est ou non excité électriquement génère une diminution du volume d'une chambre de compression contenant l'encre. L'onde de pression en résultant provoque l'éjection d'une goutte calibrée sur le support à imprimer.

## Contexte de l'étude



**Figure I-5 – Illustration d'une technique d'impression jet d'encre à la demande par effet piézoélectrique (industrie textile) [5]**

La seconde technique de production de gouttes à la demande consiste non plus à générer une onde de pression par l'entremise d'un cristal piézoélectrique mais par le biais d'un choc thermique appliqué localement à l'encre. La Figure I-6 illustre comment se forme la goutte d'encre. L'élévation brutale de la température de l'élément chauffant vaporise localement le solvant. La bulle qui se forme chasse l'encre hors de la buse. Puis la bulle disparaît par condensation, et les forces capillaires qui s'exercent dans la buse aspirent l'encre en provenance du réservoir.



**Figure I-6 – Séquence d'éjection d'une goutte dans une imprimante à jet d'encre thermique**

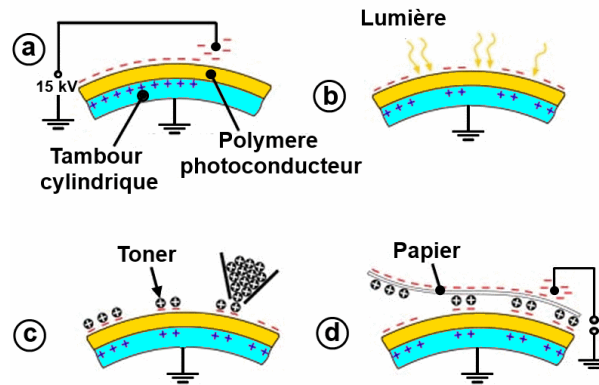
### I.2.3. Technologie d'impression électro photographique

Cette autre technologie est largement répandue. Ses dernières évolutions la font connaître sous l'appellation courante d'« impression laser » [6]. Cette technologie qui équipe la majorité des photocopieuses de bureau.

Le principe de fonctionnement de ce procédé repose sur l'état électrostatique de ses divers constituants. Le processus d'impression électro-photographique est le suivant :

- Un cylindre jouant le rôle de plaque d'impression est chargé sur toute sa surface en électricité statique (Figure I-7 a).
- La surface photosensible de ce cylindre est exposée à une source lumineuse ponctuelle (laser ou LED).

- Les charges électrostatiques sont libérées à l'endroit soumis au flux de photon. Un motif à imprimer est révélé sous forme de zones chargées et non-chargées (Figure I-7 b).
- Une encre en poudre (toner), de charge opposée à celle du cylindre est déposée sur celui-ci et se fixe sur les zones non-neutres (Figure I-7 c).
- L'étape finale de ce procédé d'impression consiste en la dépose de ce toner sur un papier de charge opposée, sous contraintes de pression et de température.



**Figure I-7 – Schéma du processus d'impression électro-photographique**

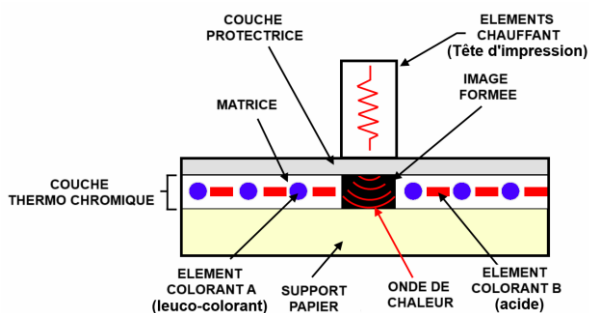
Cette technologie, bien que reposant en partie sur la fusion du toner se distingue fortement dans son principe de fonctionnement des procédés d'impression dits thermiques que nous allons présenter maintenant.

#### 1.2.4. Technologies d'impression thermique

Ces technologies reposent sur l'application contrôlée d'une énergie thermique via une tête d'impression. Celles-ci sont constituées de centaines de micro-sources de chaleur fonctionnant par effet joule. Le marquage du support est généré sous forme de points dont la taille définit la résolution du système. Ils peuvent être obtenus soit par l'activation d'un procédé chimique thermosensible porté par le support à imprimer, soit par le transfert d'une quantité de matière d'un ruban donneur vers un support receveur. Il existe trois technologies disponibles qui sont respectivement, le transfert thermique direct (TTD), le transfert thermique à diffusion de colorant (D2T2) et l'impression par transfert thermique (TT).

##### 1.2.4.1 Impression thermique directe [7]

C'est la technologie thermique la plus ancienne. Le processus d'imagerie repose sur le transfert de chaleur à partir de la tête d'impression à un papier dit « thermique », imprégné en surface d'une couche thermosensible contenant une dispersion dans une matrice, d'un précurseur incolore du colorant (leuco-colorant) et d'un révélateur acide (Figure I-8). Lorsque la matrice est chauffée à une température supérieure à son point de fusion, le colorant devenu liquide réagit avec l'acide et génère le marquage. Cette réaction chimique est localisée à l'endroit chauffé par la tête thermique.



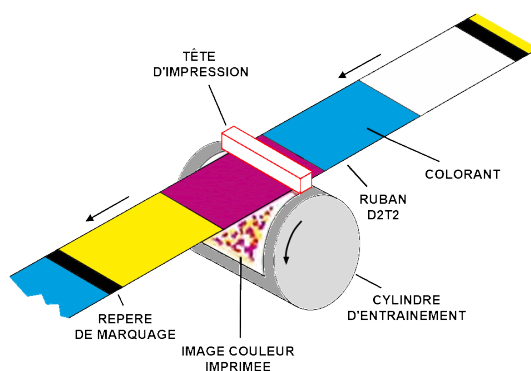
**Figure I-8 – Système d'impression par transfert thermique direct**

Ce procédé d'impression présente l'avantage de ne pas recourir à un médium porteur de l'encre. Compte tenu de ses faibles résistances à la lumière et à la chaleur, il est préférentiellement dévolu aux applications à courte durée de vie telles que l'édition de tickets de caisse, billet de transport etc.

#### 1.2.4.2 Impression thermique à diffusion de colorant (D2T2) [8]

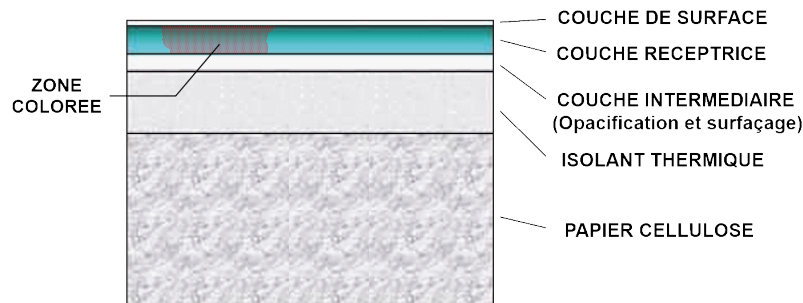
La technologie d'impression par transfert thermique à diffusion de colorant, permet de produire des images de qualité photographique sur des supports plastiques. Elle induit le transfert par sublimation et diffusion, d'un colorant vers son support.

Ce procédé introduit le rôle du ruban porteur de l'élément qui sert au marquage. Il est constitué de trois couches. Sa surface en contact avec la tête d'impression est revêtue d'une couche de matériau destiné à lui conférer des propriétés de glissance. Celles-ci ont pour but de protéger le film de polyéthylène téréphtalate qui est l'élément porteur du ruban. Il est destiné à assurer le transport des colorants qui sont mélangés à une matrice polymère. Soumise à la chaleur délivrée par la tête d'impression, après dépassement de sa température de transition vitreuse, cette dernière libère les colorants qu'elle contient sous forme vapeur, permettant leur pénétration du support receveur. Cette technologie donne l'avantage de moduler l'intensité du marquage en contrôlant la quantité de colorant transféré. Elle est proportionnelle au niveau d'énergie thermique fournie par la tête d'impression. Elle permet également d'obtenir des images couleur par le biais de rubans porteur de séquences de colorants (Figure I-9).



**Figure I-9 – Procédé d'impression D2T2 - Ruban**

Le support, qu'il s'agisse d'un plastique ou d'un papier revêtu, est spécialement destiné à ce type de technologie d'impression. Il est constitué d'une superposition complexe de matériaux dont le but est de contrôler la diffusion des agents colorants. La Figure I-10 présente une vue en coupe d'un support receveur typique.



**Figure I-10 – Support receveur D2T2**

Bien que présentant une excellente qualité d'impression, le recours aux colorants présente l'inconvénient de rendre ce type d'impression sensible à la lumière. Elle ne permet pas, de plus, de conférer à bas coût, à l'impression, des propriétés de résistances aux contraintes extérieures telles que l'humidité, la chaleur etc.

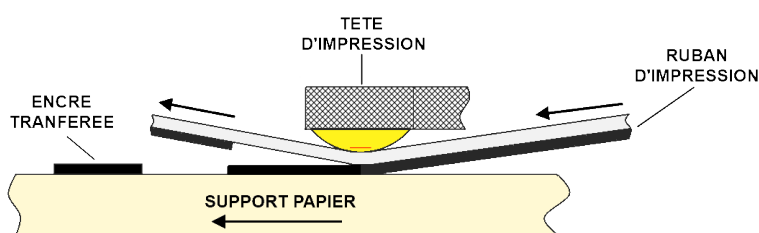
#### *1.2.4.3 Impression par transfert thermique [8]*

La dernière technologie que nous souhaitons présenter concerne l'objet de cette étude. Il s'agit d'une technologie proche du procédé D2T2 dans la mesure où elle recourt également à un ruban porteur de la substance marquante. Il est lui aussi typiquement constitué de trois couches. Une première est destinée à lui conférer des propriétés de glissance, une seconde est constituée du film porteur et une troisième, de l'encre d'impression. Contrairement à la technologie D2T2, l'agent de marquage est ici de type pigmentaire. L'impression n'est donc pas réalisée à partir d'une dissolution de colorant dans l'épaisseur d'un support mais d'une dispersion de particules solides dans une matrice polymère transférée par la suite en surface du support. Ce type de technologie permet d'obtenir des impressions couleur réalisées à partir de pigments organiques ou minéraux. Elle repose cependant majoritairement sur le recours à des pigments constitués de noir de carbone. De plus, ce type d'impression ne nécessite pas d'utiliser des supports spécifiques. Ceux-ci seront choisis parmi la large gamme disponible, en fonction de leur affinité chimique avec l'encre transférée et des propriétés de résistance que l'on souhaite conférer au support imprimé.

Dans ce procédé, le ruban est enserré entre la tête d'impression et le support (Figure I-11). Sous l'effet de la chaleur, la température de l'encre qu'il s'agisse d'une cire ou bien d'une résine est portée au-delà de son point de fusion ou de ramollissement, entraînant sa fixation sur le support.



## Contexte de l'étude



**Figure I-11 – Impression par transfert thermique**

Il s'agit d'un processus binaire qui ne permet pas d'influer sur l'intensité du marquage mais qui présente des avantages substantiels par rapport aux autres technologies d'impression de données variables. Elle permet de répondre à des applications variées en influant notamment sur la nature de l'encre. Cette impression permet de répondre à des exigences de résistance à des environnements sévères tels que les milieux acides ou humides, à des contraintes mécaniques telles que le frottement et elle permet d'obtenir un marquage durable dans le temps. La qualité de ce type d'impression est donc sa haute lisibilité en font un produit de référence dans l'édition des codes à barres.

Compte tenu de leur proximité, nous nous intéressons dans la section qui suit aux travaux dédiés à la modélisation et à l'instrumentation de ce procédé.

### **I.3. Modélisation du procédé d'impression**

Si la recherche bibliographique générale sur les procédés d'impression thermique s'avère assez riche, les documents que nous avons répertoriés sur l'étude et la modélisation des transferts de chaleur dans le système « tête d'impression/ruban » sont assez peu nombreuses. Cela peut s'expliquer tout d'abord par le secret qui entoure le procédé, lié à un secteur industriel de niche. Quelques-uns d'entre eux sont le fruit de brevets et traitent du système de contrôle de l'alimentation électrique des micro-sources de chaleur. Nous ne traiterons pas de ceux-ci dans ce document. Une autre raison à ce faible nombre peut être liée au développement récent de méthodes de calcul par éléments finis couplé à des moyens informatiques suffisamment puissants pour permettre la simulation des phénomènes thermiques mis en jeu. Dans ce qui suit nous donnons un aperçu des travaux que nous avons sélectionnés.

#### **I.3.1. Articles de référence**

Le tableau I-1, présente une synthèse des principaux articles traitant de la technologie d'impression thermique.

Ils distinguent les principaux choix d'étude faits par les auteurs notamment du point de vue des stratégies de modélisation mises en œuvre ainsi que des simplifications réalisées. Ainsi, on constate que du fait de la longue période balayée par ces travaux, les modèles numériques bidimensionnels résolus par la méthode des éléments finis apparaissent tardivement, soit à partir de l'année 2003. Ils permettent de prendre en compte la vitesse de défilement des matériaux, qu'il s'agisse des rubans ou supports d'impression. Nous pouvons observer par ailleurs que les auteurs simplifient le traitement de leur études en ne

considérant pas la thermo-dépendance des propriétés des matériaux mis en œuvre, ni les éventuelles résistances thermiques de contact présentes aux interfaces des systèmes multicouches constituant les procédés d'impression thermique.

Les principaux domaines d'études abordés traitent dans un premier temps, du comportement thermique de ces systèmes ([9] [10] [11] [12] [13]). Quelle que soit la technologie considérée, la qualité d'impression est fortement dépendante du transfert de chaleur à l'œuvre dans ces procédés. Cette problématique est traitée aussi bien au niveau de la tête d'impression et de la façon dont est produite l'impulsion thermique, qu'au niveau du ruban ou du support receveur. D'autres auteurs s'intéressent aux enjeux mécaniques mis en œuvre dans les procédés d'impression thermique tant du point de vue de la nature du contact entre la tête d'impression et le ruban, que du point de vue de la répartition des forces lors de la phase de séparation des rubans et supports d'impression ([14] [10] [15]). Le dernier point traité par les auteurs est relatif au développement ou à l'amélioration des technologies d'impression thermique ([16] [17]).

Contexte de l'étude

		[9]	[10]	[11]	[12]	[13]
<b>Type</b>		Modélisation	Etude Modélisation	Expérimentation Modélisation	Modélisation	Modélisation
<b>Date</b>		1985	2003	1986	1989	2008
<b>Technologie</b>		TT	TT	TT	TT	D2T2
<b>Thème</b>		Étude de l'influence des propriétés thermique du ruban	Étude d'une encre nouvelle Étude mécanique et thermique	Mesure Infra-rouge in situ sous condition simulée d'impression	Développement d'un modèle de comportement thermique	Étude de la diffusion de colorant Étude du champ de température
<b>Géométrie</b>	3D		3D			
	2D					(quasi 1D)
	1D	1D			1D	
<b>Modèle numérique</b>	MEF		X			X
	Analytique	X			X	
<b>Propriétés matériau</b>	constante	X	X		X	X
	Thermo-dépendantes			X		
<b>Défilement</b>		∅	X	∅	∅	∅
<b>RTC</b>		∅	∅	∅	∅	∅

Tableau I-1 - résumé des travaux dédiés à la modélisation du procédé d'impression thermique

Le travail de D.J. SANDERS des laboratoires XEROS [9] fait partie des premières études consacrées à l'analyse du transfert thermique dans le cas d'un procédé d'impression par transfert thermique auxquelles nous avons pu avoir accès. Dans ces travaux, un modèle analytique unidimensionnel simplifié, à deux couches est développé (Figure I-12). Les auteurs se sont tout d'abord intéressés à la détermination expérimentale des propriétés thermo-physiques de différents matériaux susceptibles de rentrer dans la composition des films de transfert thermique. Des mesures expérimentales des conductivités thermiques et des résistances thermiques de contact sont réalisées et implémentées dans le modèle développé.

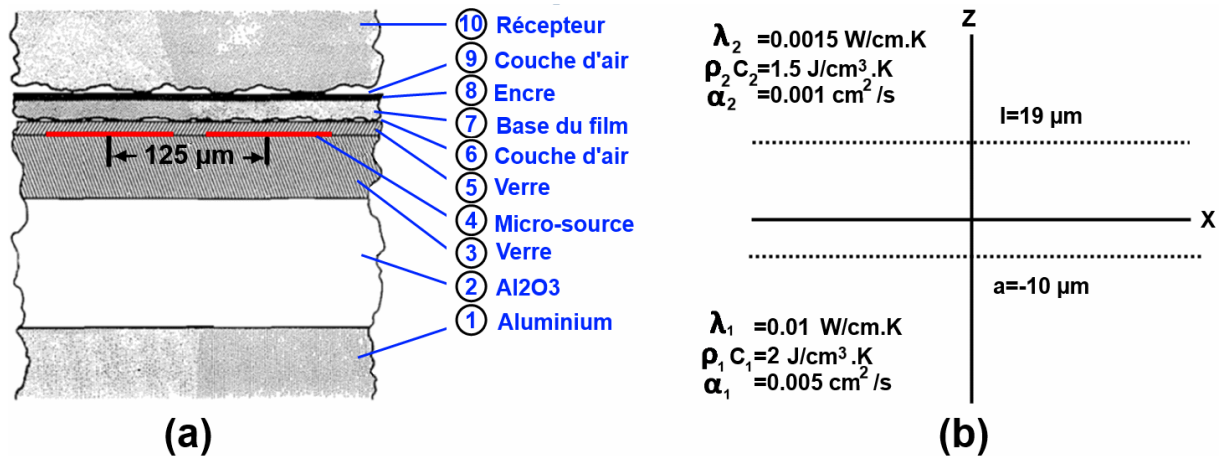


Figure I-12 – Géométrie d'impression par transfert thermique (a) et modèle simplifié à deux couches associées (b).

Dans ces travaux les auteurs montrent l'influence sur les niveaux de température atteints, des paramètres liés aux rubans d'impression, aussi bien du point de vue de leurs propriétés thermiques que de leurs épaisseurs (Figure I-13). Ils calculent notamment que la température maximale à l'interface entre la tête d'impression et le ruban est de 250 °C

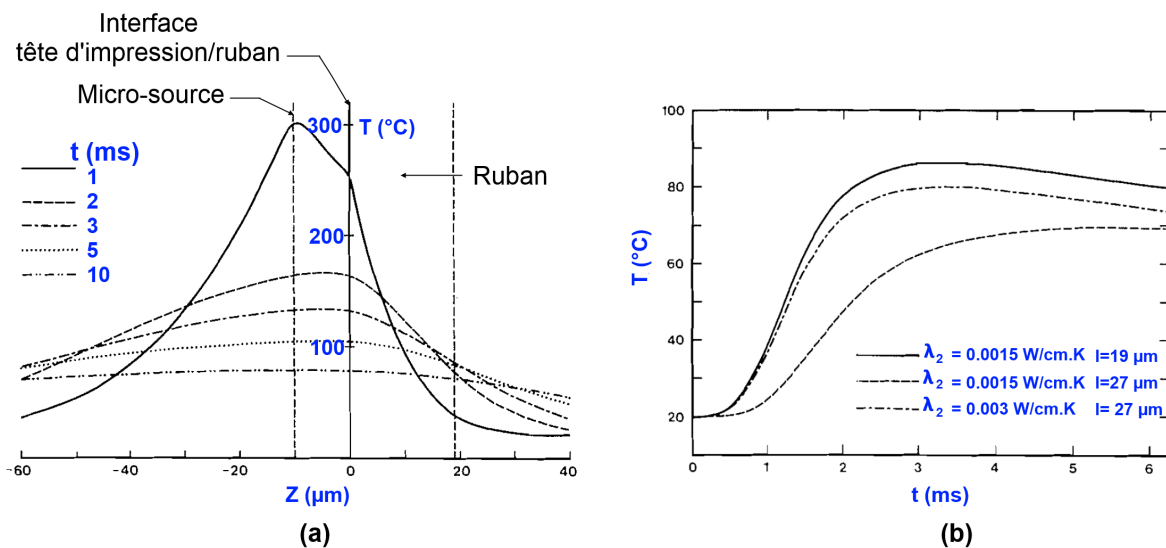
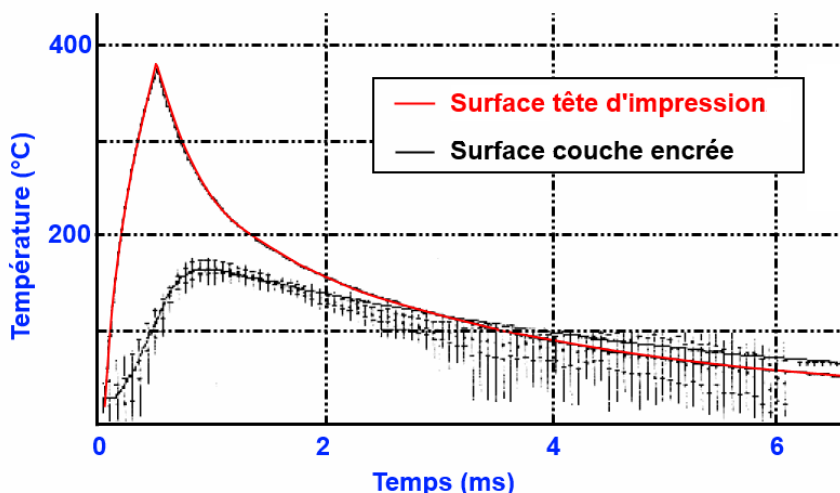


Figure I-13 – Influence thermique du temps d'impulsion (a) et Influence des propriétés thermiques du ruban et de son épaisseur (b).

## Contexte de l'étude

Dans ces travaux, ils font également la mesure de la densité optique de l'impression en fonction des mêmes paramètres de variation et montrent qu'elle augmente avec la durée des impulsions thermiques appliquées au système. Ils révèlent également que la sensibilité de l'impression est liée à l'épaisseur du ruban et à ses propriétés diffusives.

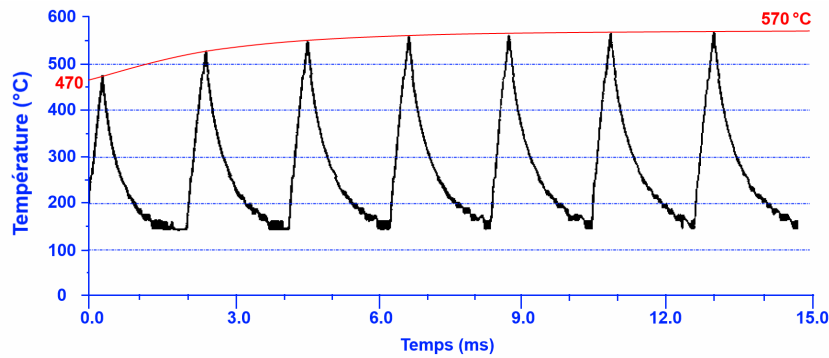
Dans des travaux ultérieurs, D.A. DAVIDS AND H.L. BERTONI [11] ont étudié la distribution spatiale de la chaleur au cours du temps, dans un système d'impression par transfert thermique. Ils ont développé un dispositif expérimental de mesures par thermographie infrarouge de la température atteinte à l'interface entre la tête d'impression et le ruban ainsi qu'en surface de la couche encrée. Les observations sont réalisées à travers une fenêtre constituée d'un film de polyamide destinée à appliquer une pression sur le système et à simuler le chargement thermique dû à la présence du support papier. Les résultats de leurs expériences montrent des niveaux de température (Figure I-14) atteints par la tête d'impression de l'ordre de 400 °C. Ils sont supérieurs à ceux calculés précédemment par D.J. SANDERS. En surface de la couche encrée, les auteurs mesurent une température de l'ordre de 170 °C.



**Figure I-14 – Mesures des températures de micro-source et en surface de la couche encrée**

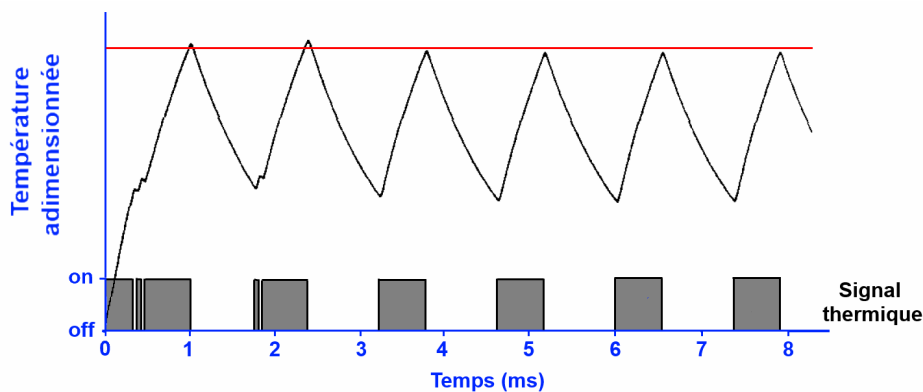
Dans un second temps, D.A. DAVIDS AND H.L. BERTONI ont développé un modèle analytique unidimensionnel du transfert de chaleur dans le système. Celui-ci montre un bon accord avec les résultats des mesures effectuées. Il est ensuite réinvesti pour étudier l'influence de l'épaisseur du ruban et de la durée des impulsions thermiques sur les niveaux de températures atteints dans le système. Ils montrent notamment que le temps caractéristique de fusion de l'intégralité de l'encre est fortement dépendant de son épaisseur.

Dans les travaux précédemment détaillés, l'objectif des auteurs était principalement de développer un modèle du transfert de chaleur dans les rubans et supports d'impression. Ils cherchaient à analyser les facteurs influençant les niveaux de températures obtenus dans ces couches. F.W. Drees et al [12] abordent cette problématique du point de vue de la tête d'impression et notamment de la stabilité des impulsions thermiques générées (Figure I-15).



**Figure I-15 – Mesure de température par thermographie infrarouge en surface de micro-source de chaleur – Instabilité thermique**

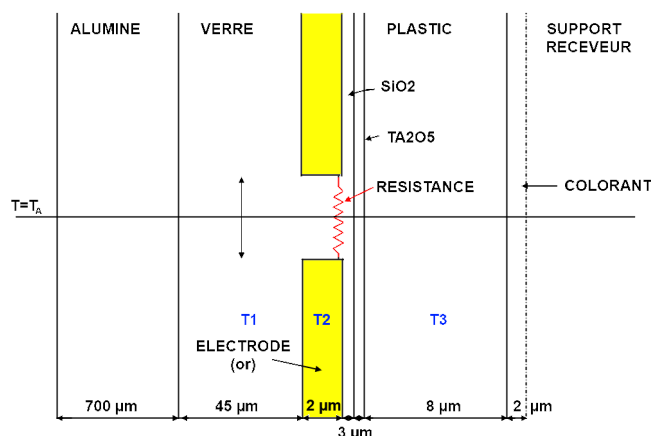
Ils montrent au travers de mesure réalisées par thermographie infrarouge sur un groupe d'impulsions successives, que l'architecture du signal électrique à l'origine du flux de chaleur est potentiellement source d'instabilité de la réponse thermique du système. Un régime périodique stationnaire est obtenu à partir de la quatrième impulsion. Les auteurs ont développé un modèle analytique unidimensionnel du système validé par les mesures obtenues par thermographie infra-rouge. Il leur a permis par la suite de déterminer le signal thermique propre à générer une réponse périodique en température, stationnaire dès la première impulsion.



**Figure I-16 – Réponse thermique et signal associé**

Les attentes des auteurs au regard du modèle développé étaient de dimensionner les épaisseurs de matériaux, les propriétés thermiques afférentes ainsi que l'architecture du signal électrique.

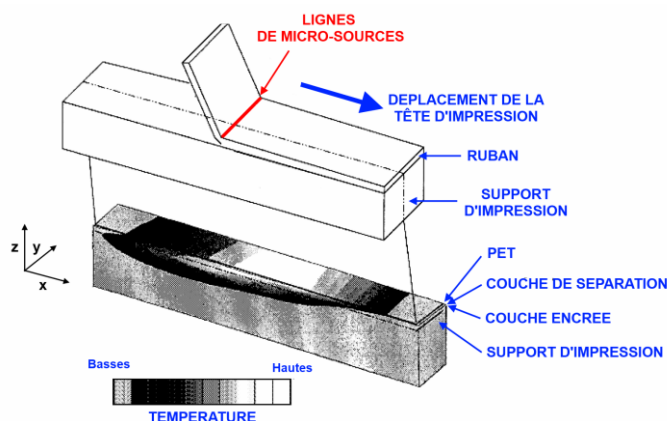
D'autres travaux ont suivi et ont montré que l'approche unidimensionnelle n'était pas suffisante pour décrire correctement le transfert de chaleur dans les systèmes d'impression thermique et notamment ceux développés par R. UYHAN et J.A. KING-HELE [13]. Ils se sont intéressés au transfert de chaleur dans un procédé de sublimation thermique et ont développé un modèle analytique quasi-unidimensionnel (Figure I-17).



**Figure I-17 – Structure d'impression d'un système d'impression thermique D2T2**

Leur objectif était de corrélérer la quantité de colorant transféré au support receveur en fonction des niveaux de températures atteints dans le système. Ils ont montré que celui-ci était affecté par la diffusivité thermique des électrodes en métal « or », chargé d'alimenter en courant les micro-sources de chaleur.

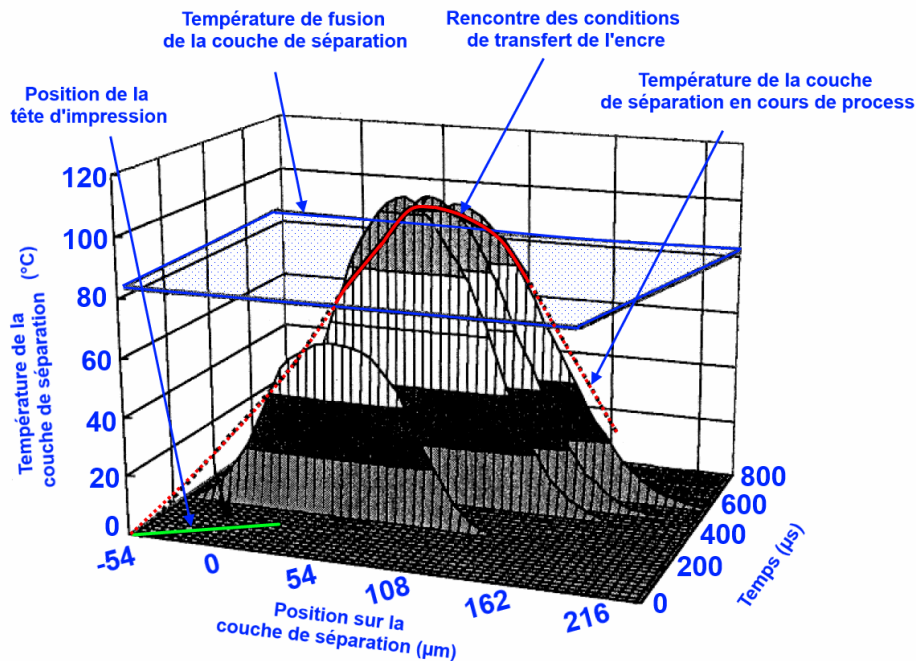
Dans des travaux plus récents I.HIBINO [10] propose un modèle numérique plus complexe en trois dimensions. Il décrit l'analyse d'un nouveau ruban d'impression par transfert thermique présentant la particularité d'être constitué d'une couche encrée bi matériaux. Une première épaisseur en cire sert à faciliter le décrochage au niveau du PET, une seconde, composée de résine, à l'encrage. Le procédé d'impression étudié à une résolution de 600 dpi. Les rubans et supports d'impression sont considérés fixes et la source de chaleur simulée comme condition limite mobile (Figure I-18).



**Figure I-18 – Modèle tridimensionnel du transfert de chaleur dans un procédé d'impression par transfert thermique**

Dans ce travail, l'auteur ne renseigne pas sur le paramétrage de son modèle notamment du point de vue de la puissance injectée, des conditions limites, des résistances thermiques de contact etc. Il montre cependant que la prise en considération de l'évolution des propriétés viscoélastiques des couches encrées et donc de la température de fusion de l'encre, peut constituer un critère d'impression recevable (Figure I-19). Ce travail est en partie similaire à celui que nous avons mené. Cependant, la publication ne permet pas d'apprécier la

construction du modèle numérique et on peut regretter l'absence de comparaison avec des données expérimentales.



**Figure I-19 – Température de la couche de séparation en fonction de X**

### I.3.2. Conclusion

Les différents articles détaillés montrent la progression de la complexité des modèles développés. Ils montrent également que moyennant des hypothèses simplificatrices importantes, il est possible par ce biais d'aider au dimensionnement des matériaux entrant dans la composition des rubans, d'ajuster le choix des propriétés thermiques de ceux-ci tout en permettant l'optimisation du signal électrique à l'origine du flux de chaleur. Cependant, dans le contexte de l'époque où ces études ont été réalisées, les limites de ces approches apparaissent. On peut constater que lorsque l'on s'attarde sur les niveaux de températures mesurés et calculés, il peut y avoir un facteur 2 entre différentes publications. Dans les travaux qui suivent, nous proposons un modèle bidimensionnel représentatif du transfert de chaleur dans un procédé d'impression par transfert thermique. Nous y intégrons les résistances thermiques de contact entre les différentes couches du système ainsi que le défilement des rubans et support d'impression.



# Chapitre II

## Description et caractérisation du système

### II.1. Introduction

Dans le domaine de l'impression par transfert thermique, il existe un grand nombre d'appareils, de marques et de modèles différents, reposant sur des technologies d'impression variées. De la même manière, une large gamme de supports d'impression et autant de rubans encres, d'épaisseurs et de composition chimique diverses, sont disponibles.

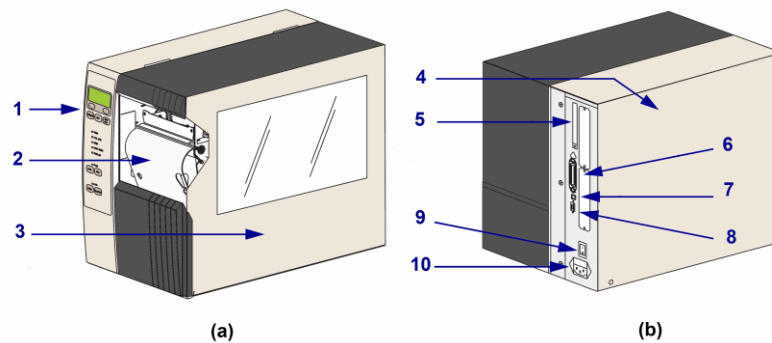
Dans ce travail, nous avons fait le choix d'une configuration d'impression (une imprimante, une tête d'impression, un ruban et un support), représentative du procédé industriel. Notre choix s'est également orienté en fonction des capacités d'instrumentation de l'appareil.

Aussi nous nous attachons dans ce chapitre, à décrire de façon « macroscopique » les différents organes constituant l'imprimante que nous avons sélectionnée. Nous pointons éventuellement les différences qu'elle présente comparativement à d'autres matériels d'impression. Nous présentons ensuite une analyse dimensionnelle des micro-sources de chaleur qui sont à l'origine du transfert de chaleur. Une analyse EDX (Energie Dispersive X-ray) est réalisée afin de déterminer les espèces chimiques en présence et de faire des hypothèses quant aux propriétés thermo-physiques des différents matériaux constitutifs des micro-sources de chaleur. Enfin, nous présentons le ruban et le support d'impression sélectionnés ainsi que la caractérisation des propriétés thermo-physiques de ces deux éléments.

### II.2. Description de l'imprimante

Dans ce premier paragraphe, nous allons nous attacher à décrire l'imprimante servant de support à l'étude de l'impression par transfert thermique. L'appareil sélectionné est de marque ZEBRA, modèle 140 Xi III+ [18]. Il s'agit d'une imprimante industrielle destinée à l'impression de code à barres, étiquettes de facturation ou encore bordereaux d'emballage. Ce type d'imprimante est appelé à fonctionner dans des environnements industriels difficiles et sur de longues périodes. Ces appareils fonctionnent aussi bien en mode « transfert direct », c'est-à-dire par marquage sur un matériau thermosensible, qu'en mode « transfert thermique », autrement dit par dépôt d'un matériau thermo-fusible sur un support (§ 1.2.4). Dans le cadre de cette étude, l'imprimante est pilotée par un ordinateur externe, à partir du logiciel d'impression d'étiquettes Bartender [19].

L'imprimante ZEBRA 140 xi III+ a pour dimensions 261 x 393 x 517 mm (Figure II-1). Elle présente en face avant, une interface de paramétrage destinée aux saisies manuelles effectuées par l'opérateur ainsi qu'un dévidoir à étiquettes. En face arrière, elle est équipée d'un ensemble de connecteurs externes destinés à coupler l'appareil à un système informatique ou bien à charger des données de transcription.



**Figure II-1 - Imprimante ZEBRA 140Xi III+ - face avant (a) – face arrière (b)**

<b>1</b>	Interface de paramétrage
<b>2</b>	Dévidoir à étiquettes
<b>3</b>	Porte d'accès consommables
<b>4</b>	Porte d'accès système électronique
<b>5</b>	Insert carte mémoire
<b>6</b>	Port parallèle IEEE 1284
<b>7</b>	Port USB 2
<b>8</b>	Port RS 232
<b>9</b>	Interrupteur marche/arrêt
<b>10</b>	Connecteur d'alimentation

**Tableau II-1 - Descriptif de l'imprimante Zebra 140 Xi III+**

### II.2.1. Accès consommables

Un capot amovible latéral de l'imprimante permet d'avoir accès à la partie de l'appareil accueillant les consommables ainsi que la zone d'impression. Sur le schéma simplifié de l'imprimante présenté en Figure II-2, nous observons 5 éléments principaux :

- La tête d'impression
- Le cylindre de contre pression
- Le cylindre de récupération de dépouille
- Le ruban d'impression par transfert thermique
- Le support d'impression

## Description et caractérisation du système

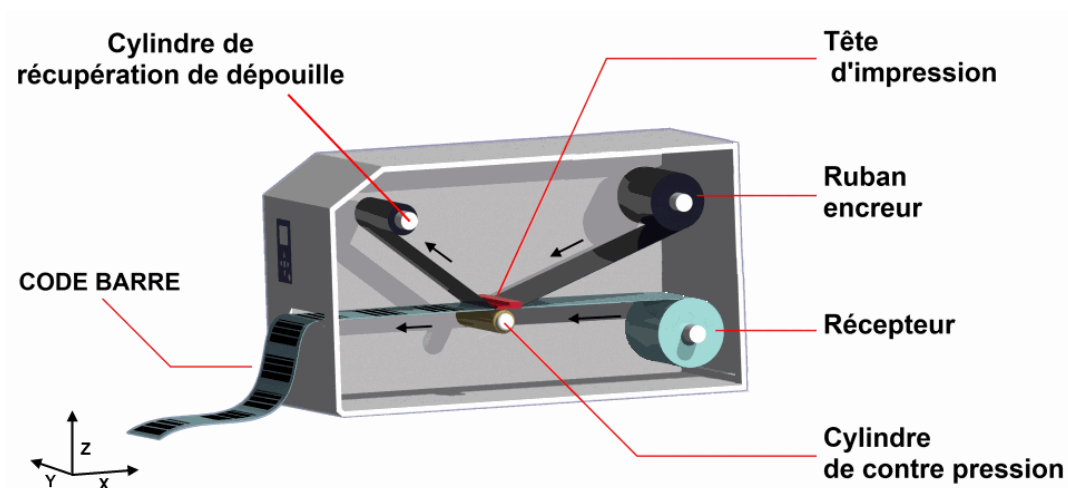


Figure II-2 - Accès consommables de l'imprimante

### La tête d'impression

La tête d'impression est le support des micro-sources thermiques qui génèrent le flux de chaleur nécessaire à la fusion de l'encre. Elles sont disposées sur un alignement perpendiculaire au sens de défilement des rubans et supports d'impression. Les micro-sources de chaleur sont alimentées et pilotées électriquement par l'imprimante. Un courant est envoyé par le biais d'électrodes, au niveau de chacune d'entre elles, indépendamment les unes des autres. Il traverse une couche résistive et génère un flux de chaleur par effet Joule.

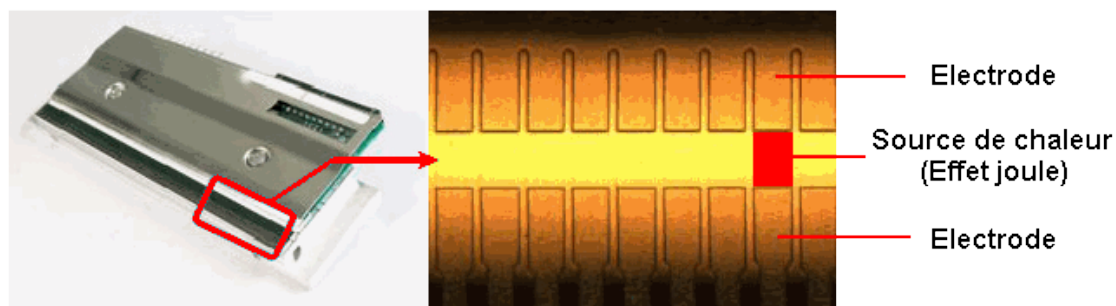
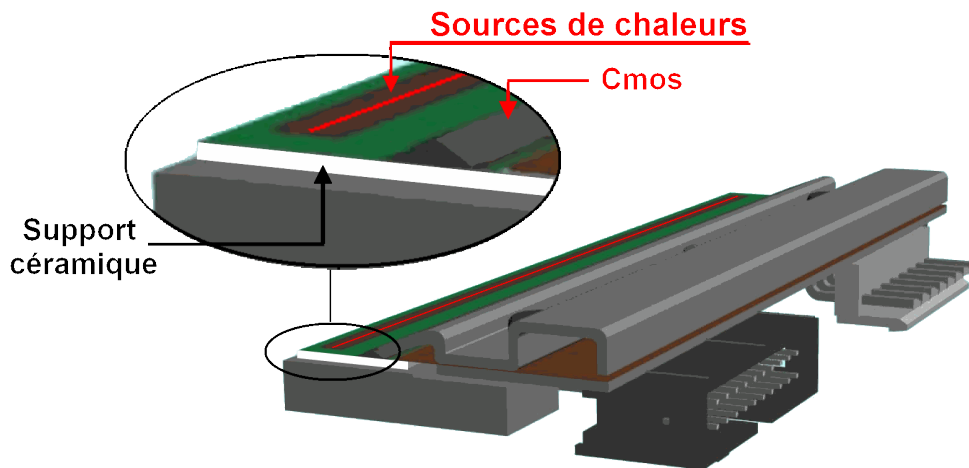


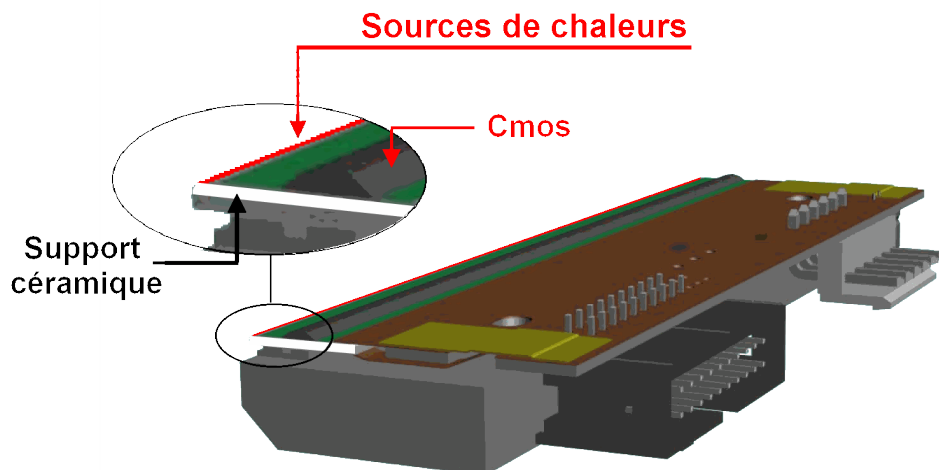
Figure II-3 – Tête d'impression et micro-sources de chaleur

Il existe différents modèles de tête d'impression [20, 21], tant du point de vue de leur géométrie, selon que les sources se trouvent en bordure de tête d'impression ou non, que de leurs dimensions. On pourra distinguer principalement, les têtes dites « flat head » (Figure II-4) et « corner edges » (Figure II-5). Dans le premier cas, les micro-sources sont disposées à plat, sur une platine de substrat céramique. La tête d'impression est positionnée parallèlement au sens de défilement du ruban.



**Figure II-4 – Configurations de tête d'impression de type « flat head »**

Dans le second cas, les micro-sources sont alignées en bordure de la platine. Dans ce cas, la tête d'impression est positionnée selon un angle de l'ordre de 30° par rapport au sens de défilement du ruban. Dans l'un ou l'autre cas, leurs résolutions vont de 200 à 600 dpi (dot per inch) soit une surface unitaire maximale de l'ordre du  $10^{-2}$  mm<sup>2</sup>.



**Figure II-5 – Configurations de tête d'impression de type « corner edge »**

Dans cette étude, nous nous intéressons à une tête d'impression de type « flat head » de marque ZEBRA, modèle G48000M. La résolution de cet appareillage (Figure II-4) est de 204 dpi. Les dimensions des têtes d'impression pouvant varier d'un modèle à l'autre, le plan de cotation de la tête d'impression utilisée dans ce travail est fourni en Annexe 1.

Compte tenu des faibles dimensions du système étudié, nous avons retenu une technologie représentative du marché de l'impression par transfert thermique tout en veillant à minimiser les difficultés d'instrumentation, du point de vue mécanique et thermique. La tête d'impression reste en position statique en cours de fonctionnement tandis qu'elle peut être oscillante pour d'autre machine et la résolution de 204 dpi offre une surface de mesure en température plus importante que pour toutes les autres disponibles.

## Description et caractérisation du système

### Le cylindre de contre pression

Le cylindre de contre pression est constitué d'un cylindre en acier inoxydable de 10 mm de diamètre, recouvert d'un revêtement souple en caoutchouc de 5 mm d'épaisseur (Figure II-6). Il a pour dimensions 20 x 140 mm. Il est mis en rotation électriquement par le biais d'un moteur pas à pas.

Son rôle est double. Il sert à entrainer les rubans et supports lors de l'impression dans un sens perpendiculaire à l'alignement des micro-sources de chaleur (60 à 300 mm/s). Il consiste également à transmettre le contre effort appliquée sur la tête d'impression.

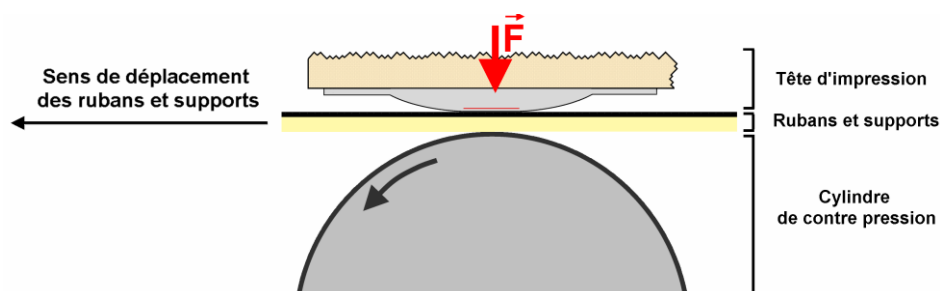


Figure II-6 – Cylindre de contre pression

L'effort  $\vec{F}$  est assuré par un double système mécanique de serrage à ressorts, réglé manuellement par l'opérateur et situé au-dessus du dispositif d'impression (Figure II-7). Ils viennent en appui sur le capot métallique sous lequel est fixée la tête d'impression.

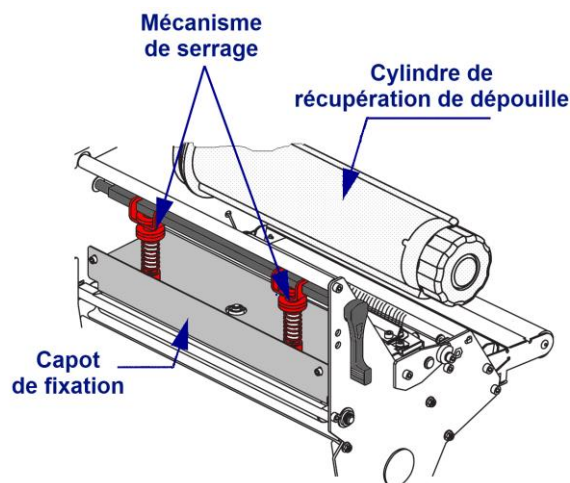


Figure II-7 – Mécanisme de serrage de la tête d'impression

### Le cylindre de récupération de dépouille

Cet équipement est destiné à récupérer le ruban usagé (Figure II-2). Il est mis en rotation par une chaîne de transmission liée au cylindre de contre pression. Au-delà de son rôle de récupération, il sert également à tendre le ruban en sortie de tête d'impression afin d'assurer

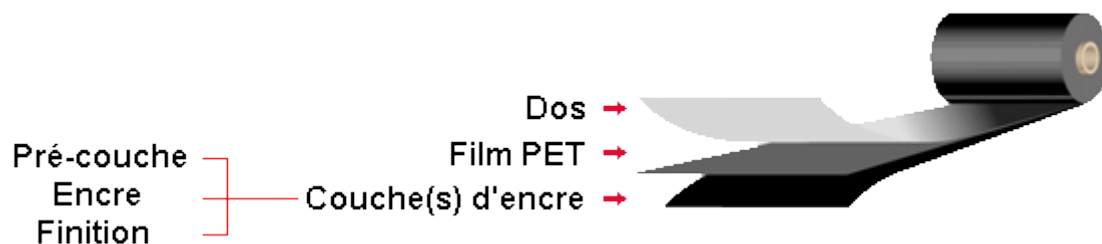
un « pelage mécanique » adéquat, permettant ainsi le transfert de l'encre. Ce cylindre est équipé d'un système à ressort générant une tension constante du film encré usagé.

### *Le ruban d'impression*

Les dimensions des bobines de ruban d'impression par transfert thermique couramment rencontrées sont de 110 mm de largeur pour un diamètre de 60 mm et une longueur déployée de l'ordre de 300 m. Ces dimensions peuvent cependant varier selon l'application industrielle à laquelle elles sont destinées.

Un ruban encreur est un système multicouche constitué de 3 à 5 éléments. Le ruban retenu pour cette étude contient trois épaisseurs de matériaux (Figure II-8).

Au contact direct de la tête d'impression, une première couche appelée dos, de quelques dixièmes de microns d'épaisseur, est destinée à assurer le bon glissement du ruban, quelle que soit la température de surface. Une seconde couche est constituée d'un film de polyéthylène téréphtalate (PET) de 4 à 5 microns d'épaisseur, destiné à recevoir en face supérieure, le dos et en face inférieure la troisième couche de matériau, constituée d'une encre thermo-fusible ; Peut éventuellement être admise, une couche intermédiaire entre la 2<sup>de</sup> et la 3<sup>ème</sup> (pré-couche). Elle est destinée à favoriser le décrochage de l'encre de son support PET, ou à offrir au produit final, des propriétés particulières en termes mécaniques ou bien de résistance aux attaques chimiques. Une couche de surfacage peut également être prévue afin de favoriser l'accroche de l'encre sur le support.



**Figure II-8– Constitution d'un ruban encreur**

Les encres portées par le ruban peuvent être de différente nature selon l'application à laquelle elles se destinent. Elles sont constituées de mélanges de cire accompagnées de résine. Le choix de tel ou tel ruban sera dicté par les propriétés que l'on souhaite conférer à l'impression.

L'épaisseur totale d'un ruban d'impression par transfert thermique est de l'ordre de **10 microns**.

### *Le récepteur*

Au même titre que le ruban, le récepteur se présente sous la forme d'une bobine de quelques centaines de mètres de longueur. Il est constitué d'une à deux épaisseurs de matériaux que sont, le support d'impression à proprement parler, et éventuellement, un film détachable que nous dénommerons « liner », destiné à être retiré au moment du collage de l'étiquette.

## *Description et caractérisation du système*

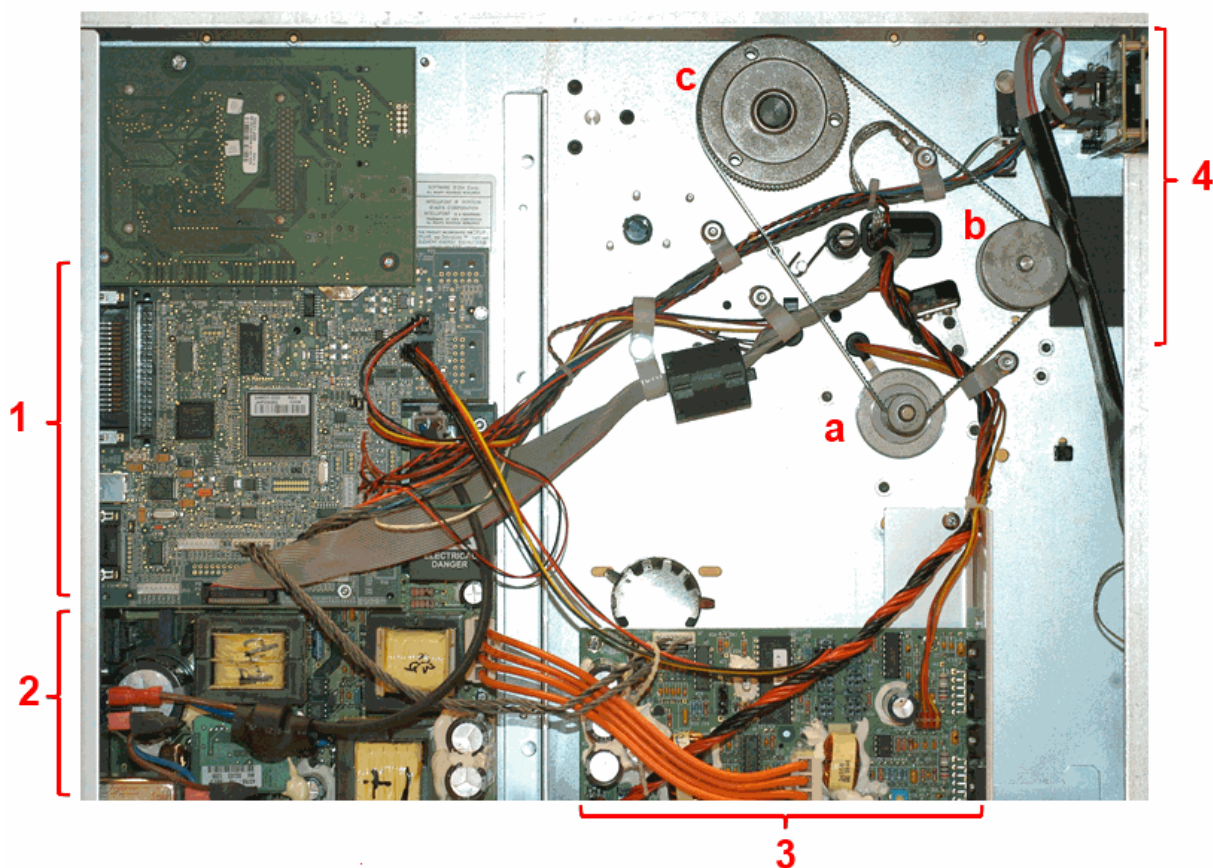
Les supports d'impression sont très variés (Figure II-9), tant du point de vue de leur épaisseur que du point de vue de leur nature. Ils peuvent être en papier vélin calandré ou non, en papier glacé, en matériaux synthétiques, métalliques ou encore en tissus. Pour exemple, une étiquette en papier vélin (a) présentera une première épaisseur pouvant être de l'ordre d'une soixantaine de microns, adossée à un liner d'une cinquantaine de microns tandis qu'un support en matériau synthétique (b) pourra, quant à lui, se présenter en un ensemble multi ou monocouche (respectivement b et c) de quelques dizaines de microns d'épaisseur.



**Figure II-9 – Exemples d'impression par transfert thermique :  
sur papier vélin 100  $\mu\text{m}$  (a), film aluminium couché synthétique 70  $\mu\text{m}$  (b), film  
polyéthylène téréphtalate 30  $\mu\text{m}$  (c)**

### II.2.2. Accès compartiment électronique

Le démontage du carénage latéral de l'appareil permet d'avoir accès au compartiment électronique (Figure II-10). On peut y distinguer, à gauche de l'image, la carte électronique principale de l'imprimante (1). C'est elle qui génère les signaux électriques envoyés à la tête d'impression. Au-dessous, se situe le bloc transformateur (2). L'électronique de puissance (alimentation de la tête, alimentation du moteur électrique) est pilotée quant à elle par une carte secondaire présente en bas, en partie centrale (3). En haut à droite, se trouve l'affichage digital ainsi que le pavé de commandes numériques (4). Dans la partie haute de l'image, est localisé le système mécanique d'entraînement des rubans et supports. Il est constitué de 3 roues crantées (a, b et c) reliées par une courroie de transmission.



**Figure II-10 – Imprimante – Compartiment électronique**

### ***Moteur et transmission***

Cette partie de l'imprimante est le siège de la chaîne de transmission mécanique par courroie reliant le cylindre de contre pression, au cylindre de récupération de dépouille (Figure II-2). Elle est mue par un moteur électrique à 500 demi-pas. A l'œil nu, le déplacement des rubans et supports semble s'effectuer à vitesse constante. En réalité, le moteur « pas à pas » se traduit, comme nous le verrons, par une variation de type sinusoïdale de la vitesse.

### ***Carte électronique***

Les imprimantes par transfert thermique sont équipées d'une carte électronique destinée à gérer le défilement des rubans et supports et à commander le signal électrique envoyé à la tête d'impression.

Par le biais de l'interface située en face avant de l'appareil ou bien par le biais d'un équipement informatique supplémentaire, l'opérateur saisit les paramètres d'impression de la machine (Figure II-11). Dans le cadre de la présente étude des phénomènes liés au transfert thermique, il s'agira principalement de la vitesse ( $v$ ) de défilement des rubans et supports ainsi que de l'indice  $I_E$ , pour « Indice d'Énergie », représentatif de la quantité d'énergie transmise au ruban, en vue de provoquer l'inscription d'un point.



## Description et caractérisation du système

Dans les faits, l'opérateur saisit un motif à imprimer qui est converti en signal électrique délivré à chacune des micro-sources de chaleur, indépendamment les unes des autres.

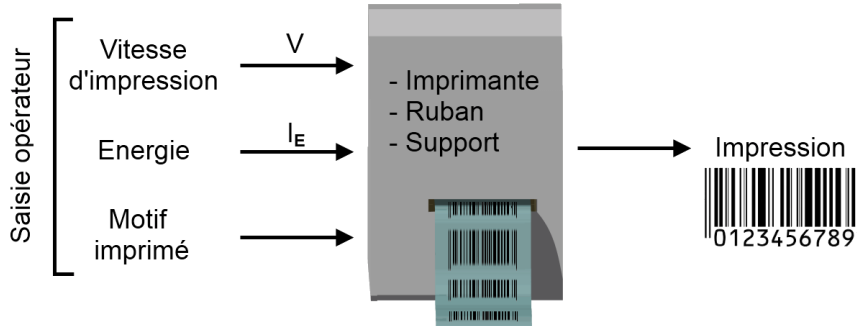


Figure II-11 – Entrées du système d'impression

## Principe d'écriture d'un motif

Dans le cadre de l'impression par transfert thermique, le principe de transcription de données numériques en données physiques lisibles par un appareil ou l'œil humain repose sur la création d'un maillage de points généré par la carte électronique de l'imprimante. La précision et la finesse de ce quadrillage dépendent de la résolution du dispositif. Pour bien se figurer la procédure d'inscription, il faut considérer que les rubans et supports se déplacent pas à pas, c'est-à-dire en une suite de mouvements et arrêts, au même titre que le moteur d'entraînement. A chaque arrêt, correspond éventuellement l'envoi d'une impulsion électrique qui génère la fusion de l'encre. La Figure II-12 illustre un exemple d'écriture. L'imprimante utilisée est de résolution 200 dpi. Le motif programmé (a) est un « a » de police « 8 », soit d'une largeur de 1,6 mm pour une hauteur de 1,5 mm. Au vu de ces dimensions et de la résolution d'impression, ce motif sera imprimé en 12 étapes successives, pour aboutir au motif imprimé (b). Au début de la transcription, soit au temps impulsionnel  $t_{i-12}$ , seules les micro-sources 8 à 14 vont être excitées, tandis qu'en fin d'inscription, au temps  $t_i$ , ce seront les éléments chauffants 7 à 11 ainsi que 13 à 16, qui seront sollicités.

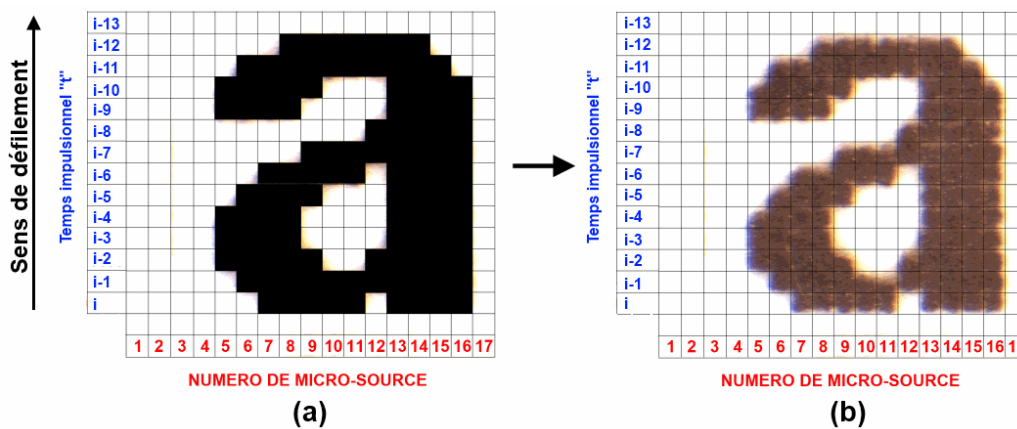
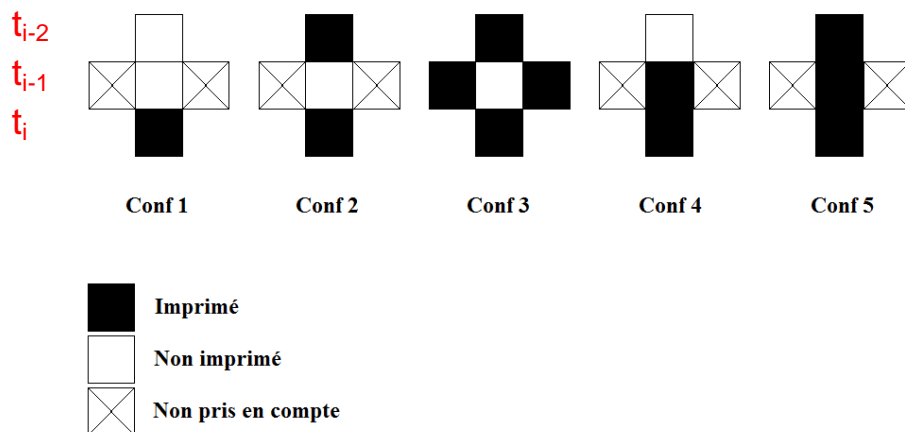


Figure II-12 – Exemple de transcription de données numériques en données physiques  
a) Motif programmé b) Motif imprimé

## Historique thermique

Chaque motif est créé par excitation individuelle des micro-sources de chaleur. Cependant, afin de préserver celles-ci d'une élévation en température trop importante et ainsi garantir leur longévité, les imprimantes de transfert thermique intègrent un algorithme de calcul de la puissance délivrée. Celui-ci tient compte de l'histoire thermique vécue par la source. Ainsi, comme le montre la Figure II-13 différentes configurations sont envisagées selon qu'à un temps donné «  $t_i$  », la source a été excitée ou non, au cours des deux temps précédents. De la même manière, l'algorithme de pilotage de la puissance délivrée prend en considération l'environnement immédiat de la micro-source considérée [22].



**Figure II-13 – Algorithme de pilotage des sources de chaleur**

Dans ces exemples, la configuration n°1 tient compte du fait que la micro-source n'a pas été excitée aux deux temps précédents. On retrouve cette configuration dans l'impression de l'exemple de la Figure II-12 avec la micro-source n°11 au temps impulsionnel  $t_{i-12}$ . A l'inverse, la configuration n°4 fait état d'une seule excitation ayant eu lieu au temps immédiatement précédent. Sur la Figure II-12, la micro-source n°11 au temps impulsionnel  $t_{i-11}$  est dans ce cas.

Précisons que les configurations présentées sur la Figure II-13 ne sont pas exhaustives, témoignant d'un algorithme de pilotage des micro-sources de chaleur sophistiqué.

### II.3. Description et caractérisation de la tête d'impression

Pour bien appréhender les transferts de chaleur intervenant au cours d'un cycle d'impression, il est nécessaire de connaître les propriétés thermo-physiques des matériaux ainsi que leurs dimensions.

Initialement, nous n'avons qu'une image très floue de la conformation géométrique de la micro-source de chaleur et de son environnement. Les données émanant de fabricants tels que Kyocera [22], n'en donnent qu'un vague aperçu. Pourtant, pour s'adapter au mode d'impression, les spécificités géométriques d'une tête d'impression peuvent être nombreuses [23, 24]. Si la forme générale semble connue [13, 25, 26], la littérature ne nous donne

## Description et caractérisation du système

aucune information précise sur sa constitution. Dans les paragraphes suivants, nous allons nous attacher à décrire par quels moyens nous avons caractérisé géométriquement la micro-source ainsi que la méthode adoptée pour en déterminer les espèces chimiques.

### II.3.1. Analyse dimensionnelle de la tête d'impression

Dans l'environnement immédiat des sources de chaleur, la tête d'impression se présente sous la forme d'un alignement d'éléments chauffants, adossée à un substrat lui-même supporté par une plaque d'aluminium. Les dimensions surfaciques de ces micro-sources sont de  $135 \times 110 \mu\text{m}^2$  (Figure II-3). Du point de vue des épaisseurs, l'analyse dimensionnelle des sources de chaleur et de leur environnement immédiat a été réalisée en procédant à une coupe transversale opérée sur le substrat supportant les sources de chaleur.

Dans un premier temps, un support céramique (Figure II-14) a été débité et enrobé d'une matrice de polyester chargée de particules d'aluminium afin de réduire le retrait du polymère lors de sa réticulation. L'échantillon obtenu a ensuite été débité en tranche et poli soigneusement, jusqu'à obtention d'une surface la plus lisse et plane possible.

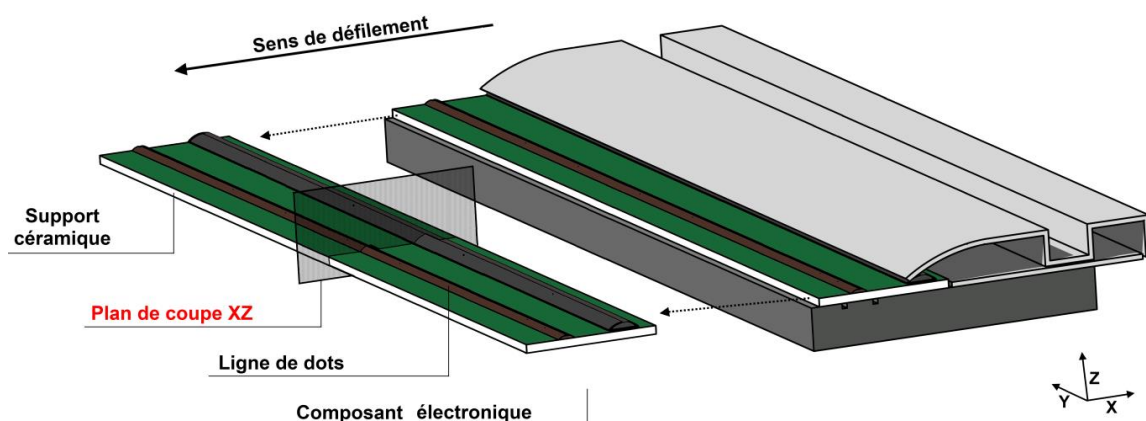


Figure II-14 – Schéma de coupe du support de dots

La Figure II-15 présente un échantillon à l'échelle 2, après préparation. Nous pouvons observer la plaquette support des micro-sources de chaleur, d'une longueur totale de 15 mm ainsi qu'un composant électronique présenté en sous face (Cmos : Complementary Metal Oxide Semi-conductor).

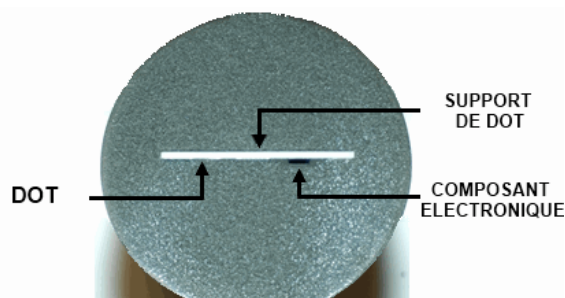
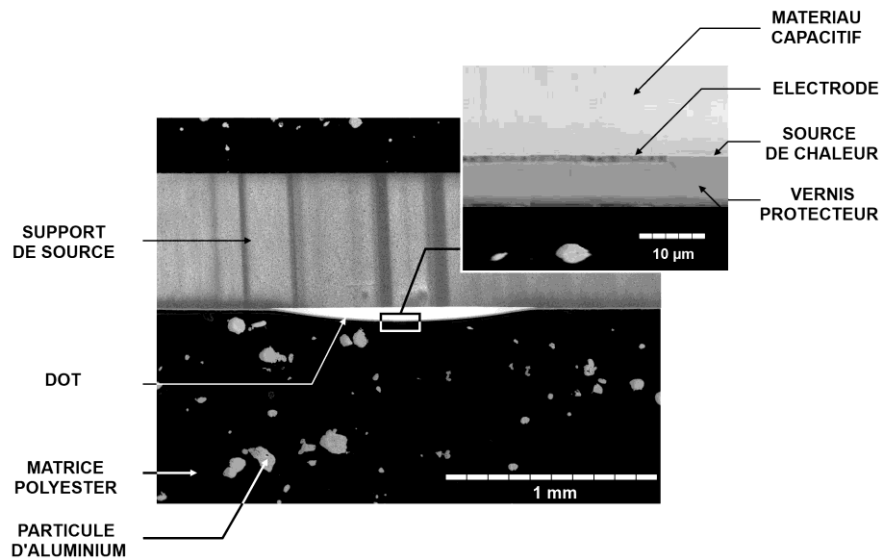


Figure II-15 – Plaquette céramique support des sources

Une analyse plus poussée réalisée dans les locaux de l'entreprise Armor à l'aide d'un Microscopie Électronique à Balayage [27] a permis d'obtenir une image plus fine de la micro-source et de son environnement immédiat et ainsi d'en faire le dimensionnement (Figure II-16). Macroscopiquement, elle se présente sous la forme d'une section de disque adossée à un substrat de matière blanche. Dans la suite de nos travaux, nous donnerons l'appellation de « **dot** » à cette zone de la tête d'impression. L'endroit où est produite spécifiquement la chaleur sera désigné par le terme de « **micro-source** » ou « source de chaleur » [28].

Ainsi, le grossissement de la surface, au centre du dot, permet de mettre en évidence la structure multicouche constitutive de ce système. Nous pouvons observer les électrodes d'alimentation de la source de chaleur, de même que la couche de matériau capacitif, principale contributrice de la structure du dot. En surface, nous distinguons une couche de vernis. Nous n'observons pas directement la source de chaleur. Nous faisons l'hypothèse qu'elle est suffisamment fine pour être confondue avec l'interface entre les couches capacitive et protectrice.



**Figure II-16 – Image MEB - Coupe d'une source de chaleur**

La Figure II-17 reprend les observations réalisées au MEB et présente une schématisation hors échelle, de la géométrie d'un dot. La couche de matériau capacitif ( $\Omega_{2,1}$ ) est destinée à accumuler de la chaleur dans la tête d'impression. Au centre du dot, elle présente une épaisseur de 60  $\mu\text{m}$ . La couche de vernis  $\Omega_{2,2}$  protège la résistance et les électrodes de l'usure due aux frottements induits par le défilement du ruban. Son épaisseur est de 7  $\mu\text{m}$ . Les électrodes ont une épaisseur inférieure à 1  $\mu\text{m}$ . Enfin, le dot est adossé au support  $\Omega_1$ , lui-même fixé sur une dernière couche  $\Omega_0$ , non représentée dans la Figure II-17.

## Description et caractérisation du système

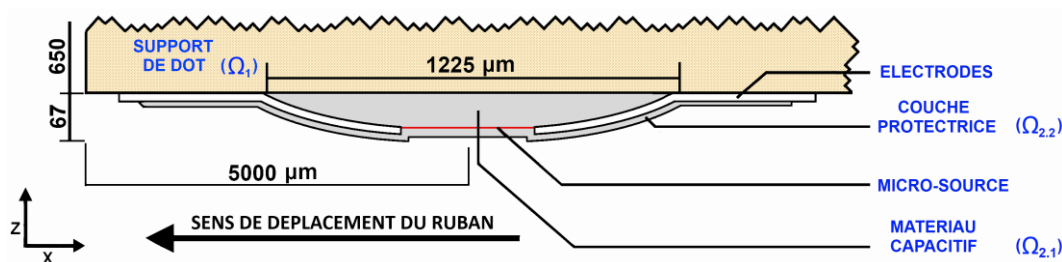


Figure II-17 - Vue en coupe d'un dot

### II.3.2. Analyse de la composition de l'environnement de la source de chaleur

La composition chimique des différents éléments constitutifs de la tête d'impression, dans l'environnement immédiat des sources de chaleur, a été déterminée à l'aide de l'analyseur EDX couplé au Microscope Electronique à Balayage. Cette méthode d'analyse spectroscopique repose sur la loi dite de Moseley qui lie la fréquence d'émission d'un atome excité, à son numéro dans le tableau périodique [29]. Concrètement, un faisceau d'électrons est généré et dirigé contre la cible à analyser. L'énergie des rayons X produits par l'échantillon irradié caractérise les éléments chimiques en présence.

La composition des quatre couches constituant la tête d'impression est donnée dans le Tableau II-2. Les couches  $\Omega_0$  et  $\Omega_1$  sont clairement identifiées comme étant constituées respectivement d'un alliage d'aluminium et d'une alumine. Les couches  $\Omega_{2,1}$  et  $\Omega_{2,2}$  sont supposées avoir des propriétés proches de celles de verres de borosilicate, connus pour leur résistance aux contraintes thermiques élevées [30].

Désignation	Description	Élément chimique (% massique)				Nature
		Al	O	Si	Ca	
$\Omega_1$	Support de dot	68	32			Alumine
$\Omega_{2,1}$	Couche capacitive	8	16	68	4	Verre
$\Omega_{2,2}$	Couche protectrice	18	25	57		Verre

Tableau II-2 – Composition de la tête d'impression

### II.3.3. Propriétés thermiques

Compte tenu de l'impossibilité de séparer les uns des autres les différents matériaux constitutifs des dots, nous n'avons pas pu réaliser de mesures de leurs propriétés thermiques en laboratoire. En revanche, l'identification issue de l'analyse dispersive en énergie a permis, à partir des données de la littérature [31-33] d'émettre des hypothèses (Tableau II-3). Assumant l'imprécision de cette approche, nous entendons éventuellement corriger ultérieurement ces valeurs dans le modèle de source thermique proposé.

Désignation	Description	Nature	$\lambda$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	Cp (J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	$\rho$ kg.m <sup>-3</sup>
$\Omega_0$	Corps de tête d'impression	Aluminium	240	900	2700
$\Omega_1$	Support de dot	Alumine	18	880	3690
$\Omega_{2.1}$	Couche capacitive	Verre	1,4	835	2225
$\Omega_{2.2}$	Couche protectrice	Verre	1,4	835	2225

**Tableau II-3 - propriétés de la tête d'impression**

## II.4. Description et caractérisation thermique des rubans et support d'impression

### II.4.1. Analyse dimensionnelle

Le ruban industriel étudié est constitué de trois épaisseurs de matériaux que sont le dos, le film de PET ainsi que la couche encrée (Figure II-8). Cette dernière est le produit du mélange de 5 cires naturelles et synthétiques auxquelles vient s'ajouter une coloration au noir de carbone. L'étiquette réceptrice est, quant à elle, constituée d'une première couche de papier vélin non calandré adossée à un « liner » détachable.

Les épaisseurs des matériaux constitutifs du ruban sont déterminées de différentes manières selon qu'ils sont enduits dans les locaux de l'entreprise ou bien qu'il s'agit de produits industriels achetés dans le commerce.

Concernant le dos et l'encre, nous pouvons déterminer de manière indirecte leurs épaisseurs d'enduction. Connaissant la masse de matière déposée par mètre carré ainsi que leurs densités, nous pouvons estimer leurs épaisseurs moyennes. Ces valeurs ont été confirmées par une méthode de mesure ellipsométrique<sup>1</sup> [34]. Cette méthode optique a permis de déterminer une épaisseur moyenne sur une surface d'environ 1 mm<sup>2</sup> et a révélé les variations dimensionnelles des différents dépôts.

Concernant le support récepteur, les épaisseurs des deux couches de matériaux ont été déterminées à l'aide d'un permascopie Phynix<sup>2</sup>, modèle Surfex [35, 36]. La gamme de mesure de cet appareil ainsi que sa précision n'ont pas permis de déterminer l'épaisseur du film de PET. Nous avons admis comme valeur pour ce dernier, celle fournie par le fabricant.

Les résultats des mesures sont donnés dans le Tableau II-4. Nous observons des variations pouvant être importantes notamment dans le cas du dos. En effet, les procédés d'enduction de matériaux sur le film de PET, ne permettent pas d'obtenir des épaisseurs de dépôts parfaitement régulières.

<sup>1</sup> Technique optique de caractérisation et d'analyse de surface, fondée sur le changement d'état de polarisation de la lumière, par réflexion de celle-ci sur la surface plane d'un échantillon.

<sup>2</sup> Méthodes de mesures par induction magnétique et par courants de Foucault permettant de mesurer aussi l'épaisseur de revêtements sur support métallique

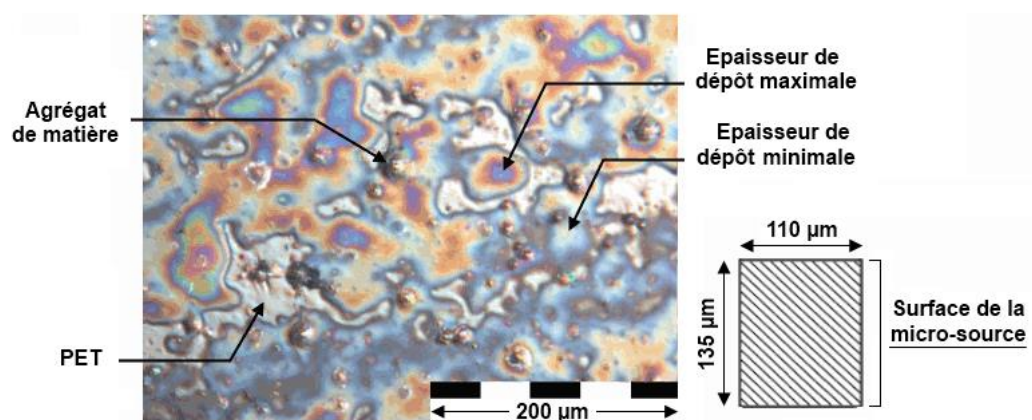
## Description et caractérisation du système

Matériau	Épaisseur ( $\mu\text{m}$ )	Variation
Dos	0,1	+/- 20 %
PET (données fabricant)	4,5	+/- 2.5 %
Encre	4	+/- 5 %
Papier	60	+/- 5 %
Liner	50	+/- 5 %

**Tableau II-4 - Épaisseur des matériaux constitutifs des rubans et supports**

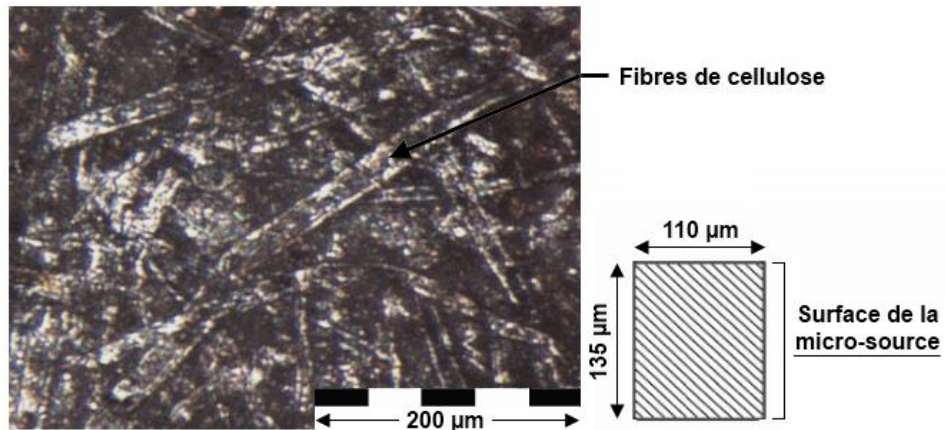
Les mesures présentées ci-dessus donnent un aperçu macroscopique des épaisseurs des matériaux constituant les rubans et supports. Cependant, à l'échelle d'une source de chaleur, nous pouvons observer une inhomogénéité des états de surface notamment des dos et papiers.

Pour le premier, une observation par microscopie optique sous une lumière polarisante, d'un échantillon avant impression (Figure II-18), révèle des zones d'épaisseur plus ou moins importante ainsi que des surfaces de PET nu. La surface de la micro-source de chaleur à la même échelle est figurée à droite de l'image.



**Figure II-18 - Observation d'un dépôt de dos au microscope optique**

De plus, l'interface constituée en partie par le papier vélin laisse apparaître une structure complexe constituée d'un entrelacs de fibres de cellulose aplaties, de quelques dizaines de microns de diamètre (Figure II-19) [37]. L'aspect de surface du papier que nous avons pris en référence laisse supposer une « forte » porosité.



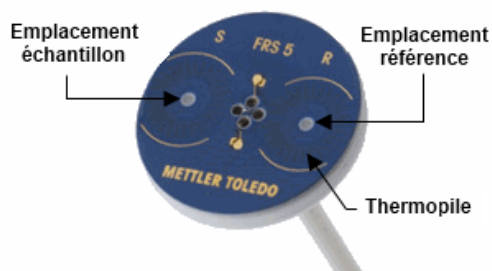
**Figure II-19 - Observation de la surface d'un papier vélin au microscope optique**

#### II.4.2. Caractérisation thermique

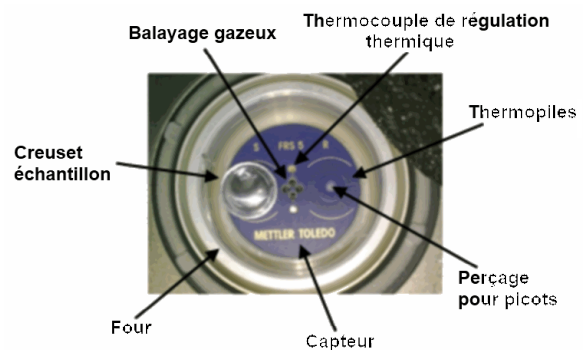
Dans cette partie nous présentons les protocoles expérimentaux mis en œuvre afin de déterminer les propriétés thermiques des matériaux constitutifs des rubans et supports. Ces mesures ont été réalisées sur des appareils de laboratoires.

##### II.4.2.1 Calorimétrie différentielle à balayage (DSC)

La capacité thermique massique des matériaux étudiés a été déterminée à l'aide d'un calorimètre différentiel à balayage de marque METTLER TOLEDO DSC1. Cet appareil permet d'obtenir des mesures classiques de flux de chaleur, mais également d'effectuer des mesures en modulation de fréquence (DSC modulée). Ces dernières permettent, le cas échéant, de déconvoluer les effets dits réversibles affectant la matière, de ceux dits non réversibles (réactions chimiques).



**Figure II-20 - Capteur METTLER - FRS 5**



**Figure II-21 - Four METTLER – DSC1**



## Description et caractérisation du système

Les caractéristiques techniques de cet appareil sont présentées dans le Tableau II-5.

Caractéristiques techniques	Mettler Toledo
Alimentation automatique des échantillons	Passeur 34 positions
Mesure en DSC modulée	Oui
Mesure Saphir	Oui
Technologie	Flux de chaleur
Type de capteur	Plaques à thermocouples (56-120 thermocouples)
Sensibilité	0,01 W
Vitesse de chauffe	300 °C/ min
Vitesse de refroidissement maximale	50°C/ min
Prédiction de la cinétique (logiciel)	oui
Température de fonctionnement	-150°C   700°C
Gaz de balayage	Azote

**Tableau II-5 - Caractéristiques de la DSC METTLER TOLEDO**

Dans cette étude, nous avons utilisé des creusets en alliage d'aluminium d'une contenance de 40 µl, équipés de picots afin de s'assurer de leur bon positionnement sur les thermopiles de la DSC. Les mesures ont été réalisées en mode anisotherme (méthode TOPEM). Nous avons utilisé des vitesses de montée en température de 2°C/mn faisant suite à une période de mise à l'équilibre de 3 minutes à 10°C.

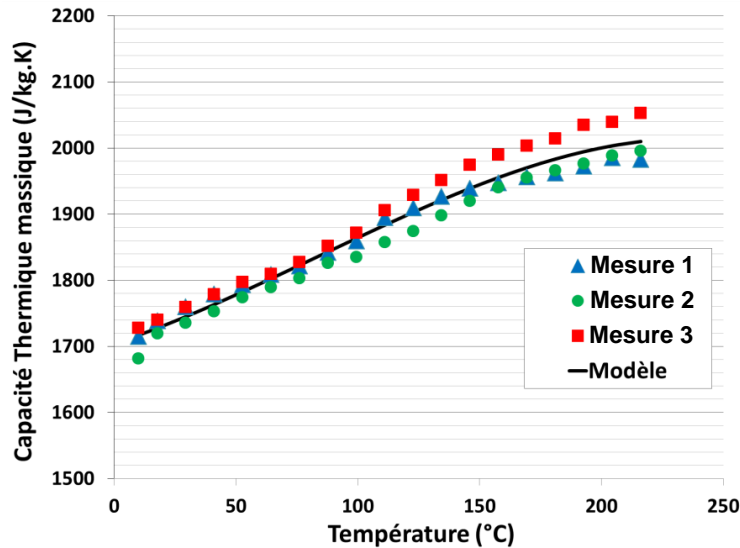
### II.4.2.1.a Dos

Le dos a été préalablement préparé dans le laboratoire de l'entreprise ARMOR. Il se présente sous la forme d'une plaquette de quelques millimètres d'épaisseur. Les échantillons testés ont été découpés à l'aide d'un emporte pièces de 3 millimètres de diamètre afin d'assurer un bon contact entre le fond du creuset et la matière. Ils ont ensuite été débités dans l'épaisseur afin d'obtenir une masse unitaire comprise entre 10 et 15 mg. Nous avons effectué les mesures sur une gamme de température de 10 à 220°C.

La Figure II-22 montre l'évolution de la capacité thermique massique du dos siliconé en fonction de la température. Nous avons réalisé 3 essais successifs dans des conditions opératoires similaires. De l'exploitation de ces courbes, nous avons extrait un modèle mathématique thermo-dépendant de l'évolution de la capacité thermique massique du dos (II-1).

$$C_p(T) = -2,47 * 10^{-5} * T^3 + 6,18 * 10^{-3} * T^2 + 1,233 * T + 1704 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad \text{(II-1)}$$

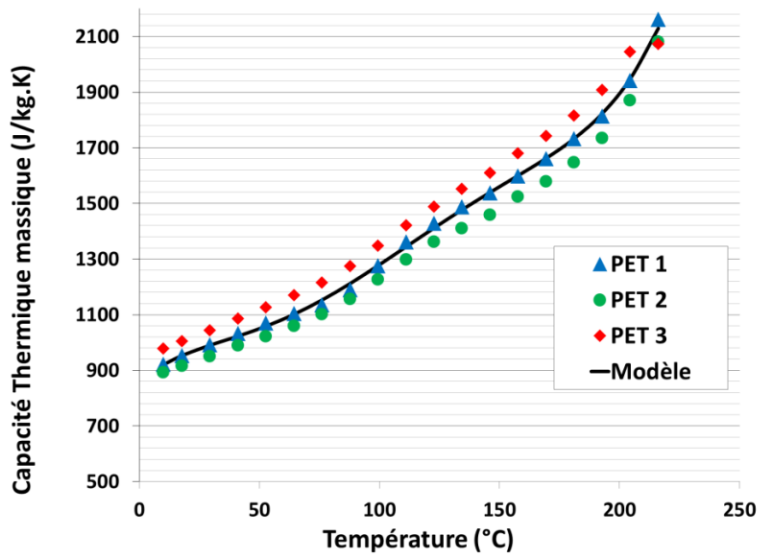
L'erreur relative maximale calculée entre le modèle mathématique et les mesures expérimentales est de 2%.



**Figure II-22 - Capacité thermique massique du Dos**

**II.4.2.1.b Polyéthylène téréphtalate (PET)**

Compte tenu de la faible épaisseur du film de PET, il ne nous était pas possible de réaliser les mesures à partir d'un seul prélèvement. Nous les avons réalisées en repliant sur elle-même une feuille de quelques cm<sup>2</sup>. Les mesures ont été réalisées sur une gamme de température couvrant la plage de 10 à 220°C.



**Figure II-23 - Capacité thermique massique du Polyéthylène Téréphtalate**

Le modèle mathématique utilisé pour calculer la capacité thermique massique du polyéthylène téréphtalate en fonction de la température, est donné ci-dessous :

$$Cp(T) = 2,57 * 10^{-8} * T^5 - 1,29 * 10^{-5} * T^4 + 2,266 * 10^{-3} * T^3 - 0,1547 * T^2 + 7,295 * T + 960,6 \quad [^{\circ}C] \quad (II-2)$$

La moyenne des écarts types par rapport au modèle, exprimé en pourcentage est de 4,7%

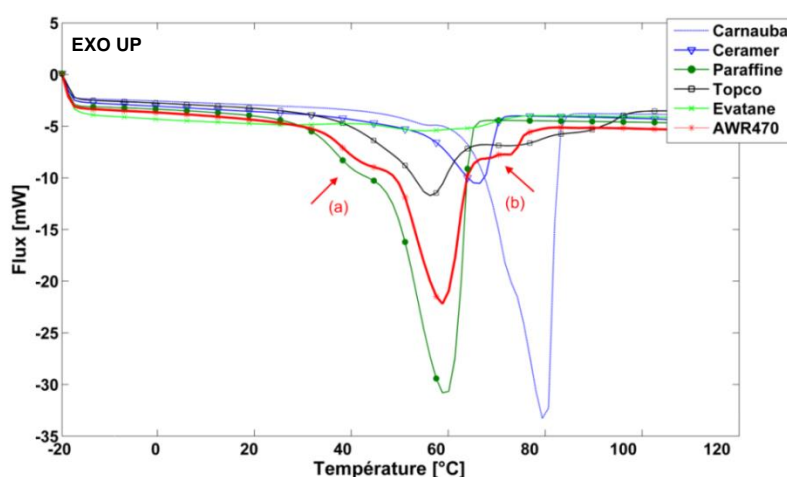
## Description et caractérisation du système

### II.4.2.1.c Encre

L'encre étudiée (AWR 470) est le produit du mélange de cinq cires naturelles et synthétiques. Elle est composée principalement de cire de paraffine (70%) et de Carnauba (14%), qui confèrent à l'encre ses propriétés thermiques de fusion, ainsi que de produits manufacturés, introduits dans le mélange pour leurs propriétés adhésives ou dispersives. À température ambiante, elles se présentent sous une forme solide et cassante.

Les échantillons testés ont été dans un premier temps soumis à un cycle de chauffe à 90°C afin de dépasser leur température de fusion et ainsi assurer un bon contact avec les creusets de la DSC. Le protocole de mesure a été répété trois fois. Dans le cas de l'encre, nous avons effectué les mesures sur une gamme de température entre 10 et 120°C.

La présentation conjointe des courbes de DSC obtenues pour les constituants de l'encre AWR 470 permet d'observer l'influence de chacun d'entre eux sur le mélange final. L'allure particulière du thermo-gramme de DSC de l'encre (Figure II-24 a - b) s'explique majoritairement par la présence dans le mélange, des cires paraffine (Figure II-24 a) et carnauba (Figure II-24 b). Elles totalisent 83,5% de l'ensemble des matières premières utilisées.



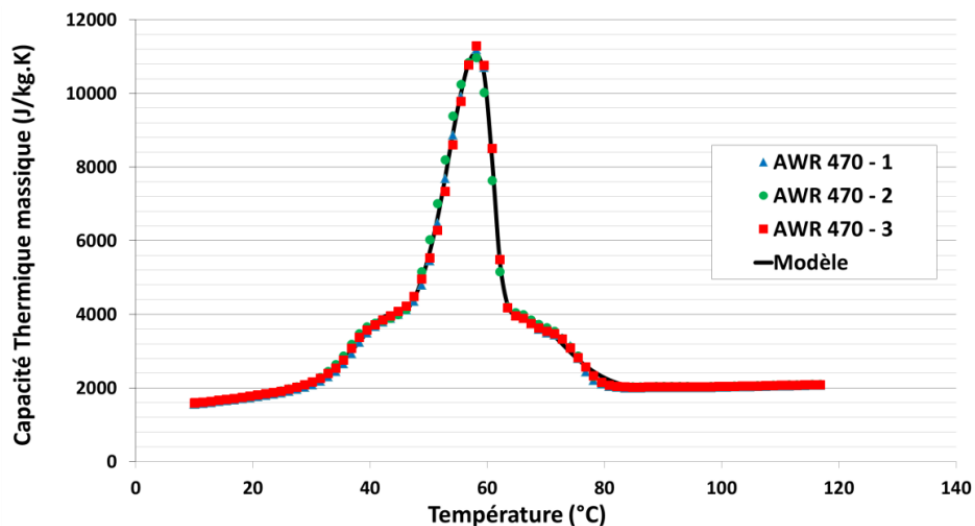
**Figure II-24 – Analyse par calorimétrie différentielle à balayage des constituants de l'encre AWR 470**

Le Tableau II-6 reprend les principales caractéristiques des différents constituants de l'encre étudiée. L'analyse montre que la somme des énergies d'activation ramenée au pourcentage en masse des différentes cires du mélange est d'une valeur sensiblement comparable à celle obtenue pour l'encre AWR 470.

	Carnauba	Ceramer	Paraffine	Topco	Evatane	AWR 470
Onset (°C)	70,4	56,0	47,8	45,8	43,9	48,9
Peak (°C)	82	68,5	61,0	58,3	58,5	60,6
Endset (°C)	85,7	73,1	67	68,5	75,5	67,5
Enthalpie de fusion (J.g <sup>-1</sup> )	164,69	42,58	188,18	116,36	11,20	138,24
% en masse	14,1	4,7	69,4	4,71	7,1	85 <sup>(3)</sup>
Enthalpie de fusion ramenée au % en masse (J)	23,2	2,0	130,6	5,5	0,8	162,6
Enthalpie de fusion Cumulée (J.g <sup>-1</sup> )	162,1					162,6

**Tableau II-6 – Constituants de l'encre AWR 470**

La Figure II-25, montre la courbe représentative de la capacité thermique massique du mélange des différentes cires.



**Figure II-25 - Capacité thermique massique de l'encre AWR470**

Le modèle mathématique utilisé pour calculer la capacité thermique massique de l'encre en fonction de la température, est donné ci-dessous :

$$Cp(T) = \sum_{i=1}^8 a_i e^{-\left[\frac{(T-b_i)^2}{c_i}\right]} \quad (II-3)$$

<sup>3</sup> La cire AWR 470 est constituée de 15 % de carbone.

## Description et caractérisation du système

avec :

$a_1 = 3536$	$b_1 = 56,14$	$c_1 = 3,747$
$a_2 = 2465$	$b_2 = 58,48$	$c_2 = 2,308$
$a_3 = 2106$	$b_3 = 60,24$	$c_3 = 1,752$
$a_4 = 4617$	$b_4 = 55,27$	$c_4 = 16,23$
$a_5 = -1048$	$b_5 = 46,9$	$c_5 = 3,905$
$a_6 = -1336$	$b_6 = 62,45$	$c_6 = 5,466$
$a_7 = 453,8$	$b_7 = 111,5$	$c_7 = 23,69$
$a_8 = 1768$	$b_8 = 58,7$	$c_8 = 179,8$

La moyenne des écarts types par rapport au modèle, exprimée en pourcentage, est de 3.1%.

### II.4.2.2 - Mesure de conductivité thermique

Les conductivités thermiques des différents matériaux constitutifs des rubans et supports ont été obtenues à partir de la technique du Hot Disk (Figure II-26).



Figure II-26 – Système Hot Disk TPS 2500

#### Principe de mesure

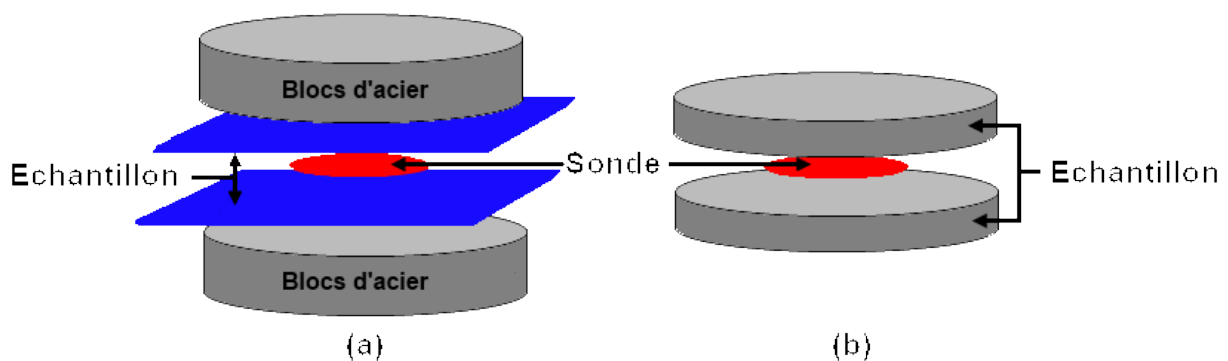
Cette méthode est basée sur l'utilisation d'un capteur plan transitoire. La **sonde Hot Disk** se compose d'un motif conducteur électrique qui se présente sous la forme d'une double spirale en Nickel sérigraphiée sur des feuilles minces d'un matériau isolant (Kapton ou Mica).



Figure II-27 – Sonde de mesure Hot Disk

Le principe de base du système est de fournir au matériau à caractériser une puissance thermique constante pendant un temps défini via la **sonde**, afin de générer une augmentation de température de un à plusieurs degrés. C'est également la sonde qui est utilisée pour mesurer l'élévation de température, grâce à l'enregistrement de la variation de sa résistance électrique via un pont de Wheatstone.

Pour effectuer une **mesure de conductivité thermique** ou de **diffusivité thermique**, la **sonde** doit être placée entre deux échantillons du matériau à caractériser. Leurs dimensions doivent être en adéquation avec la taille de la sonde choisie afin de respecter l'hypothèse de milieu semi-infini. Cette méthode peut être mise en œuvre aussi bien sur des éléments se présentant en bloc (Figure II-28 - b), que sur des films minces (Figure II-28 - a). Cependant, dans le dernier cas, l'hypothèse de milieu semi infini ne peut plus être maintenue. Pour y pallier, l'ensemble constitué de la source et des 2 échantillons est maintenu entre deux blocs d'acier, de propriétés thermo-physiques connues. L'analyse, dans ce cas, de la perturbation thermique induite par la présence des deux échantillons permet de déterminer leurs conductivités et diffusivités.



**Figure II-28 – Montage Hot Disk pour la caractérisation en couche mince (a) et en bloc (b)**

### **Protocole expérimental et résultats**

La mesure de conductivité thermique par méthode Hot Disk, est sensible à l'état de surface des échantillons à tester. Afin de minimiser les effets liés à d'éventuelles résistances thermiques de contact, un soin particulier est apporté à la confection des échantillons notamment en assurant un bon état de surface par polissage fin et en évitant la présence de bulles d'air au sein du matériau, source potentielle de perturbation du flux thermique.

Dans un premier temps, des mesures permettent de déterminer la puissance de chauffage ainsi que la durée de la mesure qui est choisie de manière à respecter l'hypothèse du milieu semi-fini. La conductivité thermique est ensuite obtenue en moyennant le résultat d'une série de 10 mesures effectuées pour chaque échantillon en respectant un intervalle de temps entre les mesures permettant le retour à l'équilibre thermique des échantillons. Lors de la mesure de la conductivité avec le Hot Disk TPS 2500, un résultat est considéré comme « acceptable » si la mesure vérifie trois critères : la profondeur de pénétration ne doit pas dépasser l'épaisseur de l'échantillon, le temps caractéristique doit être compris entre 0,3 et 1s et enfin l'échauffement de l'échantillon doit être faible (inférieur à 3°C). Selon le conditionnement des échantillons testés, les modules de détermination de conductivité thermique en « couche mince » ou bien en « bloc », ont été utilisés. Les résultats de

### Description et caractérisation du système

caractérisation sont présentés dans le Tableau II-7. Le film de PET ayant une épaisseur de 4  $\mu\text{m}$ , nous atteignons les limites de l'appareil Hot Disk. Nous avons donc réalisé ces mesures sur un échantillon de 100  $\mu\text{m}$  d'épaisseur. Nous faisons l'hypothèse que les résultats obtenus sont transposables au film mis en œuvre dans le ruban étudié.

Matériau	Epaisseur	Module d'analyse	Conductivité thermique (W/m.K)	Ecart-type	Nbre de mesures
Dos	2 mm	Bloc	0,23	0.002	10
Encre	10 mm	Bloc	0,36	0.005	15
PET	100 $\mu\text{m}$	Couche mince	0,14	0.003	10
papier	50 $\mu\text{m}$	Couche mince	0,09	0.002	8
Liner	60 $\mu\text{m}$	Couche mince	0,12	0.007	8

**Tableau II-7 – Conductivités thermiques des rubans et supports**

Les résultats obtenus sont en accord avec les données de la littérature dont nous disposons, en ce qui concerne le PET [38, 39] ainsi que le support en papier vélin [40].

#### II.4.2.3 Mesure de masse volumique

La masse volumique du matériau a été déterminée à température ambiante à partir d'une Balance METTLER TOLEDO, instrumentée d'un kit masse volumique METTLER (Figure II-29).



**Figure II-29 - Balance METTLER TOLEDO équipée du montage «masse volumique»**

Le principe de la méthode repose sur l'utilisation d'un fluide auxiliaire, dans notre cas de l'eau distillée, dans lequel l'échantillon sera pesé après l'avoir été, au préalable, à l'air libre. La densité  $\rho$  peut être calculée à partir de la formule suivante:

$$\rho = \frac{m_a}{m_a - m_b} (\rho_0 - \rho_l) + \rho_l \quad (II-4)$$

Avec  $\rho$ , la densité de l'échantillon,  $m_a$  et  $m_b$ , sa masse respectivement dans l'air et dans le liquide auxiliaire,  $\rho_0$ , la masse volumique de ce dernier à la température de pesée et  $\rho_l$ , celle de l'air, toujours à température de pesée.

Dans cette étude, selon la densité des matériaux caractérisés, nous avons utilisé comme liquide d'immersion soit de l'eau distillée, soit de l'éthanol. Les résultats des mesures à température ambiante sont présentés dans le Tableau II-8.

Matériau	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )
Dos	1160
PET	1040
Encre	1010
Papier	1160
Liner	1380

**Tableau II-8 – Masses volumiques des différents éléments d'impression**

## II.5. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre l'imprimante commerciale qui nous sert de base d'étude des phénomènes de transfert de chaleur opérant dans le cadre de l'impression par transfert thermique. Les principaux éléments électroniques et mécaniques de l'imprimante ont été décrits ainsi que son fonctionnement. Notre étude est centrée sur la zone où s'opère le transfert de chaleur de la tête d'impression vers le ruban encreur. Une analyse dimensionnelle de la tête, réalisée par imagerie au microscope électronique, a montré la structure multicouche des dots intégrant les micro-sources de chaleur. De plus, une analyse dispersive en énergie (EDX) a permis de déterminer les espèces chimiques constitutives des dots et d'émettre des hypothèses quant à leurs propriétés thermo physiques. Ces données seront réinvesties ultérieurement dans un modèle numérique bidimensionnel de la tête d'impression au voisinage immédiat de la micro-source de chaleur.

Ensuite, nous avons procédé à l'analyse des rubans et supports d'impression. La structure dimensionnelle de ces matériaux a été décrite et leurs propriétés thermo-physiques ont été déterminées.

Les observations et mesures réalisées soulignent l'originalité de ce travail lié à l'analyse thermique d'un microsysteme dans un contexte d'encapsulation sous contrainte mécanique. En effet, les micro-sources de chaleur sont insérées dans une structure multicouche complexe de matériaux en partie immobiles pour ce qui est de la tête d'impression et en déplacement au regard des rubans et supports. Qui plus est, une force est appliquée sur la tête d'impression afin de favoriser le transfert de l'encre. Ce contexte rend complexe les possibilités d'investigations expérimentales d'un point de vue thermique. De plus, de nombreux paramètres influent sur l'impression d'un motif tel qu'un code à barres. La vitesse



### *Description et caractérisation du système*

d'écriture ainsi que la puissance de chauffage saisie par l'opérateur modifient le signal électrique envoyé aux micro-sources de chaleur, de même que les spécificités du motif imprimé, au regard de la prise en compte de l'historique thermique. Par ailleurs, les caractéristiques thermiques de la tête d'impression, du ruban et du support influenceront la répartition des flux de chaleur dans le système. Les hypothèses faites quant aux propriétés thermo physiques des matériaux constitutifs des dots et de leur environnement immédiat devront être vérifiées et éventuellement corrigées.



# Chapitre III

## Caractérisation et modélisation de la micro-source de chaleur

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la démarche adoptée dans le but de produire un modèle numérique de la source de chaleur et de son environnement immédiat.

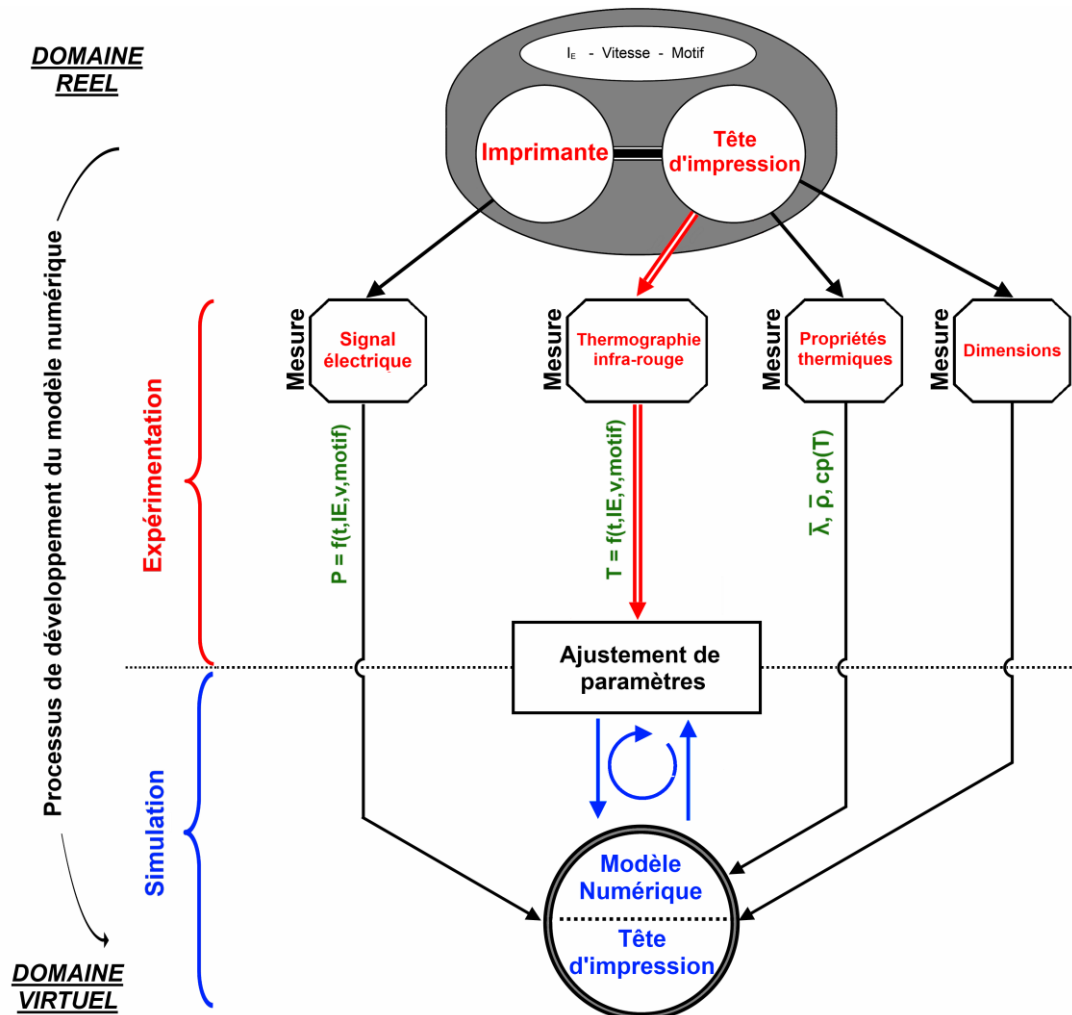
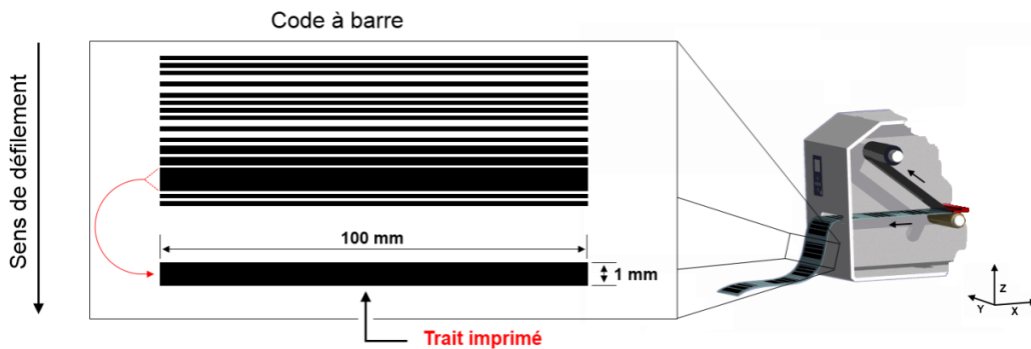


Figure III-1 – Synoptique d'étude du Chapitre III

Nous ne nous intéressons donc qu'à la partie du système relative à l'imprimante thermique et ne prenons pas en compte les rubans et supports. Le synoptique d'étude présenté dans la Figure III-1 reprend la démarche adoptée au cours de ce chapitre.

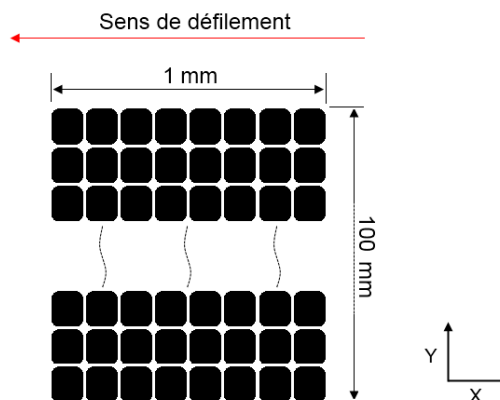
Des mesures expérimentales sont réalisées pour déterminer le schéma d'excitation électrique des micro-sources. Celui-ci dépend de la vitesse d'impression, de l'Indice d'Énergie ( $I_E$ ) saisi par l'opérateur ainsi que de l'histoire thermique des micro-sources de chaleur. Un modèle numérique bidimensionnel intégrant les données issues des analyses dimensionnelles et physico-chimiques, est présenté. Compte tenu des hypothèses faites sur les propriétés thermiques des différents matériaux constitutifs de la tête d'impression et des difficultés à déterminer la puissance volumique à injecter dans le modèle, une procédure d'ajustement des paramètres d'entrée du système a été mise en place. Les températures provenant du calcul numérique sont comparées à des données expérimentales obtenues par une méthode de mesure thermique sans contact.

Dans ce travail, nous considérons l'impression d'une ligne de code à barres, de largeur  $Y = 100 \text{ mm}$  et d'épaisseur  $X = 1 \text{ mm}$  (Figure III-2).



**Figure III-2 – Représentation du tracé d'un trait de 1x100 mm**

Ce motif est orienté à  $90^\circ$  par rapport au sens de défilement. Le trait est donc parallèle à l'alignement des sources. La tête d'impression investie dans ce travail a une résolution de 204 dpi. De fait, le tracé d'un trait de 1x100 mm nécessite d'imprimer 804 points dans le sens de la largeur (Y) correspondant à l'excitation simultanée de 804 micro sources de chaleur et 8 points successifs dans le sens de l'épaisseur (X). La Figure III-3 représente la trame de points, constitutive du trait considéré.



**Figure III-3 – Structure schématisée du tracé d'un trait de 1\*100 mm**

### III.2. Analyse du signal électrique

Les composants électriques constituant la tête d'impression ainsi que le système de mesure mis en place pour en faire l'analyse sont représentés sur la Figure III-4. La tête d'impression est alimentée électriquement par un connecteur spécifique situé en partie arrière et relié à la carte électronique de l'imprimante (Annexe 1). Ce circuit est en liaison avec les composants Cmos (Complementary Metal Oxide Semi-conducteur) [41]. Ceux-ci agissent à la manière d'interrupteurs. Ils permettent, selon les informations transmises par la carte électronique, d'alimenter individuellement chacune des micro-sources. Les composants Cmos sont actionnés par un second circuit liant la tête d'impression à la carte électronique via le connecteur d'information [22].

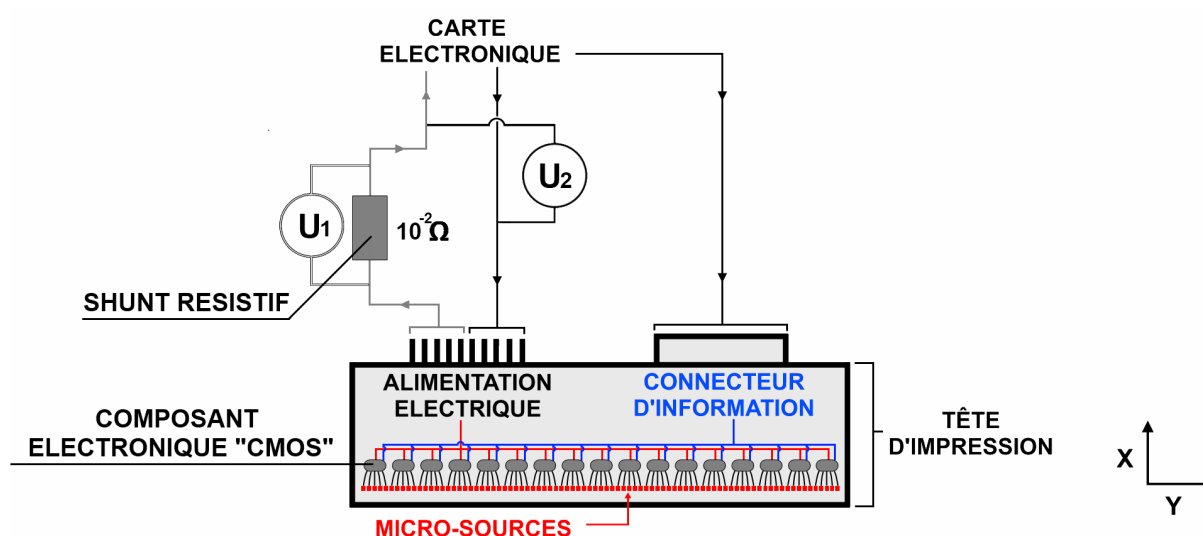


Figure III-4 – Schéma de principe du dispositif de mesure du signal électrique

Le circuit d'alimentation de la tête d'impression a été instrumenté afin de mesurer le signal électrique générant le flux de chaleur au niveau des micro-sources. Un shunt ( $U_1$ ) équipé d'une résistance électrique de faible valeur ( $R = 10^{-2} \Omega$ ) a été inséré dans le circuit électrique, dans le but de déterminer l'intensité du courant délivré (Figure III-4). Une seconde mesure a été réalisée afin de connaître la tension d'alimentation  $U_2$ . Les données ont été acquises à partir d'un enregistreur Sefram DAS 1000 avec un taux d'échantillonnage de  $4 \mu s$ .

En supposant les pertes résistives négligeables dans les circuits de la tête d'impression, nous avons ainsi accès à la puissance électrique globale fournie à l'ensemble des 800 dots. Lors de l'impression d'un motif, les micro-sources situées à l'extrémité du motif reçoivent un signal différent en raison de la prise en compte par l'imprimante, de leurs environnements et histoires thermiques (Figure I.13). Le nombre de dots étant important ( $n = 800$ ), nous supposons que cet effet est négligeable et exprimons la puissance délivrée à chacune des sources de chaleur par la relation :

$$P(t) = \frac{U_1(t) * U_2(t)}{R * n} \quad [W] \quad (III-1)$$

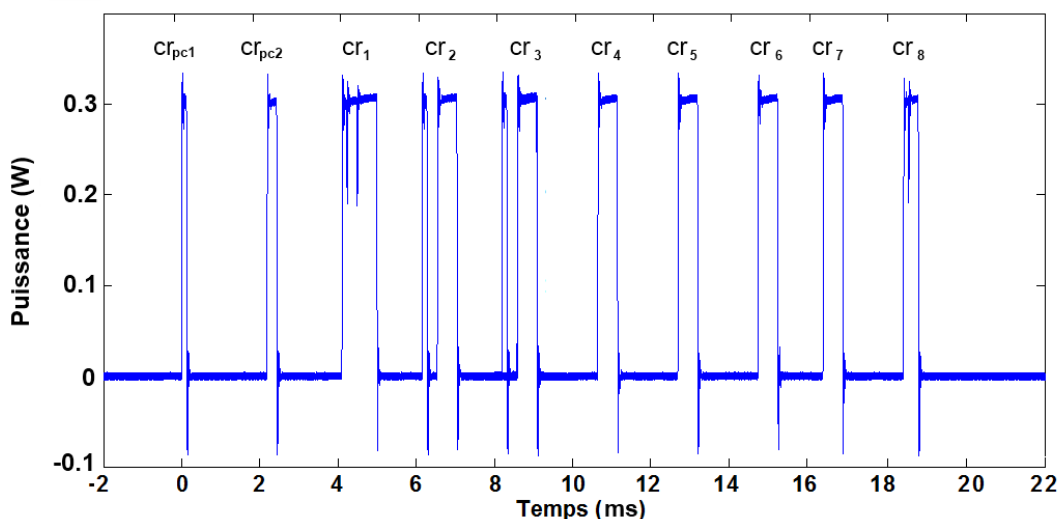
### III.2.1. Architecture du signal et nomenclature

Les mesures électriques réalisées ont montré que la tension  $U_2$  est constante quelle que soit la vitesse ou l' $I_E$  saisi. Cette tension est de 16 V.

En revanche, l'intensité délivrée aux micro-sources de chaleur dépend des paramètres d'entrée sélectionnés par l'opérateur ainsi que de la forme du motif tracé. Elle dépend également de la résolution de la tête d'impression et de sa résistance électrique globale qui est ici de 504  $\Omega$ .

La Figure III-5 présente la puissance délivrée aux micro-sources de chaleur pour une vitesse de défilement  $v = 60 \text{ mm/s}$  et un indice énergétique  $I_E = 12$ . Compte tenu des rubans et supports sélectionnés, ce paramétrage renvoie au réglage de référence correspondant à une impression jugée par l'industriel, de qualité optimale.

Nous pouvons observer que le signal électrique représentatif du tracé du trait, se présente sous la forme d'une série de créneaux très brefs et de durée variable. Les premiers d'entre eux,  $cr_{pc1}$  et  $cr_{pc2}$ , ont pour but de préchauffer le système. En revanche, les créneaux notés  $cr_1$  à  $cr_8$ , sont destinés à produire le marquage d'un point par fusion de l'encre. Les trois premiers,  $cr_1$  à  $cr_3$ , représentent la séquence de chargement thermique du système. Ils sont d'une durée plus longue que les suivants et délivrent plus d'énergie au système. La seconde séquence, de  $cr_4$  à  $cr_7$ , est constituée de créneaux identiques. Enfin, nous pouvons observer une dernière excitation électrique d'une durée plus courte ( $cr_8$ ), destinée à anticiper la fin du marquage. Elle sert à éviter une accumulation de chaleur dans le système ce qui aurait pour conséquence de générer un défaut d'inscription par allongement de la dernière marque.



**Figure III-5 – Signal électrique pour un dot et un tracé de 1 mm de largeur  
 $v=60 \text{ mm/s}$  -  $I_E=12$**

Outre ce qui concerne le préchauffage, le signal électrique envoyé aux micro-sources de chaleur est donc constitué d'une succession de huit cycles C (Figure III-6).

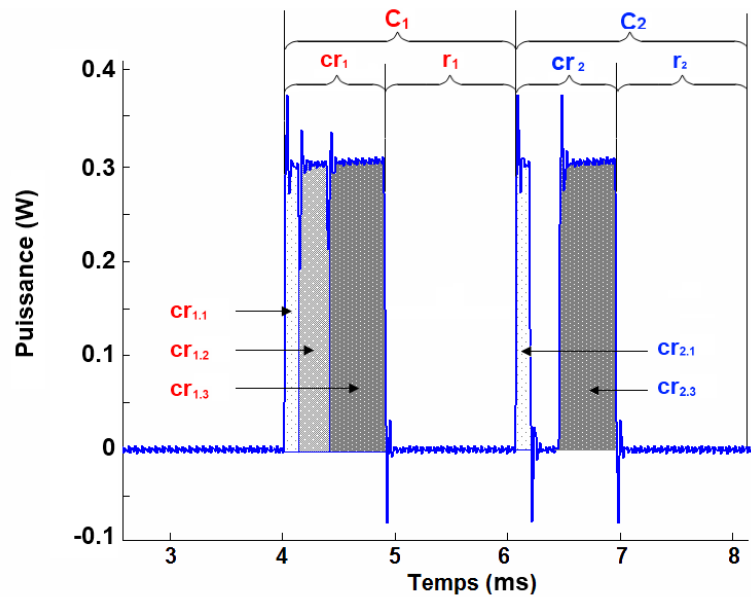


Figure III-6 – Descriptif des cycles  $C_1$  et  $C_2$  –  $v = 60 \text{ mm/s}$  –  $I_E = 12$

Chacun des cycles correspond au marquage d'un point. A la vitesse de 60 mm/s, ils durent un temps  $\tau_C = 2052 \mu\text{s}$ . Chaque cycle se subdivise en deux évènements; Le premier, noté cr, correspond à une phase d'excitation thermique et le second, noté r, à une phase de repos pendant lequel la micro source n'est pas sollicitée. Le temps  $\tau_{cr1}$  par exemple, se réfère à l'évènement  $cr_1$  qui peut être constitué d'un agencement quelconque de sous créneaux notés  $cr_{1.1}$ ,  $cr_{1.2}$  et  $cr_{1.3}$ . Les temps relatifs à chaque subdivision vérifient les relations suivantes :

$$\tau_{cr_{n.2}} = 2 * \tau_{cr_{n.1}} \quad \text{et} \quad \tau_{cr_{n.3}} = 4 * \tau_{cr_{n.1}} \quad (III-2)$$

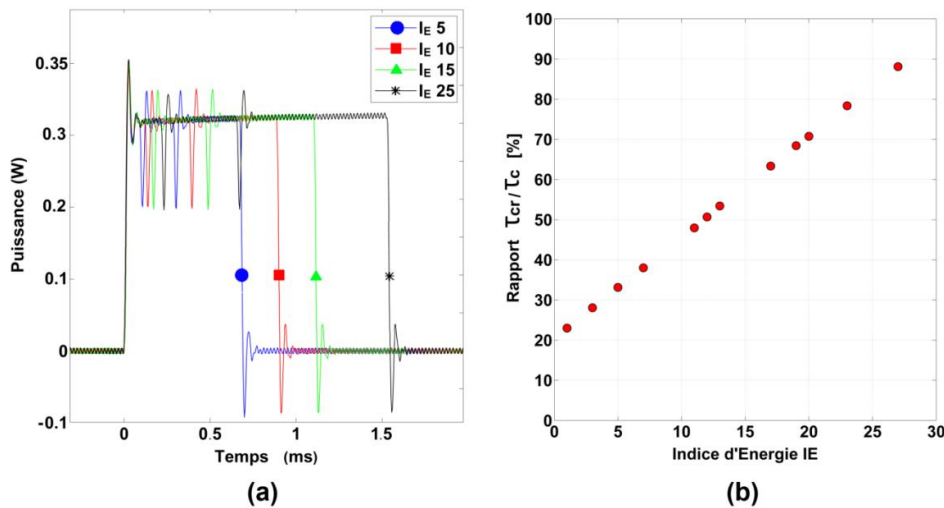
Le signal électrique envoyé aux micro-sources de chaleur est donc une succession de cycles constitués de quatre évènements de base que sont  $cr_{n.1}$ ,  $cr_{n.2}$ ,  $cr_{n.3}$  et r. Ainsi, lors du premier cycle  $C_1$ , le système est excité pendant un temps  $\tau_{cr1}$  tandis que lors du second cycle  $C_2$ , les temps d'excitation correspondent uniquement aux deux subdivisions  $\tau_{cr_{2.1}}$  et  $\tau_{cr_{2.3}}$ . C'est cette structuration du signal électrique qui permet la prise en compte de l'histoire thermique vécue par les dots.

### III.2.2. Temps de cycle

Pour une vitesse donnée, le temps de cycle  $\tau_C$  reste constant quel que soit le motif adopté ou l' $I_E$  saisi. Il est uniquement fonction de la vitesse « v » et de la résolution « r » exprimée en points par pouce, de la tête d'impression.

$$\tau_C(v) = \frac{10^6}{v \left[ \frac{\text{mm}}{\text{s}} \right] * \frac{2.54}{r}} \quad [\mu\text{s}] \quad (III-3)$$

Les mesures montrent également que pour une vitesse considérée, les durées des créneaux évoluent en fonction de l' $I_E$  saisi. Sur la Figure III-7, un créneau  $cr_n$  constitué de ses trois subdivisions  $cr_{n1 \rightarrow 3}$  est représenté pour quatre valeurs d' $I_E$  comprises entre 5 et 25. Nous constatons que l'augmentation de l' $I_E$  se traduit par un temps d'excitation plus important qui évolue, pour une vitesse donnée, de façon linéaire (Figure III-7b).



**Figure III-7 – Évolution du temps de créneau en fonction de l' $I_E$  pour  $v=60\text{mm/s}$   
(a) Architecture électrique (b) rapport du temps de créneau au temps de cycle**

L'analyse du temps de créneau par rapport au temps de cycle permet d'établir la relation générale en fonction de la vitesse (III-4).

$$\tau_{cr} = (\alpha(v) * I_E + \beta(v)) \text{ [ms]} \quad \text{(III-4)}$$

$\alpha(v)$  et  $\beta(v)$  sont deux polynômes de la forme  $y = a * v^b + c$ . Les coefficients a, b et c ont été obtenus par lissage de courbes et sont donnés dans le Tableau III.1.

	Coefficient $\alpha$ (ms)	Coefficient $\beta$ (ms)
<b>a</b>	2,753	4,559
<b>b</b>	-0,9475	-0,04209
<b>c</b>	-0,004997	-3,415

**Tableau III.1 – Coefficients appliqués aux polynômes  $\alpha$  et  $\beta$**

### III.2.3. Puissance délivrée

La Figure III-8 montre que la puissance calculée (III-1) varie linéairement avec la vitesse de défilement, quel que soit l'Indice d'Energie sélectionné :

$$P(v) = \alpha' * v + \beta' \text{ [W]} \quad \text{(III-5)}$$



avec  $\alpha' = 3,27.10^{-4} [J.m^{-1}]$  et  $\beta' = 0,2904 [W]$ .

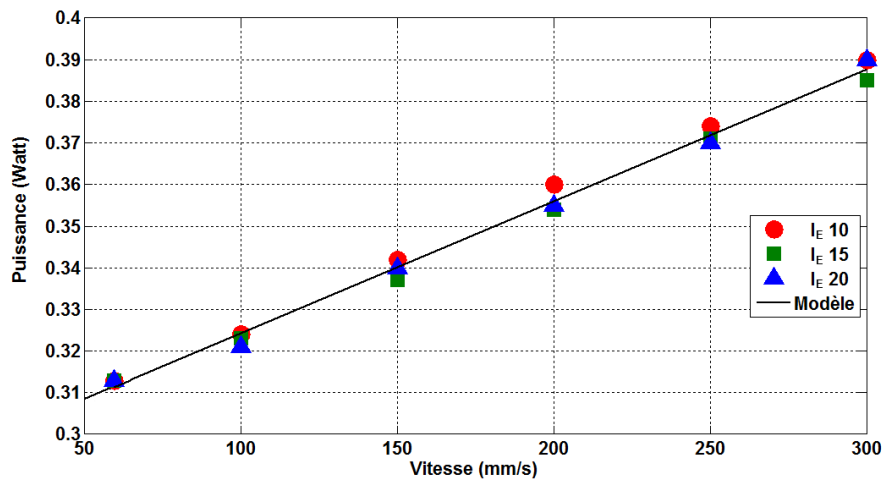


Figure III-8 – Évolution de la puissance fournie à une micro-source de chaleur en fonction de la vitesse

L'énergie fournie à une micro-source dans les conditions expérimentales mentionnées, c'est-à-dire d'excitation de toute la tête d'impression, peut donc être calculée à partir des seuls paramètres que sont la vitesse de défilement et l'indice d'énergie (III-6)

$$E(v, I_E) = \frac{(\alpha(v) * I_E + \beta(v))}{\tau_{cr}} * \frac{(\alpha' * v + \beta')}{P(v)} \quad [mJ] \quad (III-6)$$

Nous pouvons ainsi représenter graphiquement (Figure III-9) l'énergie maximale apportée à une micro-source, dans le contexte de l'excitation de toute la ligne de dots, en fonction de la vitesse et de l' $I_E$ . Ce graphique nous permettra ultérieurement de vérifier si le paramétrage (choix de l' $I_E$ ) permettant l'obtention d'une impression de qualité, à différentes vitesses, suit les iso-valeurs représentées.

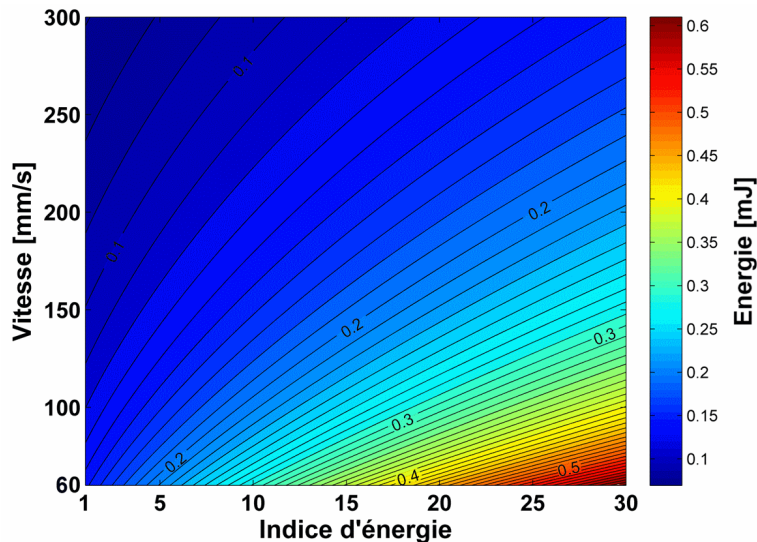


Figure III-9 – Energie fournie à une micro-source en fonction de la vitesse et de l'  $I_E$

### **Synthèse sur l'analyse du signal électrique**

En résumé, l'analyse du signal électrique a été menée sur une tête d'impression de résolution 204 dpi. De fait, pour chaque millimètre tracé dans le sens de défilement des rubans et supports, 8 marques sont nécessaires. Les mesures effectuées ont montré que :

- La tension appliquée à la tête d'impression est constante quelle que soit la configuration d'impression retenue.

$$U = 16V = \text{constante} \quad [V] \quad \text{(III-7)}$$

- L'intensité du courant, donc la puissance fournie aux micro-sources de chaleur, est uniquement fonction de la vitesse et du temps. Elle augmente avec la vitesse de façon linéaire. Cette intensité ne dépend pas de l' $I_E$  saisi.

$$I = f(v) \quad [A] \quad \text{et} \quad P = g(v) \quad [W] \quad \text{(III-8)}$$

- Pour une vitesse donnée, la durée des créneaux et donc l'énergie fournie aux micro-sources, augmente avec l' $I_E$  de façon linéaire. Elle diminue lorsque la vitesse augmente.

$$\tau_{Cr} = f(I_E) \quad \text{et} \quad E = f(v, I_E) \quad [J] \quad \text{(III-9)}$$

Pour conclure, le marché mondial des têtes d'impression par transfert thermique est principalement détenu par la société japonaise Kyocera. La technologie de fabrication des micro-sources de chaleur étant la même quelle que soit la forme de la tête d'impression considérée [42], nous pouvons avancer raisonnablement que les résultats que nous avons présentés dans cette partie sont généralisables, du moins dans le principe. A savoir, ces dispositifs sont alimentés de façon discontinue par une succession de créneaux qui sont fonction de la vitesse d'impression et de la puissance saisie par l'opérateur.

## **III.3. Mesure des températures de surface par thermographie infrarouge**

Un dispositif expérimental permettant de déterminer les températures de surface des micro-sources par thermographie infrarouge a été mis au point. Les expériences sont réalisées hors présence des rubans et supports, la tête d'impression étant exposée à l'air libre. Les configurations d'alimentation retenues correspondent au tracé d'un trait de 1mm d'épaisseur pour une longueur de 100, ce qui renvoie à l'activation simultanée des 800 micro-sources (Figure III-5). Les mesures ont été réalisées à différentes vitesses (60, 100, 150 et 200 mm/s), et pour un  $I_E$  fixé à 12 qui est, rappelons-le, la valeur permettant l'obtention d'une impression « optimale » à la vitesse la plus basse.

### **III.3.1. Principe de mesure par thermographie infrarouge**

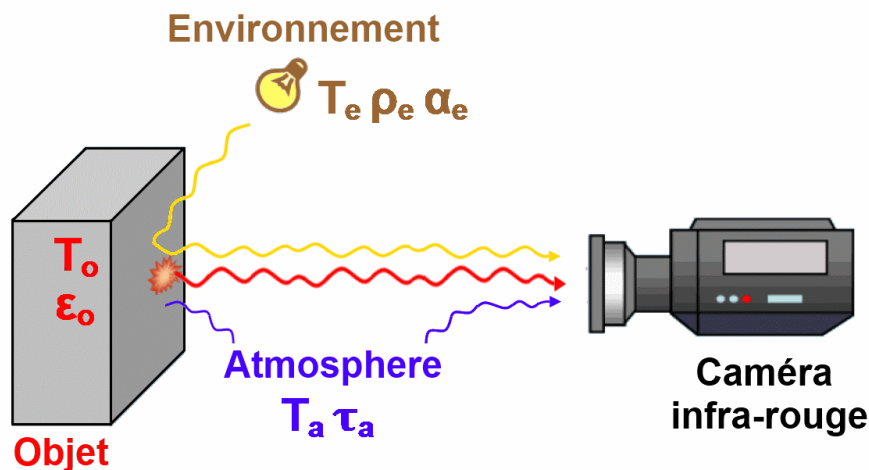
La thermographie infrarouge consiste à exploiter la relation qui lie le rayonnement infrarouge ( $\Phi_i$ ) émis par un corps, à sa température de surface [43, 44]. Le flux « électromagnétique »

## Caractérisation et modélisation de la micro-source de chaleur

$\Phi_2$  reçu par les capteurs spécifiques équipant la caméra, est converti en signal analogique et stocké sur un disque dur externe. Il est ensuite traduit en température et figuré en couleur afin de permettre son analyse. Cependant, la fiabilité de mesures quantitatives réalisées avec un tel équipement, requiert d'étudier à la fois les conditions expérimentales ainsi que le système d'acquisition.

En effet, l'un des problèmes majeurs posé en thermographie est l'analyse du rayonnement issu de la scène thermique [45]. Le flux électromagnétique mesuré par la caméra correspond à un rayonnement global qui résulte de la superposition de plusieurs composantes. Il est produit par :

- le rayonnement spécifique de l'objet, qui dépend de sa température  $T_o$  et de son émissivité spectrale directionnelle  $\epsilon_o$ .
- le rayonnement issu de l'environnement à la température  $T_e$  dont une partie est réfléchiée sur l'objet ( $\rho_e$ ), alors qu'une autre est absorbée ( $\alpha_e$ ).
- l'influence de l'atmosphère qui atténue mais qui peut réémettre, l'ensemble du rayonnement par absorption ( $\tau_a$ ), notamment du fait de la présence de vapeur d'eau.



**Figure III-10 – Schéma de principe d'une scène thermique, extrait de [45].**

Il convient donc, dans le but de préciser les relevés de températures effectués, de contrôler les conditions expérimentales de mesure.

Afin d'éviter les biais technologiques, une attention particulière doit aussi être portée sur le système de mesure.

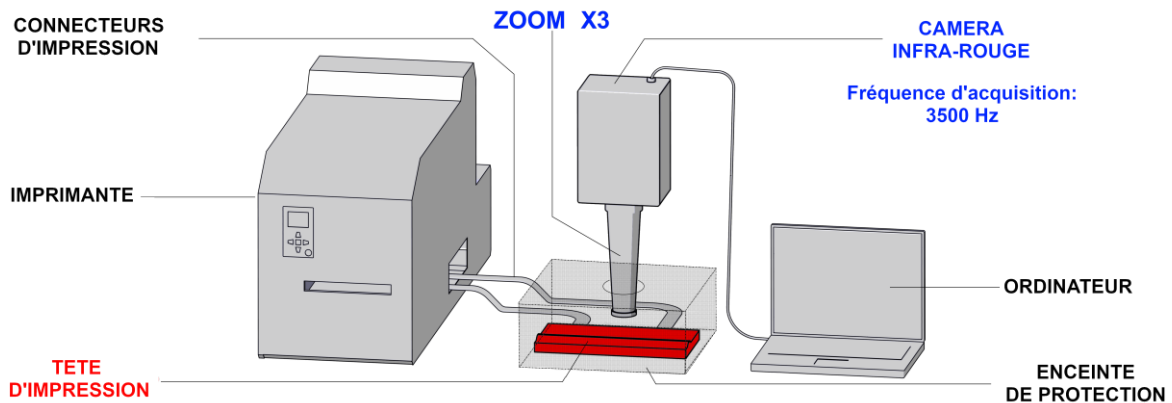
- L'étape d'étalonnage de la caméra est une phase importante de la mesure. Elle peut être réalisée au laboratoire ou lors d'opération de maintenance chez le constructeur. Elle consiste à établir, par le biais de mesures effectuées sur un corps noir, la relation de correspondance entre les températures des objets observés et les signaux électriques délivrés par les capteurs.
- L'uniformité de la réponse des capteurs de la caméra doit être prise en compte et éventuellement corrigée par une procédure spécifique interne à l'appareil.

- Les biais induits par le réfléchissement de l'image thermique des capteurs et éventuellement de leur système de refroidissement doivent être pris en compte. Il se traduit par une perte de signal au centre de la scène thermique. Il est cependant suffisamment pris en compte et corrigé par les constructeurs pour ne pas impacter les mesures de façon significative, pour des températures positives.

### III.3.2. Matériel et conditions expérimentales

Les mesures thermographiques ont été réalisées à l'aide d'une caméra FLIR SC7500 InSb, équipé d'un zoom grossissant trois fois<sup>4</sup>. Cette caméra thermique couvre la bande spectrale 2,5 – 5  $\mu\text{m}$ . Les caractéristiques techniques sont fournies en Annexe 2. Les données recueillies ont été post-traitées à l'aide du logiciel Altaïr.

La Figure III-11 présente le schéma du banc de mesure réalisé. La tête d'impression a été déportée de son emplacement d'origine et exposée, en cours de fonctionnement, à l'air libre.



**Figure III-11 - Banc de mesure de température de surface des micro-sources**

Les conditions environnementales (lumière, température ambiante...) ont été contrôlées afin de limiter au maximum les rayonnements parasites ainsi que les variations de température du local d'instrumentation, de même que les flux convectifs. En pratique, une enceinte protectrice réfléchissante a été disposée autour de la scène thermique et les mesures ont été réalisées dans un laps de temps suffisamment court pour que l'on puisse supposer la température de l'environnement constante.

Ensuite, afin de prendre en compte les effets de l'émissivité directionnelle, le banc de mesure a été disposé de telle sorte à placer l'objectif de la caméra de façon perpendiculaire par rapport à l'objet analysé. Nous avons supposé que la surface des sources de chaleur était positionnée dans un plan parallèle à celui de la plaque d'aluminium constituant le corps de la tête d'impression, que nous avons pris en référence.

La scène thermique observée a pour dimensions 630 \* 790  $\mu\text{m}^2$ . Elle permet de suivre au cours du temps, le comportement thermique de 6 micro-sources de chaleur. Chacun des capteurs scrute une surface de 10 \* 10  $\mu\text{m}^2$ . Le temps d'intégration des capteurs a été fixé à 27  $\mu\text{s}$ , afin d'observer préférentiellement les températures hautes lors de l'expérimentation.

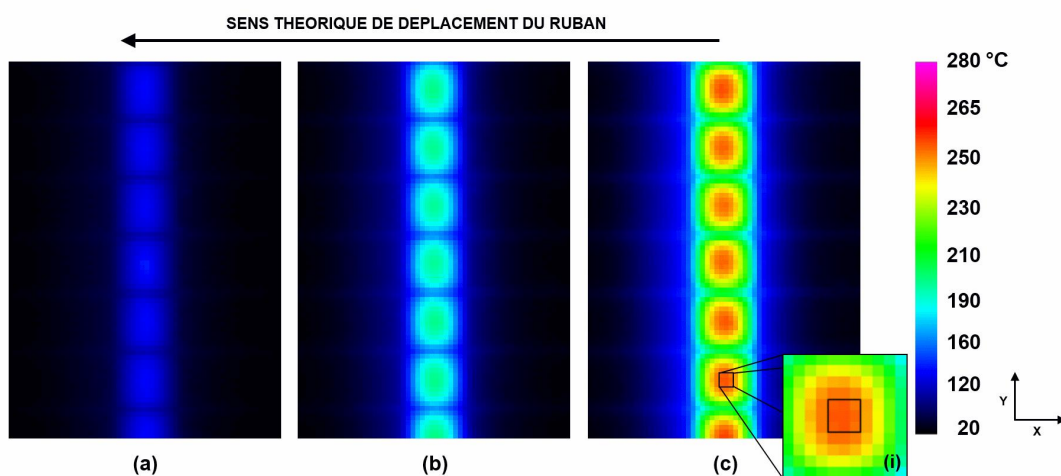
<sup>4</sup> Prêt du Laboratoire de Thermocinétique de Nantes

En effet, plus le flux de rayonnement est faible et plus le temps d'intégration doit être long pour obtenir une image fiable de la température de l'objet. Ce temps conditionne pour partie la fréquence d'acquisition, limité dans notre cas à 3598 Hz. La caméra thermique a été utilisée avec l'étalonnage réalisé lors des opérations de maintenance effectuées par le fabricant. De plus, la nappe de capteurs a été corrigée en uniformité au cours d'une précédente manipulation. Elle n'a pas, au cours de nos relevés, fait l'objet d'une procédure particulière.

L'émissivité des matériaux observés est considérée égale à 0,81 [46].

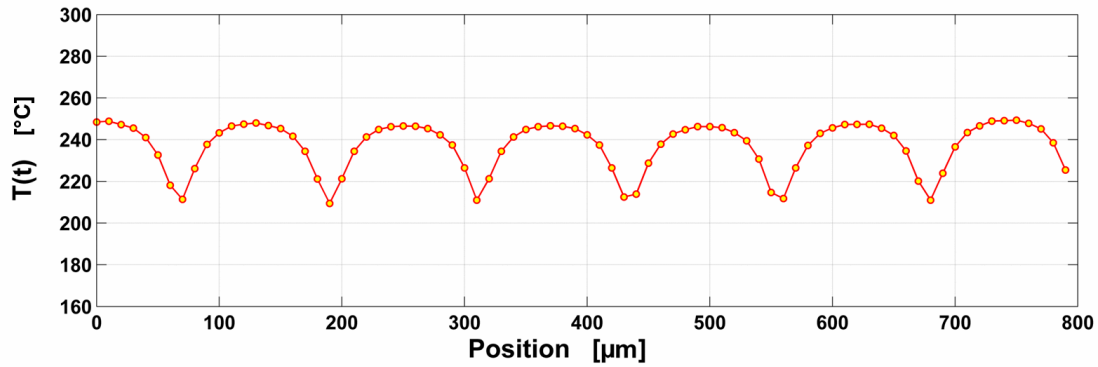
### III.3.3. Résultats expérimentaux

Les observations par thermographie infrarouge sont menées sur un trait de 1 mm d'épaisseur. L'ensemble des micro-sources est excité. La Figure III-12 présente une image thermique de la surface de la tête d'impression obtenue au début (a), en cours (b) et à la fin (c) du 4<sup>ème</sup> créneau  $cr_4$  (Figure III-5), dans les conditions d'impression de référence ( $v = 60$  mm/s et  $I_E = 12$ ). Nous ne nous intéressons qu'à la surface des micro-sources qui se présentent perpendiculairement à la caméra. Les zones de l'image de couleur noire, correspondent aux parties courbes des dots et sont donc susceptibles, compte tenu de la dépendance directionnelle de l'émissivité, d'introduire un biais de mesure.



**Figure III-12 – Mesure thermique pour un trait de 1 mm à différents temps ( $v=60$  mm/s,  $I_E=12$ )**

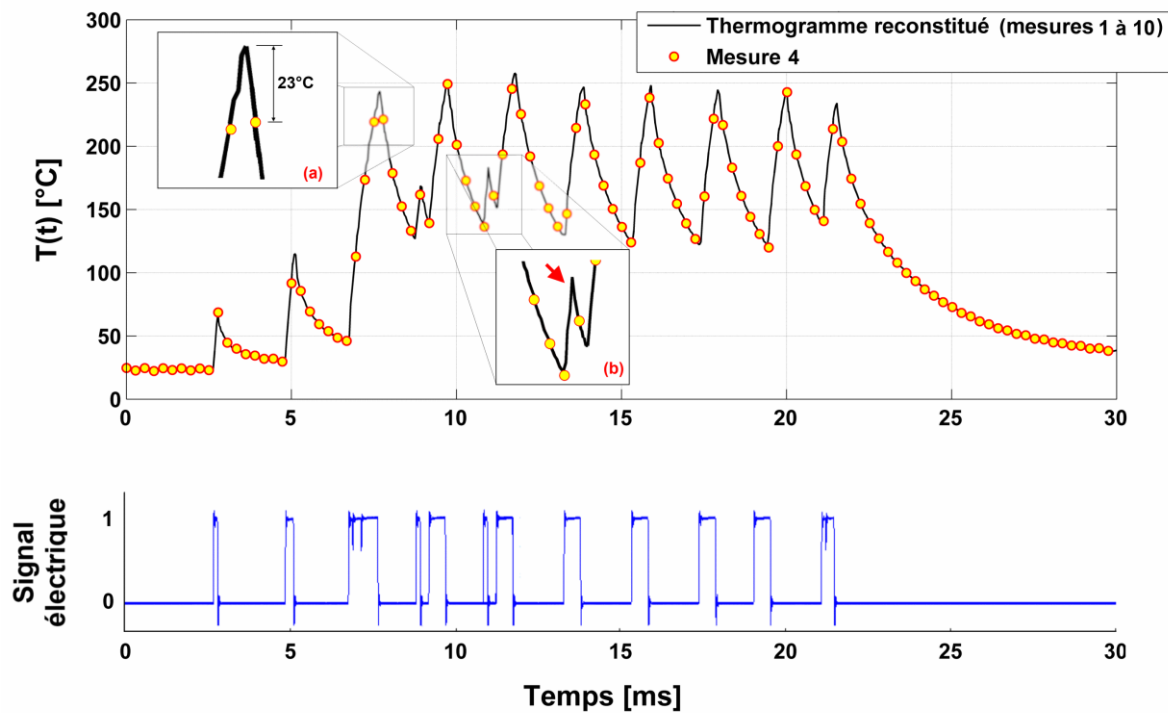
L'extraction d'un thermo-gramme le long des micro-sources de chaleur selon y, passant par le centre de chacune d'entre elles, montre qu'elles ont un comportement thermique homogène les unes par rapport aux autres (Figure III-13). Les températures maximales de chaque source, de l'ordre de 250°C, varient au plus de 3°C. Cet écart peut être imputé à de légères différences de résistance électrique.



**Figure III-13 – Température extraite le long des micro-sources de chaleur ( $x=0$ ) en fin de créneau  $cr_3$**

Nous nous intéressons à présent à l'évolution temporelle des températures de surface des micro-sources. Les mesures ont été réalisées au centre d'une d'elles, en moyennant les valeurs des températures sur une aire couvrant  $3 * 3 \text{ pixels}^2$  soit  $9 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2$ . Le détail (i) de la Figure III-12 montre l'homogénéité des températures relevées par les neuf capteurs de la caméra. L'évolution au cours du temps de l'écart type observé entre ces mesures n'excède pas  $1,5^{\circ}\text{C}$ . Chaque essai a été répété dix fois avec un temps de pose entre chacun d'entre eux de 5 mn. Cette répétition s'est avérée nécessaire pour pallier à la faible vitesse d'acquisition de la caméra, comparativement à la rapidité des phénomènes observés, la phase de chauffage et de refroidissement des micro-sources n'excédant pas 2 millisecondes.

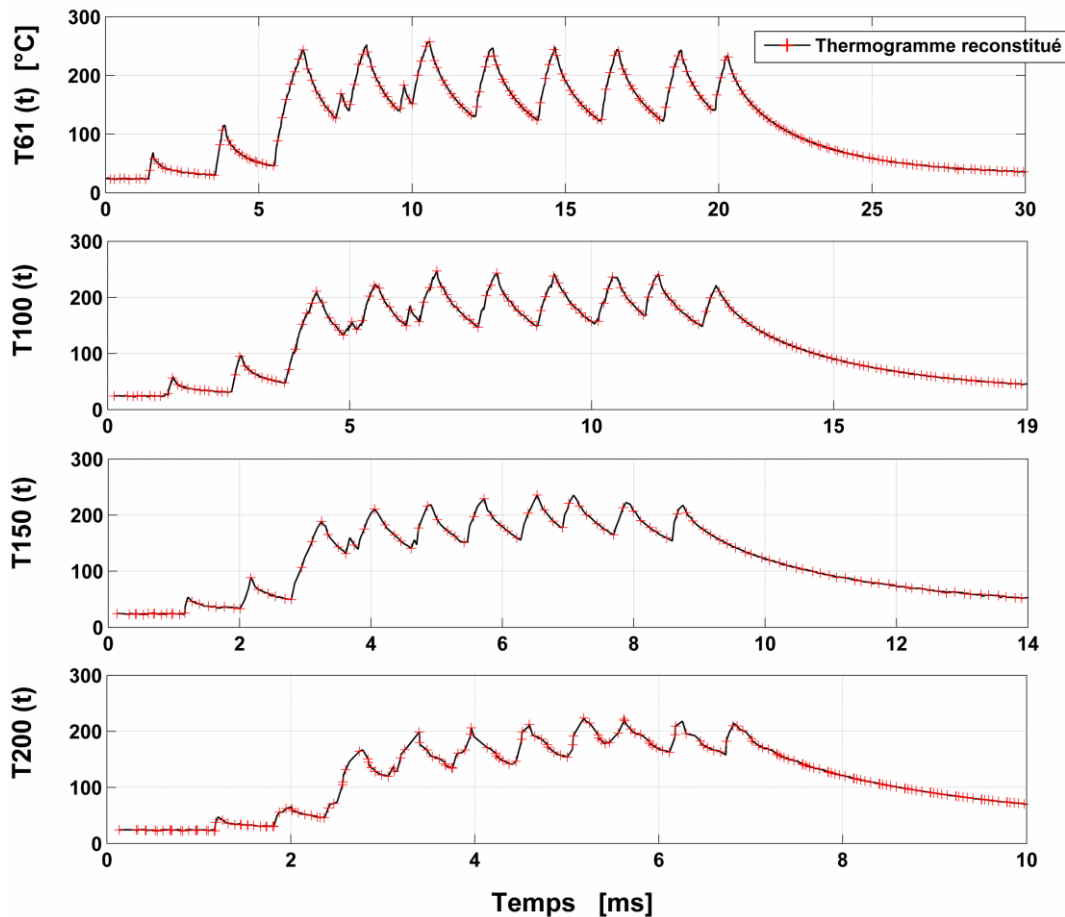
La combinaison des dix thermo-grammes après calage du zéro, permet d'obtenir une seule et unique courbe mettant en évidence l'ensemble des extrémums de température. La Figure III-14 présente le résultat de cette reconstitution, ainsi qu'un exemple de mesure. Nous observons que sur un unique essai, certains extrémums tels que celui généré par le créneau  $cr_1$ , sont tronqués (a), tandis que d'autres ne sont pas représentés par le signal thermique ( $cr_{2,1} \rightarrow b$ ).



**Figure III-14 – Évolution de la température pour un trait de 1mm d'épaisseur ( $v=60$  mm/s –  $I_E=12$ )**

L'analyse des résultats expérimentaux obtenus montrent que les créneaux de préchauffage  $cr_{pr1 \rightarrow 2}$  entraînent une augmentation progressive de la température  $T(t)$  des micro-sources qui atteint à la fin de ce cycle 50% de sa valeur maximale. Les signaux  $cr_1$  à  $cr_3$  sont destinés à provoquer la fusion de l'encre portée par le ruban. Ils permettent également l'augmentation globale du niveau d'énergie du système. Au terme du troisième créneau  $cr_3$ , un état thermique quasi-périodique s'installe. Nous pouvons observer que les niveaux d'énergie délivrés à la tête d'impression sont ajustés de sorte à assurer l'équilibre entre les différentes séquences d'une période impulsionnelle ( $T(t)$  reste compris entre 120 et 250°C).

La Figure III-15 donne les thermo grammes obtenus pour des vitesses d'impression allant de 60 à 200 mm/s. Malgré la procédure de recombinaison à partir de 10 essais, les relevés de températures deviennent moins précis à mesure que la vitesse augmente. La fréquence de la caméra nous permet d'extraire une information toutes les 278  $\mu$ s or, comme nous l'avons vu au paragraphe III.2.2, les temps de cycle pour les vitesses précitées sont respectivement de 2000, 1250, 800 et 600  $\mu$ s. Les extrémums restent visibles pour chacune des configurations expérimentales mais les détails liés aux subdivisions de signal  $cr_{2,1}$  et  $cr_{3,1}$  sont masqués pour la vitesse de 200 mm/s.



**Figure III-15 – Évolution de la température pour des vitesses de 60 à 200 mm/s et une  $I_E$  de 12**

### ***Synthèse sur les observations par thermographie infra-rouge***

Les mesures obtenues par thermographie infra-rouge ont été réalisées dans un souci de minimiser les biais éventuellement introduits par les conditions expérimentales ainsi que par la chaîne d'acquisition. Ceci étant, une procédure de reconstitution de thermogrammes par calage d'essais successif a été adoptée afin de palier à la faible fréquence d'enregistrement des données en cours d'expériences. Ainsi, quatre vitesses ont pu être testées avec un  $I_E$  fixe. Les mesures effectuées ont permis de déterminer les détails thermiques liés à la constitution du signal électrique. Cependant, nous avons observé une dégradation des résultats obtenus pour la vitesse de défilement la plus élevée. Ces thermogrammes vont être réinvestis dans l'étape suivante de ce travail qui consiste à développer un modèle numérique de la source de chaleur. L'ensemble des sources étant excités simultanément, nous considérons l'une d'entre elle éloignée des bords et donc non affectée par leurs effets. Ainsi, au niveau de la source considérée, les pertes latérales portées par « y » se compensent, justifiant en cela, un modèle bi dimensionnel.



### III.4. Modèle numérique de la tête d'impression

Le modèle de la micro-source de chaleur et de son environnement immédiat est construit selon le plan XZ (Figure III-16). Nous considérons qu'il passe par le centre de l'une des sources.

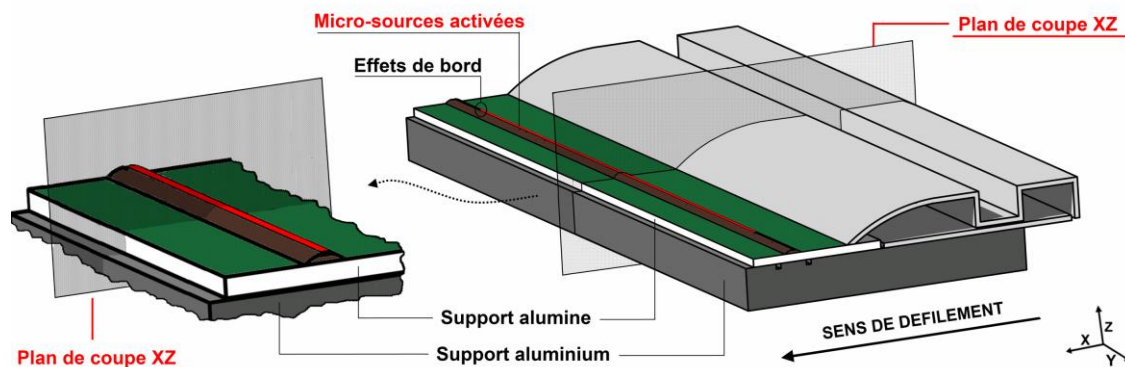


Figure III-16 – Modèle de source 2D – Plan de coupe

#### III.4.1. Géométrie

L'imagerie réalisée au Microscope Electronique à Balayage (cf II.3.1) a permis de révéler les différentes couches constituant les dots. Ces données ont été réinvesties dans le développement du modèle numérique présenté en Figure III-17. Celui-ci se compose du dot ( $\Omega_2$ ), du support identifié comme étant constitué d'alumine ( $\Omega_1$ ) ainsi que de la plaque d'aluminium ( $\Omega_0$ ). Compte tenu des dimensions mises en jeu, la plaque d'aluminium n'est pas représentée dans toute son épaisseur mais seulement sur les 3 premiers millimètres (Figure III-16). A l'intérieur du dot, à une profondeur de quelques microns, est représentée la micro source ( $\Omega_3$ ).

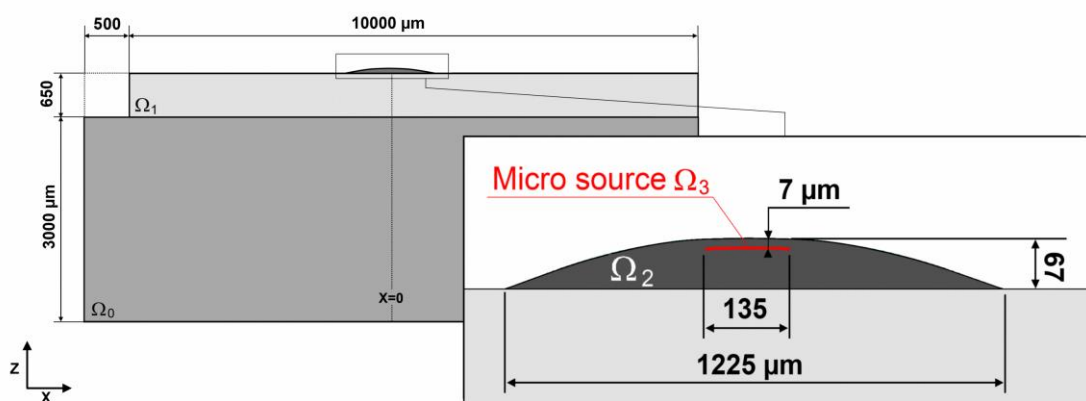


Figure III-17 – Modèle numérique d'un dot

Les résultats d'analyse microscopique n'ont pas permis de mettre en évidence l'épaisseur réelle de la micro-source de chaleur. De ce fait, la puissance volumique sera déduite des mesures réalisées en thermographie infrarouge. Par contre, nous conservons de l'analyse

menée sur le signal électrique, la forme et l'architecture permettant de définir, en fonction du temps, l'injection ou non de la puissance au sein du système.

Les propriétés thermo physiques des différents domaines sont rappelées dans le Tableau III.2.

Domaine	$\lambda$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	Cp (J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	$\rho$ (kg.m <sup>-3</sup> )
$\Omega_0$	240	900	2700
$\Omega_1$	18	880	3690
$\Omega_2$	1,4	835	2225

**Tableau III.2 – Propriétés thermiques initiales des matériaux constitutifs de la tête d'impression**

### III.4.2. Modèle mathématique et conditions limites

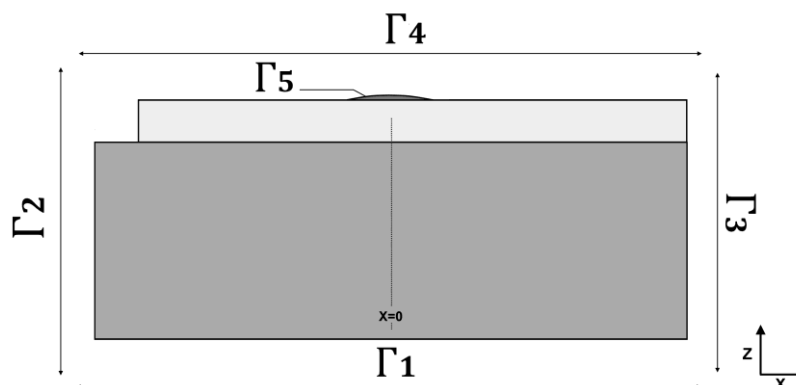
Le transfert de chaleur opéré lors du processus d'impression est régi par le système d'équations suivantes :

$$(\rho C_p)_k \frac{\partial T_k}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_k \nabla T_k) + Q_k(t) \quad (k = 0:3) \quad (III-10)$$

$Q_k(t)$  représente les apports volumiques dans chaque couche, non nuls uniquement pour la micro source (III-11).

$$Q_0(t) = Q_1(t) = Q_2(t) = 0 ; Q_3(t) = Q(t) \quad (III-11)$$

Les conditions aux limites sont représentées schématiquement sur la Figure III-18.



**Figure III-18 – Conditions limites**

Compte tenu de la brièveté du temps total d'excitation électrique, le flux de chaleur qui est généré est limité à l'environnement proche de la micro source de chaleur. Nous pouvons, pour les domaines  $\Omega_0$  et  $\Omega_1$ , faire l'hypothèse d'un milieu semi-infini dans le sens porté par les axes X et Z. Ainsi une condition de Dirichlet est imposée aux frontières  $\Gamma_1$  et  $\Gamma_3$ . La température considérée est égale à celle de l'ambiante.

### Caractérisation et modélisation de la micro-source de chaleur

$$\forall (x, z) \in (\Gamma_1, \Gamma_3), \quad T(x, y, t) = T_{amb} \quad (III-12)$$

Sur la face latérale  $\Gamma_2$  et supérieure  $\Gamma_4$ , une condition limite de Newton est appliquée (III-13).

$$\forall (x, z) \in (\Gamma_2, \Gamma_4), \quad \varphi(x, z, t) = h (T - T_{amb}) \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (III-13)$$

avec  $h$ , le coefficient d'échange convectif thermo-dépendant.

Enfin, sur la face du dot exposée à l'air libre ( $\Gamma_5$ ), nous ajoutons aux échanges convectifs les échanges par rayonnement (III-14).

$$\forall (x, z) \in (\Gamma_5), \quad \varphi(x, z, t) = h (T - T_{air}) + \varepsilon_2 * \sigma * (T^4 - T_{amb}^4) \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (III-14)$$

avec  $\varepsilon_2$ , l'émissivité du dot et  $\sigma$ , la constante de Stefan-Boltzmann.

De plus, dans la mesure où le dot est fabriqué par dépôt sous vide, nous faisons l'hypothèse que l'effet thermique des résistances de contact entre les différentes couches sont négligeables au regard des résistances équivalentes des différentes épaisseurs [26, 33].

Les équations régissant le transfert de chaleur au sein de la tête d'impression sont résolues à partir du logiciel de calcul par éléments finis Comsol Multiphysics®, version 3.5a. Le solveur « direct UMFPACK » est utilisé, avec une gestion automatique des pas de temps d'une durée maximale de 4  $\mu$ s, conformément à la fréquence d'acquisition du signal électrique.

Une étude de maillage a été réalisée en faisant varier le raffinement des éléments à proximité de la micro source. L'écart type calculé entre les températures issues d'un modèle de référence et différents essais montre que, au-delà de 5000 degrés de liberté, la précision est de 0,03°C et qu'elle n'évolue quasiment plus. Parallèlement, les temps de calcul augmentent fortement.

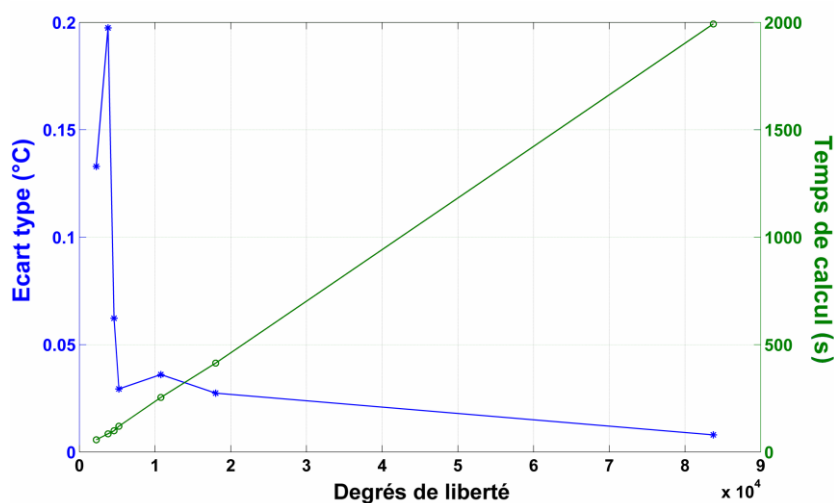
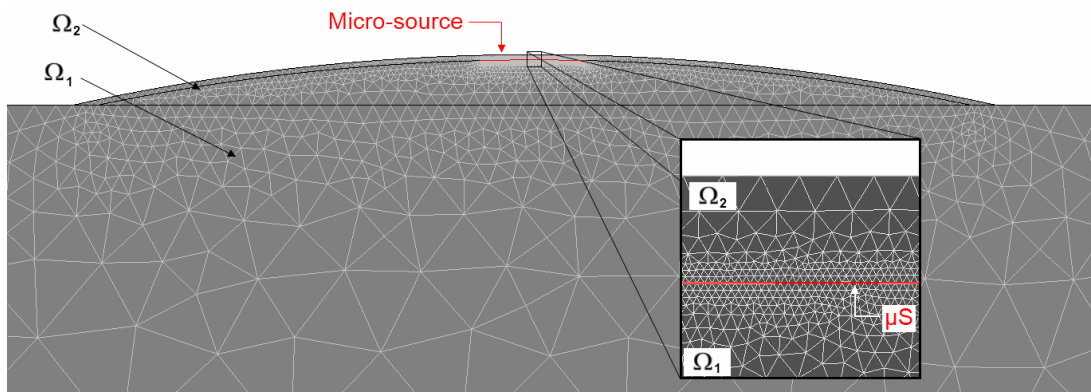


Figure III-19 – Etude de maillage

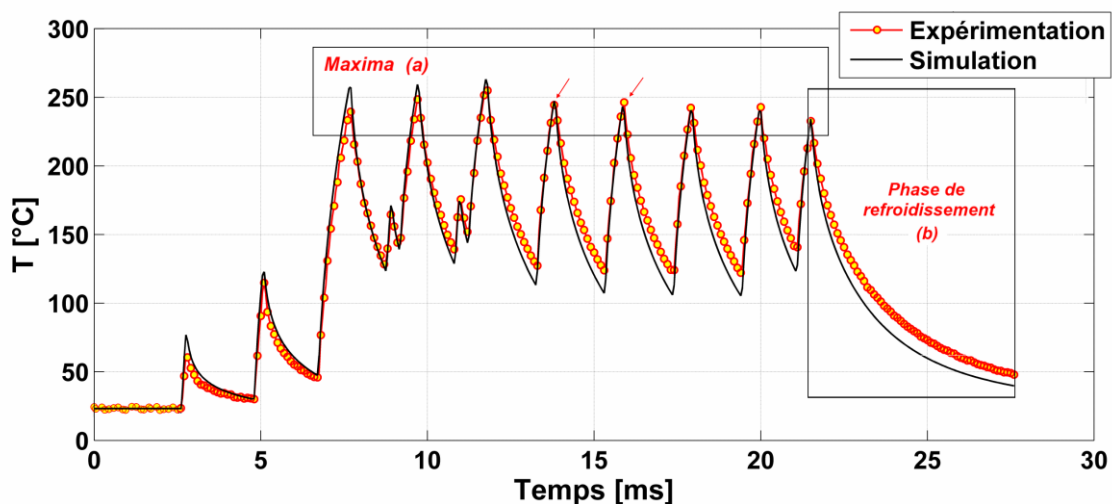
Nous faisons un compromis entre la précision et le temps de calcul. La Figure III-20 montre le maillage retenu. Il contient 8470 éléments triangulaires à six nœuds et 18004 degrés de liberté.



**Figure III-20 – Maillage retenu et raffinement**

#### III.4.3. Etude de sensibilité

Une valeur initiale de la puissance volumique  $Q_{init}(t, v, I_E)$  injectée dans le modèle est approchée par essais successifs, afin d'atteindre des niveaux maximum de température du même ordre que ceux mesurés par thermographie infra-rouge à la vitesse  $v = 60$  mm/s, pour un  $I_E = 12$ . Une première comparaison entre les résultats du calcul numérique et les mesures réalisées par thermographie infra-rouge est réalisée (Figure III-21). Celle-ci montre que si les maxima des températures sont atteints (Figure III-21, a), le comportement du modèle en phase de refroidissement est plus éloigné de l'expérimental (Figure III-21, b).



**Figure III-21 – Comparaison résultats numériques et mesures expérimentales,  $v = 60$  mm,  $I_E = 12$ ,  $Q_{init} = 1.1 \times 10^7$  W.m<sup>3</sup>**

Une analyse de sensibilité a été menée sur les propriétés thermiques des matériaux constituant le système, les conditions limites et la puissance  $Q$  injectée dans le modèle (Tableau III.3).

Entrée du modèle testée	Sensibilité réduite
Puissance	$\bar{S}_Q$
$Cp_0$	$\bar{S}_{Cp0}$
$Cp_1$	$\bar{S}_{Cp1}$
$Cp_2$	$\bar{S}_{Cp2}$
$\lambda_0$	$\bar{S}_{\lambda0}$
$\lambda_1$	$\bar{S}_{\lambda1}$
$\lambda_2$	$\bar{S}_{\lambda2}$
$\epsilon_2$	$\bar{S}_{\epsilon2}$

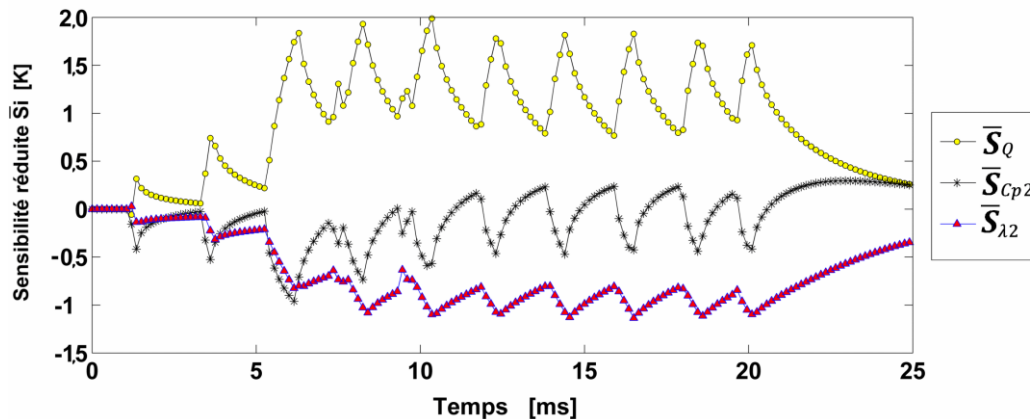
**Tableau III.3 – Récapitulatif des sensibilités réduites testées**

Les coefficients de sensibilités réduites sont définis par la relation suivante :

$$\bar{S}_i = P_i \frac{\partial T}{\partial P_i} \approx P_i \frac{T(P_i + \delta P_i) - T(P_i)}{\delta P_i} \quad (III-15)$$

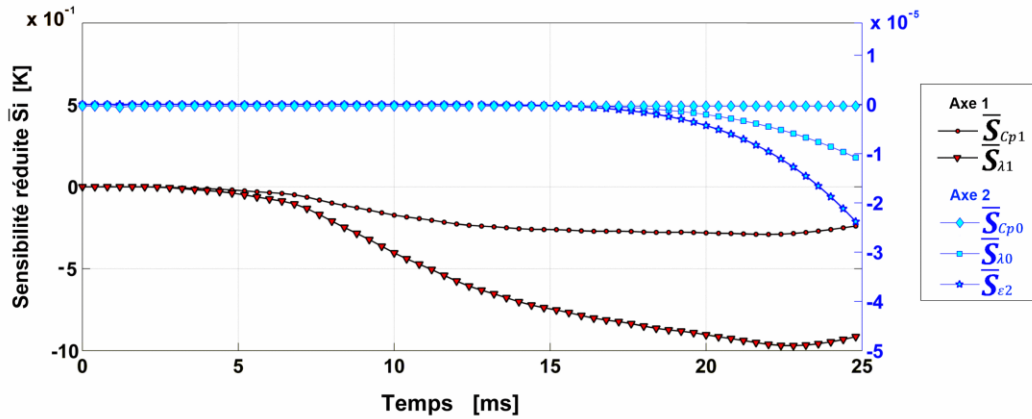
Les Figure III-22 et Figure III-23 donnent les sensibilités réduites à chaque paramètre. Une variation de 10% a été imposée à chacun d'entre eux.

L'analyse présentée dans la Figure III-22 montre que la puissance volumique Q est le paramètre le plus sensible avec une augmentation des températures de l'ordre de 2K au maximum. De même, les conductivités et capacités thermiques  $\lambda_2$  et  $Cp_2$  correspondant au verre, entraînent des écarts de températures de l'ordre de 1 à 1,5K.



**Figure III-22 – Sensibilité du modèle aux paramètres prépondérants**

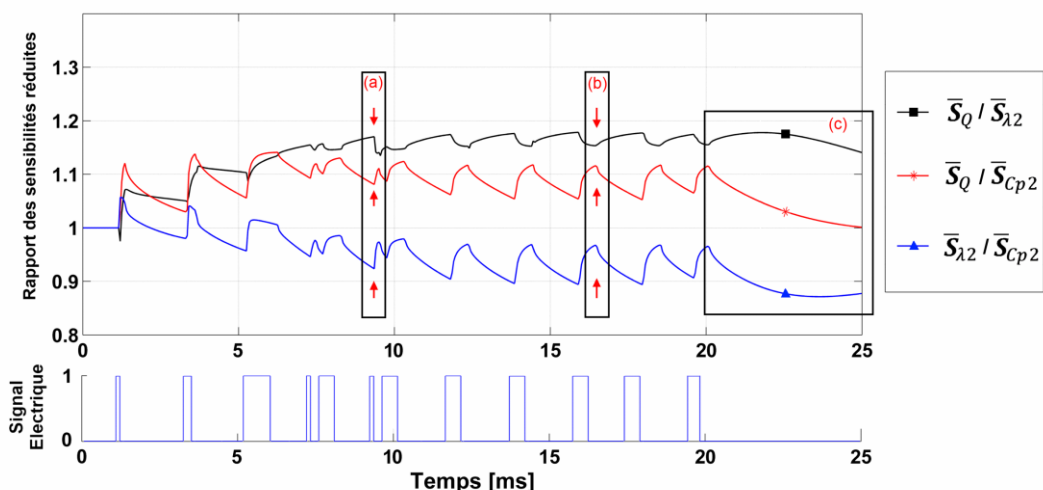
La Figure III-23 montre en revanche que les autres paramètres sont nettement moins influents, puisqu'au plus, ils génèrent une variation de température de l'ordre de 1K.



**Figure III-23 – Sensibilité du modèle aux paramètres secondaires**

Ainsi, afin d'accorder les températures calculées par le modèle numérique avec les mesures obtenues par thermographie infrarouge, une procédure itérative d'ajustement de la capacité thermique  $C_{p2}$ , de la conductivité  $\lambda_2$  ainsi que de la puissance injectée, a été mise en place.

Le rapport des sensibilités de ces paramètres, présenté dans la Figure III-24 montre qu'ils ne sont pas corrélés. Nous pouvons observer des ruptures de pente dans l'évolution au cours du temps de ceux-ci (Figure III-24, a et b). Elles correspondent aux extremums de température. Nous considérons que, compte tenu de la brièveté des créneaux d'énergie injectés dans le système ainsi que de leur forte intensité, ces extremums sont préférentiellement pilotés par la puissance injectée. De plus, de  $t=20$  ms à  $t=25$  ms (Figure III-24, c), la corrélation entre les différents coefficients appliqués aux paramètres du modèle est moindre. Cette phase correspond au refroidissement du système qui est principalement le fait des propriétés thermiques de la matière constitutive des différents éléments de la tête d'impression. Elle est également pilotée par les conditions limites du modèle numérique puisque nous considérons les températures mesurées en surface, au centre de la micro-source de chaleur.



**Figure III-24 – Rapport des sensibilités réduites des paramètres prépondérants**

**Synthèse sur la sensibilité du modèle thermique de la tête d'impression**

Dans cette partie, nous avons réinvesti les mesures géométriques réalisées au MEB ainsi que les propriétés thermo physiques issues des hypothèses faites sur les matériaux constitutifs de la tête d'impression à partir des données de l'analyseur EDX. Les premières comparaisons effectuées entre les mesures obtenues par thermographie infra-rouge et le produit du calcul numérique montre que le modèle mathématique, moyennant un ajustement de ses paramètres d'entrée, adopte un comportement thermique satisfaisant (Figure III-21). Rappelons ici que notre objectif est de déterminer un jeu de paramètre susceptible de reproduire numériquement le comportement de la micro-source de chaleur pour un  $I_E$  fixe et des vitesses de défilement de 60 à 200 mm/s.

III.4.4. Validation du modèle numérique de la source

L'analyse du signal électrique imposé à la micro-source a permis de mettre en évidence le comportement linéaire de l'évolution de la puissance électrique par rapport à la vitesse d'impression (Figure III-8). Cette contrainte est prise en compte dans la procédure d'ajustement. Ainsi, l'expression de la puissance volumique  $Q(v)$  déduite de l'équation (III-5), est :

$$Q(v) = [\alpha'(v - 60) + Q_{60}] \cdot \Lambda_v(t) \tag{III-16}$$

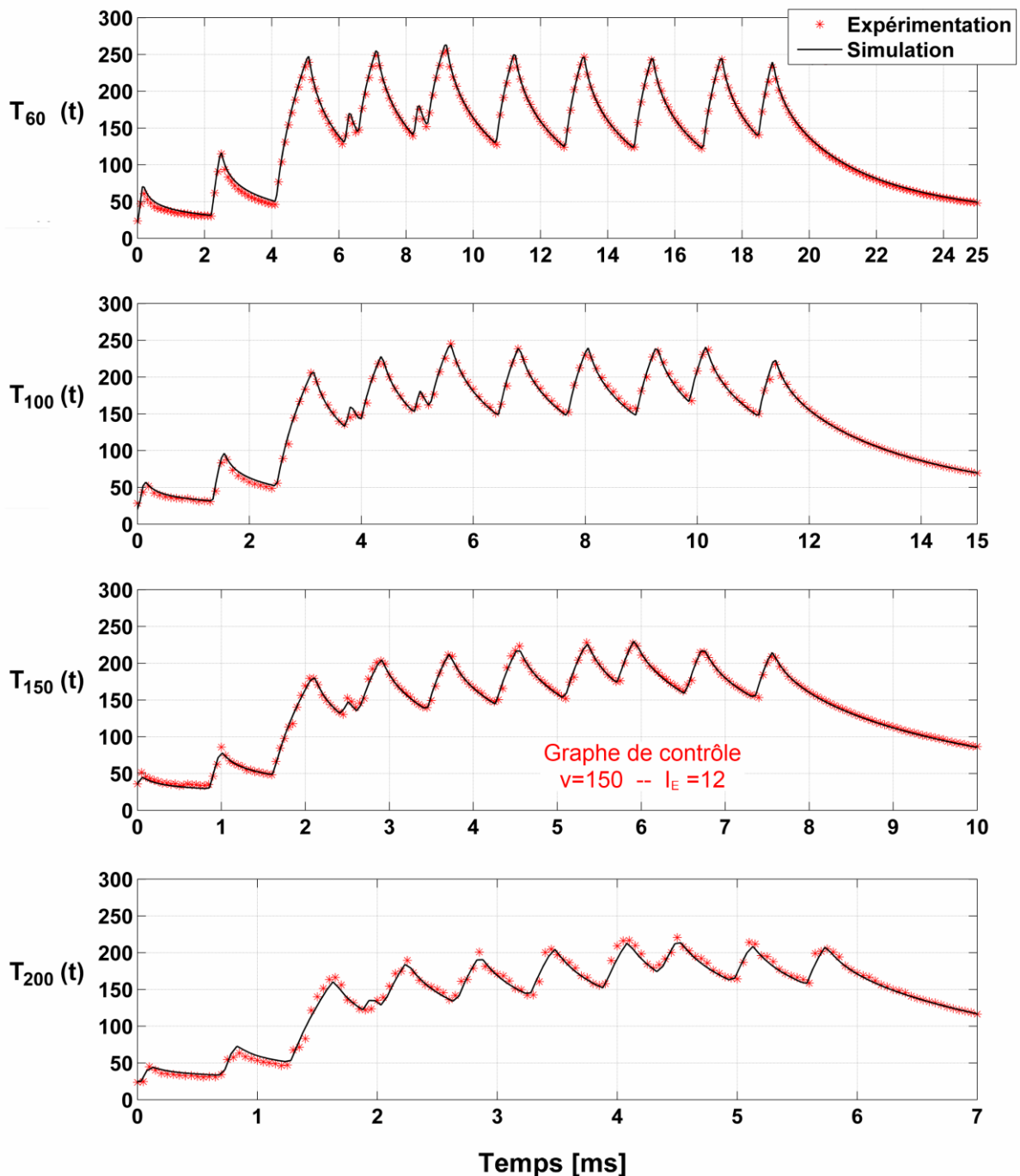
où  $\Lambda_v(t)$  représente l'architecture du signal électrique obtenue à l'aide des mesures expérimentales et  $Q$ , la puissance injectée dans le modèle à la vitesse de 60 mm/s.

La puissance volumique  $Q_{60}$  ainsi que les propriétés thermiques  $\lambda_2$  et  $c_{p2}$  du dot ( $\Omega_2$ ) ont été ajustées pour mieux décrire le comportement thermique de la tête d'impression. Les valeurs retenues sont données dans le tableau ci-dessous et la procédure d'ajustement décrite dans Annexe 3.

$\lambda_2$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	$C_{p2}$ (J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	Q (W.m <sup>-3</sup> )
1.358	1069	1.411.10 <sup>7</sup>

**Tableau III.4 – Ajustement des paramètres d'entrée.**

La comparaison entre les mesures thermiques et les valeurs calculées par le modèle est présentée sur la Figure III-25. Les résultats sont représentatifs des trois vitesses prises en compte dans le calcul d'ajustement, soient 60, 100 et 200 mm/s, plus une dernière, intermédiaire, de 150 mm/s.



**Figure III-25 – Comparaison entre les températures expérimentales et simulées**

Nous pouvons observer que l'adéquation entre expérimentation et simulation est bonne. Par exemple, pour la vitesse de 60 mm/s, l'erreur obtenue pour les températures maximales atteintes par le système n'excède pas 2,5%. De plus, nous pouvons observer que les minimums atteints lors des phases de repos intervenants entre deux créneaux d'excitation électrique, coïncident avec les relevés en température obtenus par thermographie infrarouge. Ceci est également vrai pour la période finale de retour à la température ambiante. A la vitesse intermédiaire de 150 mm/s, le modèle reproduit correctement le comportement thermique du système avec un écart type calculé de 3,5K. Les écarts types



entre les températures mesurées et calculées par le modèle ne dépassent pas 6,1K. Ils sont résumés dans le Tableau III.5.

Vitesse (mm.s <sup>-1</sup> )	60	100	150	200
Ecart type	2.34	3.17	3.51	6.11

**Tableau III.5 – Résultats de la procédure d'inversion numérique : écart types**

Les mesures témoignent de la bonne estimation des facteurs correctifs appliqués aux propriétés thermiques de la matière. Néanmoins, du fait de la dégradation de la qualité de la mesure effectuée par thermographie infra-rouge avec l'augmentation de la vitesse, nous pouvons noter que l'accord entre expérimentation et simulation décroît.

### **III.5. Conclusion**

L'objectif que nous nous sommes assigné dans ce chapitre était de décrire la méthode par laquelle nous avons abouti à la création d'un modèle bidimensionnel représentatif du comportement thermique de la source de chaleur et de son environnement, hors la présence des rubans et supports d'impression. Le contexte expérimental est celui du tracé d'un trait de 1 mm d'épaisseur. Comme nous avons pu le voir au cours du chapitre précédent, la modélisation numérique de la source de chaleur repose sur des hypothèses faites aux regards des propriétés thermo physiques attribuées aux matériaux qui constituent la tête d'impression. De fait, les dimensions et la fabrication de ce système industriel ne nous ont pas permis d'effectuer des prélèvements en vue de caractérisation, ce que nous avons contourné en effectuant une analyse dispersive en énergie (analyse EDX). Ces résultats nous ont permis de révéler la nature des éléments constitutifs de la tête d'impression et, à partir des données de la littérature, de leur attribuer des propriétés thermo-physiques. Par contre, le volume d'application de la puissance ne nous a pas été accessible par imagerie réalisée au MEB. De ce fait, seule l'architecture générale du signal électrique responsable de l'effet joule générateur du flux de chaleur a été conservée ce qui a permis d'accéder notamment, aux temps d'application de la puissance. Des mesures de températures en surface au centre des micro-sources de chaleur ont été menées par thermographie infra-rouge. Elles ont permis, après post-traitement et recalage des données extraites lors d'essais successifs, d'obtenir des thermo-grammes pour trois vitesses différentes. Le modèle bidimensionnel construit a montré, par comparaison avec les résultats expérimentaux, qu'il était nécessaire d'ajuster certains paramètres d'entrée du modèle. Une analyse de sensibilité a permis de déterminer les paramètres prépondérants à ajuster, à savoir ceux relatifs aux propriétés matières du matériau  $\Omega_2$  ainsi que comme la puissance dissipée au niveau des micro-sources de chaleur. Au final, les résultats du calcul numérique montrent un bon accord quantitatif avec les températures mesurées expérimentalement.



# Chapitre IV

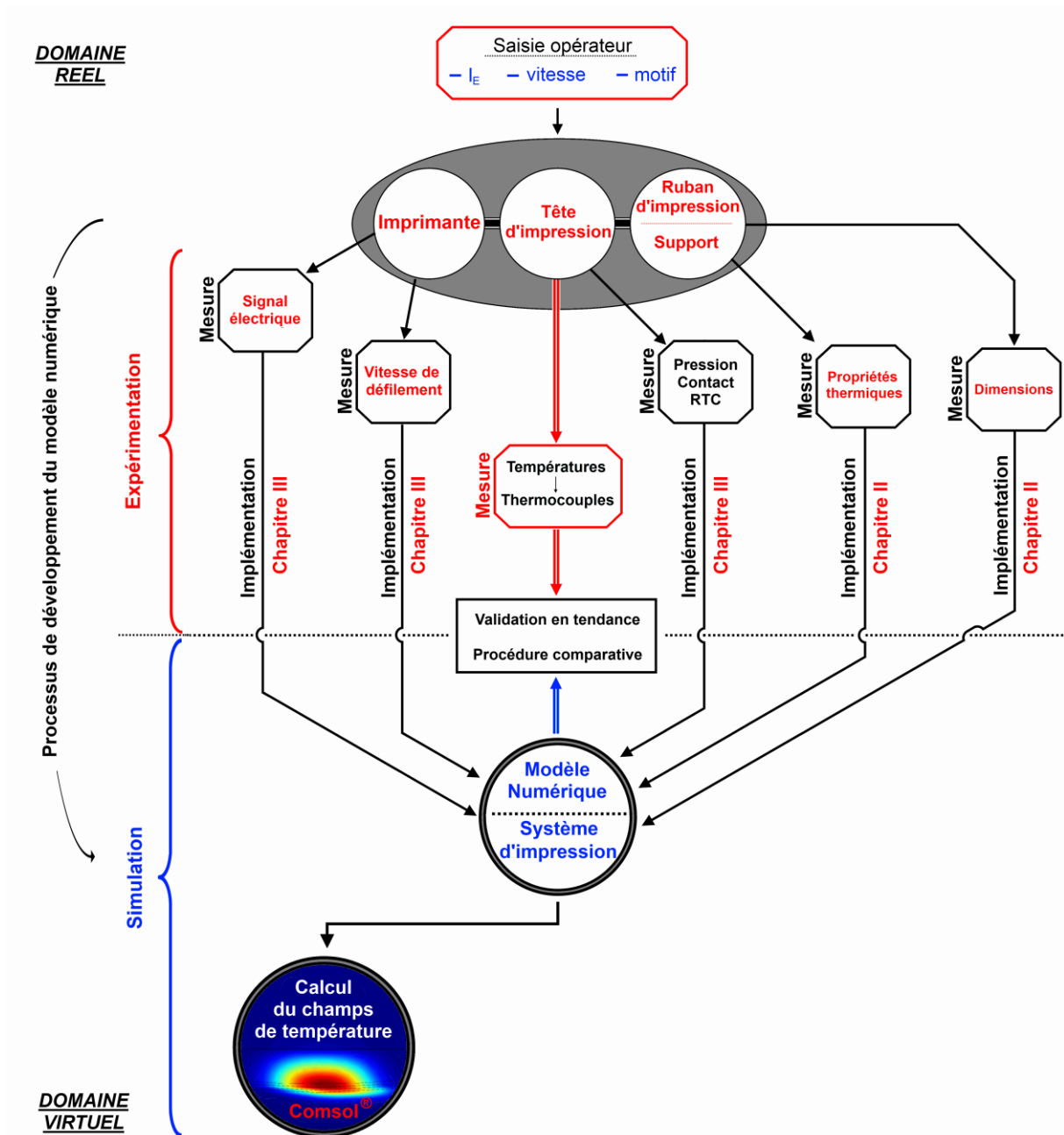
## Modélisation du système d'impression

### IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous décrivons le modèle numérique bidimensionnel de la micro-source de chaleur et de son environnement immédiat, auxquels nous ajoutons les rubans et supports d'impression. Les mesures expérimentales ainsi que les méthodes d'instrumentation s'y rapportant sont également présentées.

Notre but est de créer un outil qui reproduise les conditions de fonctionnement de l'imprimante par transfert thermique. L'analyse des résultats numériques permettra de mieux comprendre le système étudié d'un point de vue thermique. Les connaissances qui en seront tirées seront intégrées dans les processus industriels de résolution de problème ou de développement de nouveaux produits. Ce travail sera, en outre, réinvesti dans un prochain chapitre afin de développer un outil de reproduction virtuelle de code à barres. Ce dernier a pour objectif de mieux appréhender les problèmes rencontrés dans les processus industriels et d'aider au développement de nouveaux produits.

Le synoptique de la Figure IV.1 présente la démarche adoptée et les différentes mesures réalisées sur l'imprimante afin d'élaborer et de valider le modèle numérique du système d'impression.

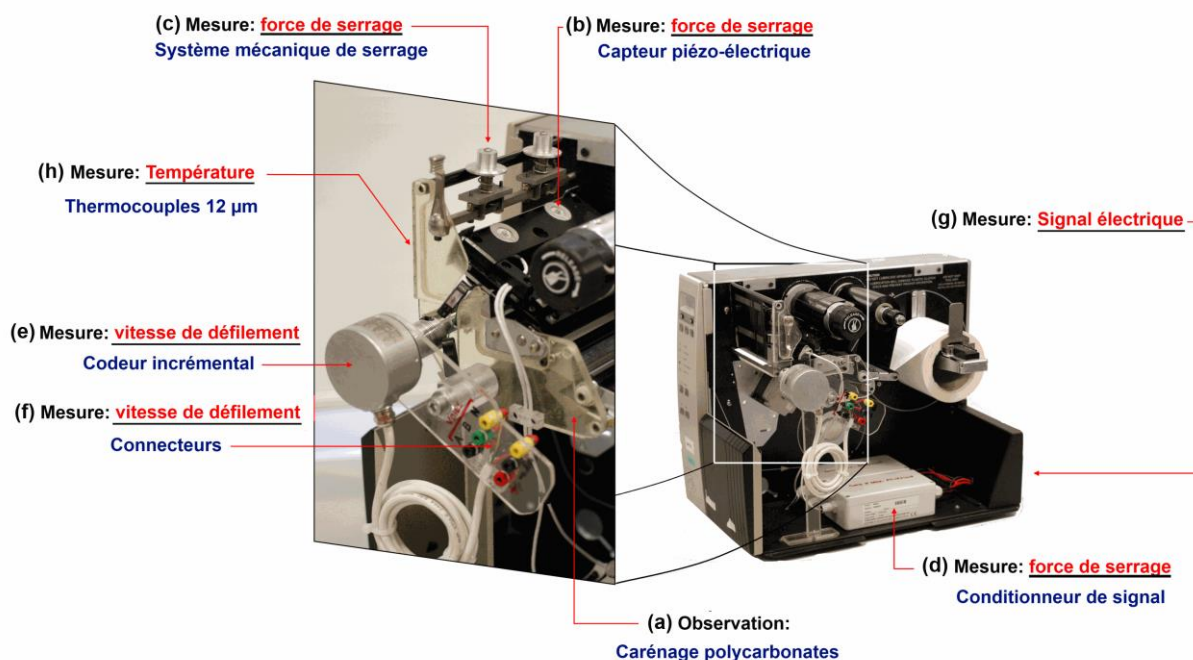


**Figure IV.1 - Synoptique d'étude du chapitre IV**

Les mesures expérimentales relatives à la vitesse de défilement des matériaux, à la force de serrage appliquée sur le dispositif ainsi qu'à la nature du contact entre la tête d'impression et le ruban sont détaillées. Ensuite, nous présentons les résultats de l'instrumentation de la tête d'impression à des fins de collecte d'informations en température. Celles-ci seront réinvesties dans le but de valider le modèle développé. In fine, nous analysons les résultats issus du calcul numérique afin de juger de son potentiel en matière d'acquisition de connaissance.

## IV.2. Instrumentation de l'imprimante

Le système industriel d'impression par transfert thermique a été modifié dans le but de le convertir en outil d'analyse de laboratoire. La Figure IV.2 offre un aperçu des différents équipements installés. Les spécificités de chacun d'entre eux seront détaillées dans la suite de ce chapitre.



**Figure IV.2 - Imprimante modifiée et instrumentée**

Initialement, le système d'impression est recouvert par un carénage métallique cachant le dispositif mécanique. Dans un premier temps, afin de permettre l'observation directe du fonctionnement de l'appareil, nous avons reproduit en partie et installé un carénage transparent en polycarbonate (Figure IV.2 – a). Ensuite, nous avons mesuré la force appliquée sur la tête d'impression grâce à deux capteurs piézo-électriques (Figure IV.2 – b) placés sous le système de serrage (Figure IV.2 - c). Ce dernier a fait l'objet de modifications afin d'en augmenter la stabilité. Les informations collectées par les capteurs sont transmises à un conditionneur (Figure IV.2 - d) puis renvoyées vers la borne de connexion située en face arrière de l'imprimante (non représentée sur la figure). Ensuite, la vitesse a été contrôlée à l'aide d'un codeur incrémental. Celui-ci a été fixé sur l'axe de rotation du cylindre de contre pression (Figure IV.2 - e). Les données sont renvoyées vers la borne de connexion illustrée en Figure IV.2 - f. Enfin, le signal électrique d'excitation des micro-sources de chaleur est mesuré directement en cours de fonctionnement. L'acquisition se fait également en face arrière de l'imprimante (Figure IV.2 – g).

La mesure de la température des dots en cours de fonctionnement fait l'objet d'un traitement à part puisqu'ils ne sont pas installés à demeure sur l'imprimante. Une tête d'impression dédiée a été instrumentée à l'aide de 5 thermocouples de 12  $\mu$ m de diamètre de fil, fixés au centre des dots (Figure IV.2 - h).

## IV.2.1. Mesures non-thermiques

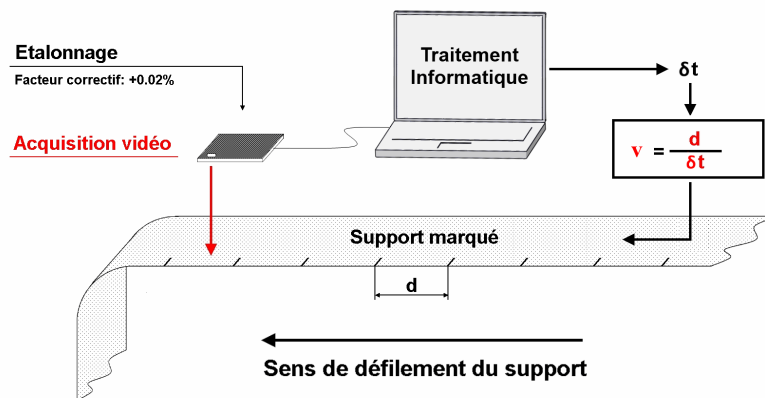
### IV.2.1.1 Vitesse de défilement du support encre

L'objectif de ce travail, est de comprendre le comportement dynamique des rubans et supports afin de maîtriser les hypothèses qui sous-tendent le modèle numérique.

Dans un premier temps, une lecture optique obtenue par caméra est mise en place afin de vérifier l'adéquation entre les vitesses moyennes de défilement du support (ruban et papier) renseignées par le constructeur de l'imprimante et celles opérant réellement. Comme nous avons pu le voir au paragraphe I.2, le couple ruban/support est mû par un moteur « pas à pas » ce qui laisse supposer, en première approche, un déplacement constitué d'une succession d'arrêts/mouvements. Un codeur incrémental a donc été installé sur l'imprimante en vue de déterminer la vitesse instantanée de défilement.

#### IV.2.1.1.a Mesure de la vitesse moyenne de défilement par lecture optique

La Figure IV.3 décrit le banc de mesure mis en place pour déterminer la vitesse moyenne de défilement du support. . Celui-ci a été préalablement marqué à intervalles réguliers d'un trait tous les 10 mètres. Une acquisition vidéo du défilement du papier est ensuite réalisée en sortie de l'imprimante. La séquence post-traitée est décomposée en une succession d'images. Cela permet d'attribuer un temps entre l'apparition de deux marques consécutives et donc de déterminer la vitesse de déplacement du support.



**Figure IV.3 – Description du banc de mesure de la vitesse moyenne de déplacement des rubans et supports**

Les mesures ont été réalisées sur l'ensemble de la gamme de vitesse sélectionnable sur l'imprimante, soit de 60 à 300 mm.s<sup>-1</sup>. Les résultats présentés dans le Tableau IV.1, comparent les valeurs des vitesses fournies par le fabricant et vitesses mesurées. Nous pouvons observer que pour la plus basse vitesse, l'erreur relative est importante puisqu'elle atteint 4.4%. Pour les autres vitesses, allant de 76.2 à 304,8 mm.s<sup>-1</sup>, l'erreur reste faible.

## Modélisation du système d'impression

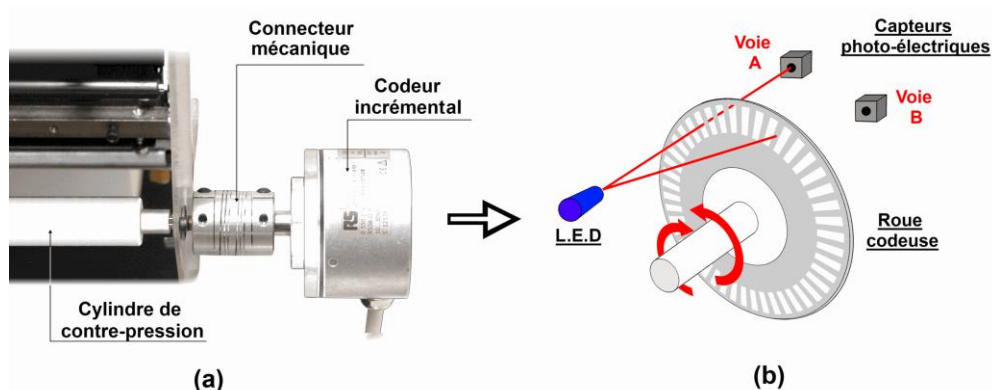
Vitesse affichée inch.s <sup>-1</sup>	2,5	3	4	6	8	12
Vitesse affichée mm.s <sup>-1</sup>	63,5	76,2	101,6	152,4	203,2	304,8
Vitesse mesurée mm.s <sup>-1</sup>	60,7	76,5	102	152,5	202	304,4
Erreur relative %	4,4	-0,4	-0,4	-0,1	0,6	0,1

**Tableau IV.1 – Mesures des vitesses de défilement**

Les informations fournies par le constructeur de l'imprimante apparaissent comme ayant une valeur indicative. Ce résultat nous a convaincu qu'il était nécessaire de caractériser plus finement le comportement dynamique des rubans et supports en instrumentant l'imprimante.

### IV.2.1.1.b Mesure de la vitesse angulaire du cylindre de contre-pression

La mesure de la vitesse instantanée (échelle des microsecondes) a été réalisée par couplage du cylindre de contre-pression à un codeur incrémental. En faisant l'hypothèse simplificatrice qu'il n'y a pas de glissement entre les matériaux défilants et le cylindre de contre-pression, nous pouvons convertir la vitesse angulaire (Rad.s<sup>-1</sup>) de ce dernier, en vitesse linéaire (m.s<sup>-1</sup>) des matériaux en déplacement. La Figure IV.4 décrit le principe de fonctionnement de cet équipement. La rotation de l'axe du cylindre de contre-pression entraîne le déplacement de la roue codeuse équipant le codeur. Celle-ci est constituée d'un disque comportant un nombre défini de fentes. Lorsque le rayon émis par une diode électroluminescente passe devant l'une d'entre elles, un signal électrique est généré. Il permet de déterminer deux fronts, l'un montant, l'autre descendant et d'en déduire la vitesse angulaire de l'axe d'entraînement.



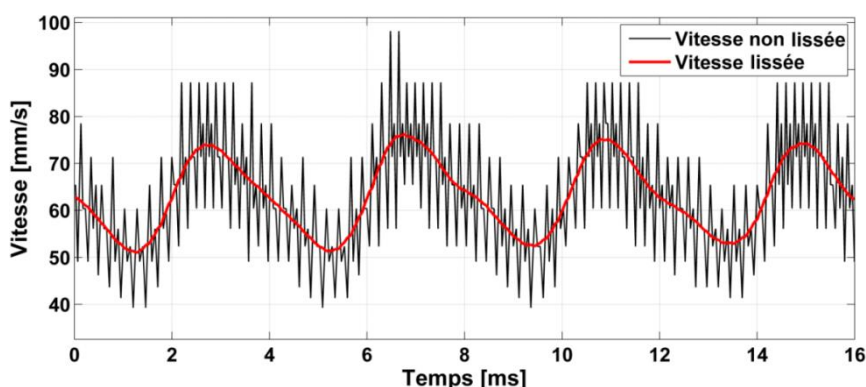
**Figure IV.4 – Montage du codeur incrémental (a) et principe de fonctionnement (b)**

Le codeur incrémental que nous avons utilisé dispose de 5000 fentes transparentes et de deux capteurs lumineux décalés de 90°, permettant ainsi de doubler la précision du dispositif et le cas échéant, de déterminer le sens de rotation de l'axe. La vitesse de défilement des rubans et supports exprimée en mètres par seconde est donnée par l'équation (IV-1).

$$v(t) = \frac{\pi \cdot D}{4 * n * \Delta t} \quad (IV-1)$$

avec  $\Delta t$ , l'intervalle de temps séparant deux fronts du signal électrique renvoyé par le codeur incrémental et D le diamètre du cylindre de contre-pression. La précision de ce dispositif est de  $0,018^\circ$ , ce qui correspond à  $\pi \mu\text{m}$  en déplacement linéaire sur le périmètre du cylindre de contre-pression.

La Figure IV.5 présente le produit du post-traitement des données provenant du codeur incrémental, pour un paramétrage de l'imprimante à la vitesse de 60 mm/s. La courbe noire représente la vitesse avant lissage. La courbe rouge montre la moyenne glissante obtenue sur un intervalle de 700  $\mu\text{s}$ .



**Figure IV.5 – Mesure de la vitesse de défilement des rubans et supports ( $v=60 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )**

Nous pouvons observer que la vitesse oscille autour d'une valeur moyenne de 63 mm/s, avec des minima et des maxima de l'ordre de 50 et 75 mm/s. Ainsi le comportement dynamique des rubans et supports apparaît n'être ni constant, ni constitué d'une suite de créneaux identiques. Nous faisons l'hypothèse que l'inertie du moteur d'entraînement, de même que les multiples jeux mécaniques opérant dans toute la chaîne de transmission génèrent cette oscillation.

Des mesures complémentaires ont montré que l'amplitude de variation diminuait avec l'augmentation de la vitesse. De plus, il est à noter que le calcul de la vitesse dépend de la mesure du diamètre du cylindre de contre pression qui, rappelons-le, est constitué d'une âme en acier et d'un revêtement de caoutchouc de 5 mm (cf. paragraphe I.2.1 Description de l'appareil – cylindre de contre-pression). Le calcul de la vitesse dépend donc de la pression appliquée sur la tête d'impression. En effet, le cylindre de contre-pression non-comprimé a pour diamètre 20 mm soit l'équivalent d'une vitesse moyenne calculée de 63 mm/s. Pour une mesure du diamètre de 19,5 mm, la vitesse moyenne calculée est de 61,5 mm/s. Le modèle numérique du système global, c'est-à-dire intégrant le déplacement des rubans et supports, devra tenir compte de l'incertitude sur cette mesure.

#### IV.2.1.2 Force de serrage

Dans cette partie, on souhaite modifier et instrumenter l'imprimante afin de contrôler et mesurer la force appliquée sur la tête d'impression. Il s'agit par ce biais d'assurer la



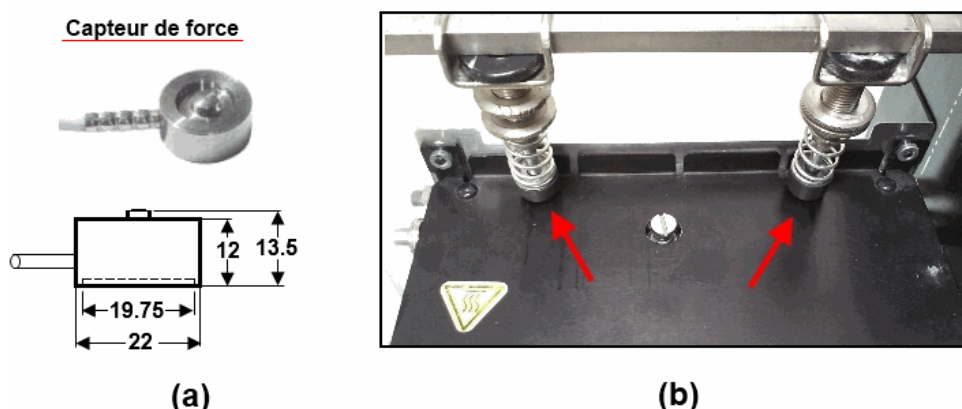
## Modélisation du système d'impression

reproductibilité du réglage en pression de l'imprimante et également, d'observer son influence sur la qualité de l'écriture.

### IV.2.1.2.a Mesure de la force appliquée au système d'impression

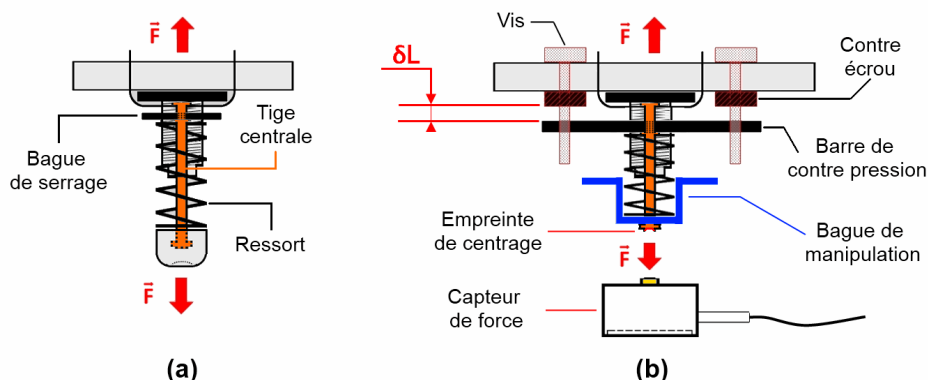
Deux capteurs de type piézoélectrique ont été insérés entre le système de serrage équipant l'imprimante et le support métallique sur lequel vient se fixer la tête d'impression.

La Figure IV.6 présente l'un de ces capteurs ainsi que ses dimensions (Figure IV.6 - a) et la localisation de ceux-ci sur la tête d'impression (Figure IV.6 - b).



**Figure IV.6 – Capteurs de force : description (a) Insertion au-dessus de la tête d'impression (b)**

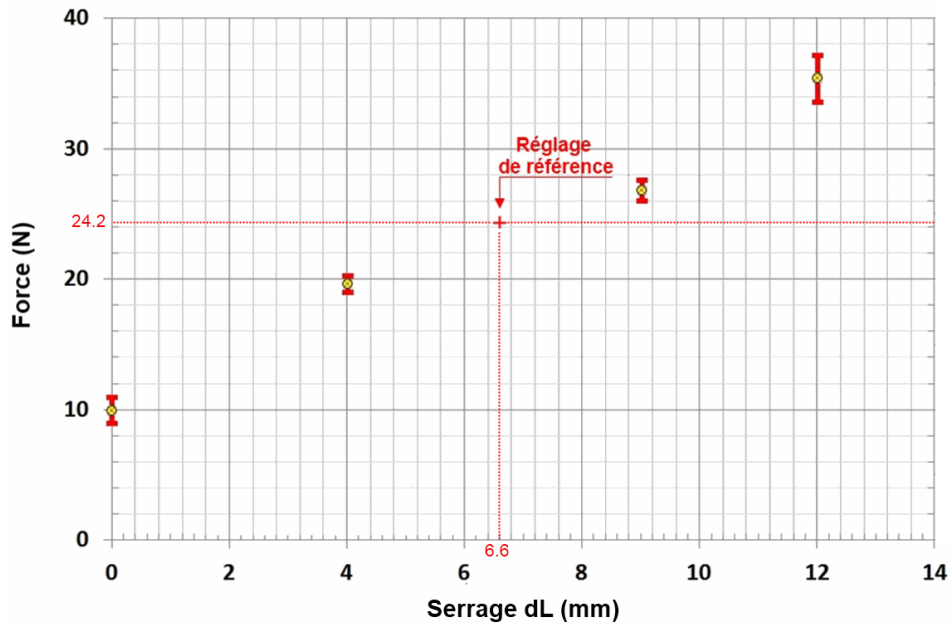
Le système de mise en pression d'origine (Figure IV.7 - a) a été modifié afin d'en stabiliser les réglages. Le système de serrage par bague a été remplacé par un montage à vis. Celui-ci permet un réglage plus fin et reproductible. Le système acquiert ainsi de la stabilité. Ce mécanisme est centré sur le capteur de force par le biais d'une empreinte que nous avons réalisée au bout de la tige centrale (Figure IV.7 - b).



**Figure IV.7 - Système de mise en pression initial (a) et modifié (b)**

Une série de mesure (Figure IV.8) a été effectuée afin de déterminer, en fonction de la longueur d'écrasement du ressort  $\delta L$ , le niveau de la force appliquée sur la tête d'impression. Dans la gamme de variation permise par le dispositif, cette force varie

linéairement de 10N à 38N. La référence que nous avons retenue correspond au réglage réalisé par l'industriel soit 24,2N.



**Figure IV.8 – Évolution de la force appliquée sur la tête d'impression en fonction de la course du ressort**

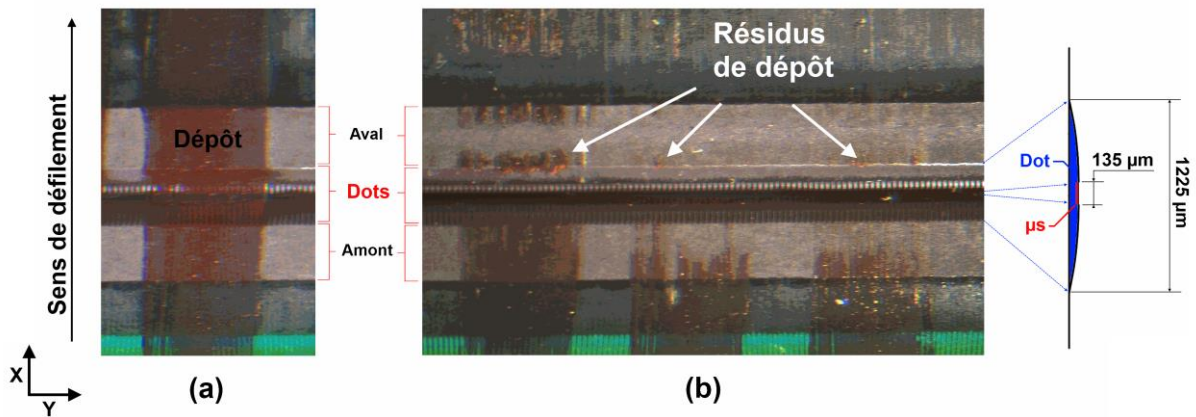
La mesure de la force appliquée sur la tête d'impression nous a amené à nous interroger sur le contact entre la tête d'impression et le ruban. Une expérience a été menée afin d'en déterminer la nature.

#### IV.2.1.2.b Qualité du contact

Afin de tester la qualité du contact dans les conditions de pression de référence, un dépôt encré d'approximativement 1  $\mu\text{m}$  d'épaisseur a été réalisé au niveau des dots sur une tête d'impression neuve (Figure IV.9 – a). Cette encre a ensuite été abrasée par défilement des rubans et supports à la vitesse de 60 mm/s.

La Figure IV.9 – b montre qu'il subsiste au sortir du dot, après abrasion, un résidu d'encre tandis que le reste de sa surface est libéré de toute trace du dépôt initial. Nous pouvons observer également qu'avant le dot, l'intégralité de l'encre n'a pas été retirée, ce qui est le cas dans la partie qui lui succède. Cela suppose qu'il n'y a pas, à cette échelle, uniformité de la pression entre la tête d'impression et le ruban. Nitta et al. dans une étude récente ont mis en avant lors d'un procédé de transfert thermique la dispersion des zones de contact [15].

## Modélisation du système d'impression

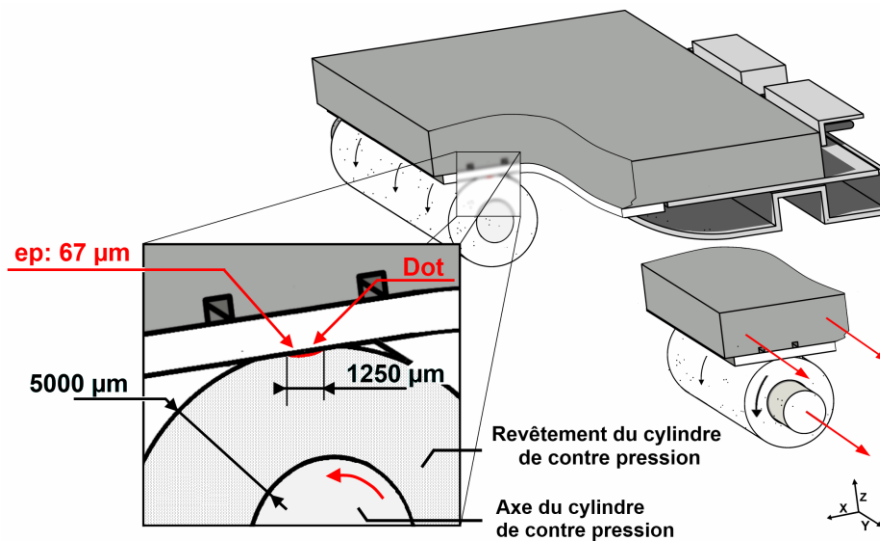


**Figure IV.9 – Contrôle du contact tête d'impression/ruban avant abrasion (a) et après abrasion (b)**

Dans le modèle numérique, cette discontinuité pourrait être traduite par la présence d'une résistance thermique de contact évolutive le long de la frontière entre la tête d'impression et le ruban. Cependant, les incertitudes liées à la valeur de ces résistances et à leur localisation nous ont amenés, en première approche, à considérer dans le modèle numérique un contact parfait entre les différentes couches.

### IV.2.2. Mesures thermiques

L'instrumentation thermique décrite dans cette partie présente le double objectif de mesurer les températures à la surface des micro-sources de chaleur, ainsi que de collecter des informations plus générales sur le comportement thermique de la tête d'impression en condition de process. Sur la Figure IV.10, nous pouvons voir que dans ce cas, le ruban et le support sont enserrés entre d'un côté, la tête d'impression et de l'autre, le revêtement du cylindre de contre-pression. Sous l'effet du serrage, ce dernier se déforme et épouse la forme des dots. Il entre également en contact avec la plaque d'alumine comme le montre les essais d'abrasion décrits au paragraphe IV.2.1.2.b.

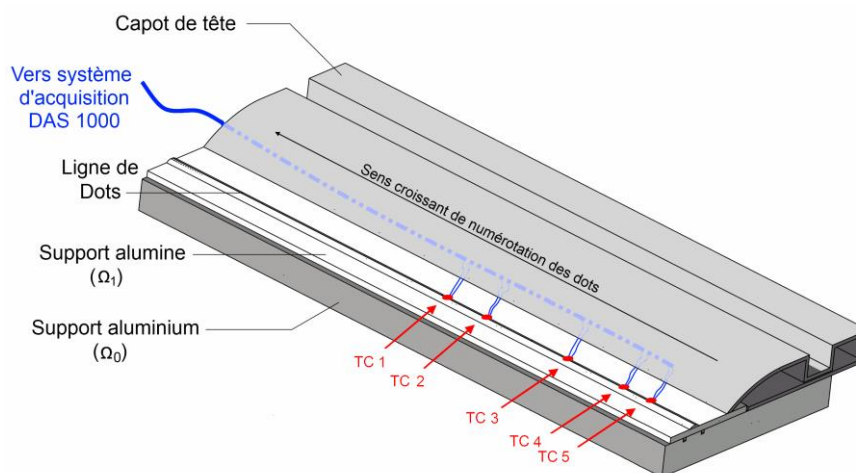


**Figure IV.10 – Illustration de l'encapsulation de la micro-source**

Dans ces conditions, nous voyons qu'il n'est pas possible de recourir à des méthodes de mesure des températures sans contact, sans s'éloigner des conditions de fonctionnement industriel. Ces mesures ont donc été obtenues par une méthode intrusive réalisée à l'aide de thermocouples. Les informations recueillies permettront ultérieurement, de comparer le modèle numérique bidimensionnel présenté au paragraphe IV.4 avec les mesures expérimentales.

La tête d'impression a été équipée au laboratoire de cinq thermocouples de type K de diamètre de fil 12  $\mu\text{m}$  (Figure IV.11), positionnés en surface des dots, au centre des micro-sources de chaleur. Les capteurs ont été fixés à l'aide d'un vernis thermo conducteur afin de résister au frottement du ruban en déplacement. Les thermocouples ont été fabriqués au laboratoire, par décharge capacitive, les deux fils étant croisés. Les données ont été acquises à partir d'un enregistreur SEFRAM DAS 1000 à raison d'une mesure toutes les 5  $\mu\text{s}$ . Sur la Figure IV.11, nous pouvons observer la localisation des thermocouples sur la tête d'impression ainsi que le passage de dégagement des fils sous le capot de la tête d'impression.

La sous face de la plaque d'alumine  $\Omega_1$ , le support en aluminium  $\Omega_0$ , ainsi que la surface du cylindre de contrepression ont également été instrumentés avec des thermocouples de type K de diamètre de fil 100  $\mu\text{m}$ . Cependant, les informations en température qu'ils ont permis de recueillir ne présentant pas d'intérêt majeur, nous avons rejeté la présentation de leur instrumentation et des résultats qui en découlent en Annexe 5.

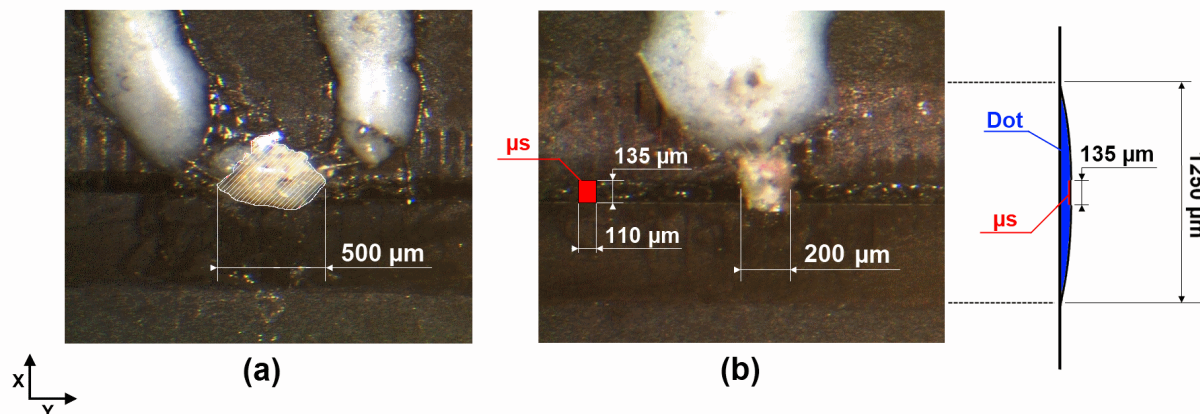


**Figure IV.11 - Schéma d'instrumentation des dots à l'aide de micro-thermocouples**

Comme le montre la Figure IV.12, outre les difficultés inhérentes à la manipulation de thermocouples de 12  $\mu\text{m}$ , les contraintes principales de cette instrumentation ont tenu à la maîtrise du collage. Les Figure IV.12 a et b, montrent au travers de l'instrumentation des thermocouples respectivement numérotés deux et cinq, la variabilité de la quantité de colle déposée ainsi que de son étalement sur les dots. Pour le premier la dimension caractéristique correspondant à la mesure de la longueur de fixateur dans le sens des X, est de 500  $\mu\text{m}$  tandis que pour le second, elle est de 200  $\mu\text{m}$ . Nous pouvons également observer que dans ces deux cas, le fixateur recouvre toute la surface des micro-sources de chaleur (100 x 135  $\mu\text{m}^2$ ) et au-delà. Ainsi, malgré tout le soin apporté à cette étape de

## Modélisation du système d'impression

l'instrumentation, nous pouvons affirmer que la perturbation thermique engendrée par l'intrusion des capteurs sera accrue par le volume de fixateur utilisé pour les maintenir dans la position voulue.



**Figure IV.12 – Fixation des thermocouples numéro 2 (a) et 5 (b)**

Le Tableau IV.2 donne la position de chacun des thermocouples ainsi qu'une mesure dimensionnelle, caractéristique du dépôt de liant, dans le sens perpendiculaire à la direction de déplacement des rubans et supports. Ces mesures montrent les difficultés de reproductibilité de l'instrumentation. Les positions de thermocouples sont données par rapport aux numéros d'identification des micro-sources sur lesquelles ils sont fixés.

Thermocouple	TC 1	TC 2	TC 3	TC 4	TC 5
N° de micro-source	394/864	374/864	239/864	119/864	59/864
Dimension caractéristique du fixateur [µm]	300	500	250	200	200

**Tableau IV.2 – Position des thermocouples de surface et dimension caractéristique**

## IV.3. Expérimentation

Dans le second chapitre, nous avons validé le modèle thermique de la tête d'impression à partir d'un motif de référence constitué d'un trait de 1 mm d'épaisseur. L'objectif que nous nous étions fixés était de reproduire le comportement thermique de la source de chaleur afin de l'intégrer dans un modèle plus global tenant compte de la présence et du déplacement des rubans et supports d'impression.

Dans la suite de ces travaux, un motif de référence plus complexe est considéré afin de représenter un code à barres (CaB) artificiel. Ce motif n'est pas destiné à restituer une information cryptée et ne répond à aucune des normes internationales en vigueur. Il a pour but de permettre l'analyse thermique du système. Le choix qui aurait pu être fait de considérer un CaB réel, n'aurait pas permis de contrôler l'épaisseur des différents traits. En effet l'un de nos objectifs est de générer virtuellement des défauts observés dans la réalité,

afin d'en étudier les paramètres précurseurs. Or, le coût en termes de temps de calcul numérique est tel, que notre intérêt est de limiter la longueur totale du motif de référence, tout en permettant une exploitation adéquate du modèle. Ce motif doit permettre également de réaliser en conditions de déplacement simulé, une analyse de sensibilité aux paramètres de l'imprimante et de la tête d'impression et bien sûr, aux paramètres maîtrisés par l'industriel fabricant le ruban.

### IV.3.1. Description du code à barres de référence

#### IV.3.1.1 Structure

En préambule, bien qu'il ne soit pas cryptant, nous continuerons par raison de commodité, à parler du schéma mentionné comme d'un code à barres.

La Figure IV.13 présente l'architecture du motif retenu. Il est constitué d'une succession de traits numérotés de un à quinze, pour une longueur totale de dix millimètres. Ce code à barres est donc obtenu à partir de 80 cycles d'excitation des micro-sources de chaleur. Il est fondé sur un motif de base, autrement dit un trait, de 250  $\mu\text{m}$  de longueur (Figure IV.13 - a). Les intervalles minimum séparant deux de ces traits sont d'une longueur équivalente (Figure IV.13 - b). Nous les désignerons, entre le trait  $n$  et  $n+1$ , par la notation  $n^*$  (Figure IV.13 - c). Les différents éléments du schéma retenu sont des multiples de ces unités de base. La Figure IV.13 présente conjointement au motif, le signal électrique équivalent généré par la carte électronique de l'imprimante, pour une vitesse de  $60 \text{ mm.s}^{-1}$  et un  $I_E = 12^5$ . Nous pouvons observer qu'un trait unitaire, par exemple le trait numéro 15 (Figure IV.13 - d), est le produit de deux créneaux  $cr$ , constitués, dans ce cas précis, des sous parties  $cr_{79,1}$  à  $cr_{79,3}$  pour le premier d'entre eux et de  $cr_{80,1}$  et  $cr_{80,2}$  pour le second. Pour l'Indice Énergétique considéré, cette architecture du signal électrique est valable quelle que soit la vitesse paramétrée. La distinction d'un signal à un autre tiendra à la durée des cycles le constituant, ainsi qu'au niveau de puissance suppléé à la tête d'impression.

---

<sup>5</sup> Cette valeur d'Indice Énergétique a été obtenue dans les conditions de serrage de référence soit 24.2 N (cf. §. IV.2.1.2.a). Ce paramétrage permet l'obtention d'une impression optimale à la vitesse de  $60 \text{ mm.s}^{-1}$ .

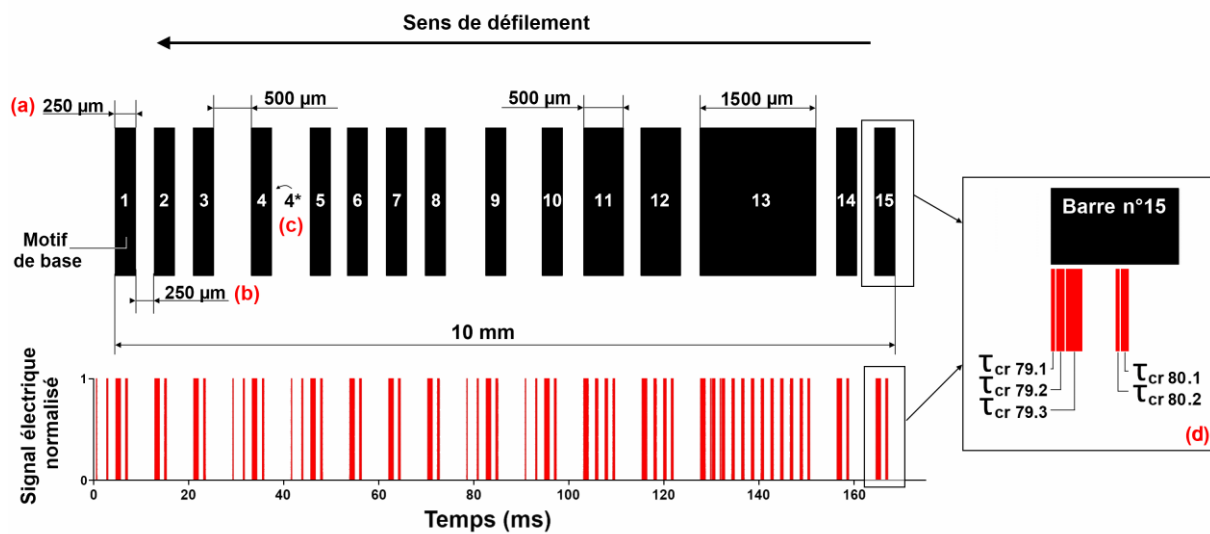


Figure IV.13 - Code à barres de référence et signal électrique associé

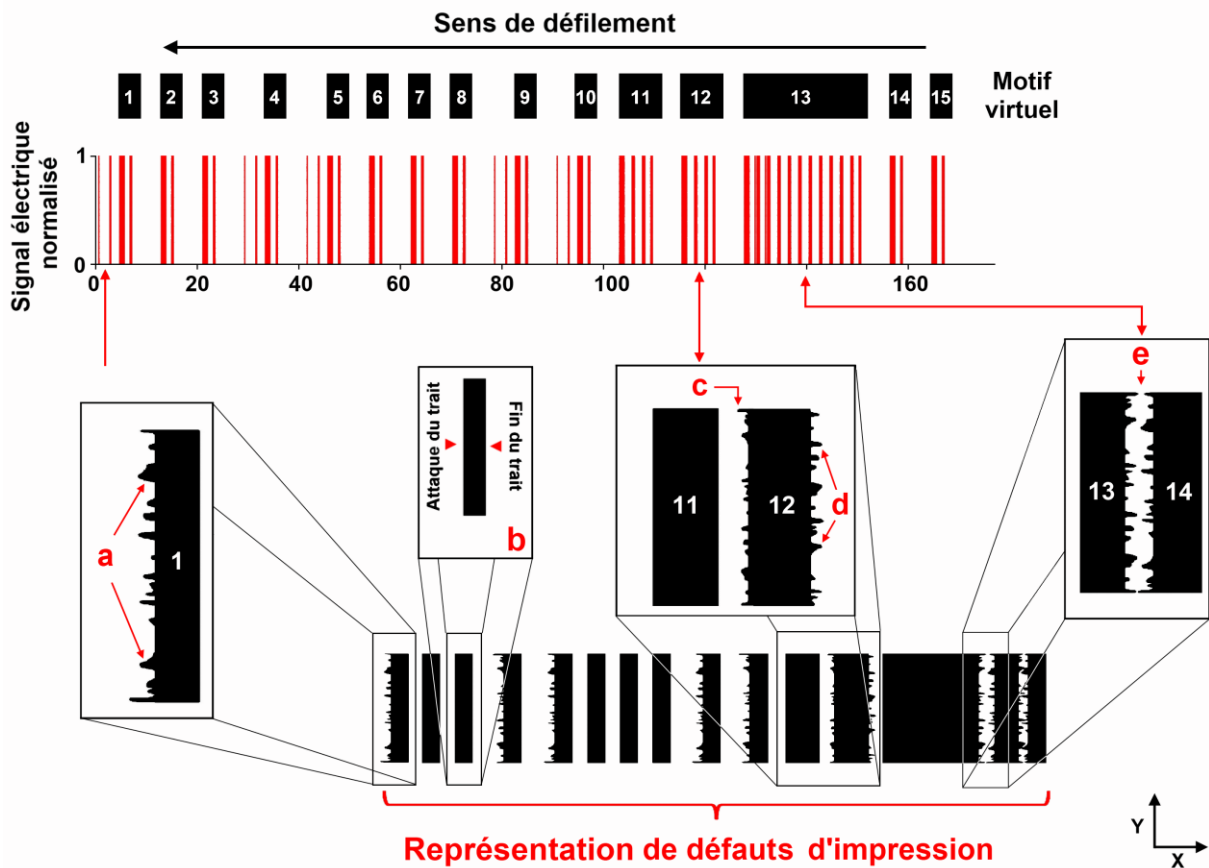
#### IV.3.1.2 Objectifs des différents motifs

La Figure IV.14 présente une synthèse des défauts que l'on souhaite reproduire virtuellement par modélisation numérique. Le CaB que nous avons adopté a été choisi de sorte à maximiser les contextes d'impression dans lequel ils apparaissent, en un minimum de longueur.

Ainsi, le code à barres présenté doit permettre d'étudier l'effet de la structure du signal électrique et notamment l'effet des créneaux de préchauffage (Figure IV.14). Nous pouvons observer que ceux-ci apparaissent en amont des traits 1, 4, 5, 9 et 10. Ils apparaissent lorsqu'un intervalle est constitué de deux unités de base. Leur répétition va nous permettre de tester si la sensibilité du modèle à ce signal évolue dans le temps, avec le chargement thermique du dot. Ces créneaux doivent permettre également d'étudier s'ils peuvent être responsables de l'anticipation de l'attaque des traits (Figure IV.14 - b) décrite en Figure IV.14 - a, qui apparaît comme étant une bavure précédant la marque désirée.

Le motif créé doit permettre également d'étudier quelle peut être l'influence thermique d'un trait sur un autre. Dans ce but, des marques successives générées par des créneaux énergétiques identiques ont été introduites (6, 7 et 8 ainsi que 11 et 12). Les trois premières ont pour but d'observer s'il y a évolution des traits virtuels tracés. Les deux secondes, d'une durée correspondant à deux unités de base, doivent permettre de vérifier s'il y a anticipation de l'inscription obtenue (Figure IV.14 - c) et également s'il y a apparition de bavure (Figure IV.14 - d).

Enfin, nous avons inséré dans le motif un trait « fort », de 1,5 mm de longueur (n°13). L'objectif de celui-ci est de forcer le chargement thermique du système et d'étudier son influence sur l'intervalle suivant (Figure IV.14 - e), notamment du point de vue du comblement de celui-ci. Dans ce but et afin de favoriser l'apparition d'un défaut, ce dernier a été limité à une unité de base.



**Figure IV.14 - Descriptif des défauts d'impression virtuelle attendus**

Le modèle numérique dans lequel va être implémenté le signal électrique générateur du CaB présenté est, rappelons-le, bidimensionnel, porté par le plan XZ (Figure I 18 – Modèle de source 2D – Plan de coupe). Un tel modèle n'est donc théoriquement pas en mesure de reproduire des effets apparaissant dans le plan XY. La méthode que nous utiliserons pour nous affranchir des limites de ce modèle sera développée dans le Chapitre IV.

Des mesures expérimentales ont donc été réalisées lors de l'impression du CaB de référence. Plusieurs configurations d'impression (variations de la vitesse d'impression et de l'indice énergétique) ont été testées afin de constituer une base de résultats expérimentaux comparables au calcul numérique.

#### IV.3.2. Répétabilité et reproductibilité des mesures de température

Dans cette partie, nous nous intéressons à la répétabilité et à la reproductibilité des mesures effectuées à l'aide des thermocouples instrumentés sur les dots. Cette étude a été obtenue à partir de cinq essais. Tous ont été réalisés dans des conditions expérimentales équivalentes :

- Toutes les micros sources de chaleur ont été excitées simultanément, ce qui garantit le même apport de chaleur à chaque capteur.
- Le même motif (CaB) de référence a été utilisé à chaque essai.
- Les mesures ont été réalisées en présence des rubans et supports, dans un contexte de non défilement afin d'éviter une sollicitation trop importante des



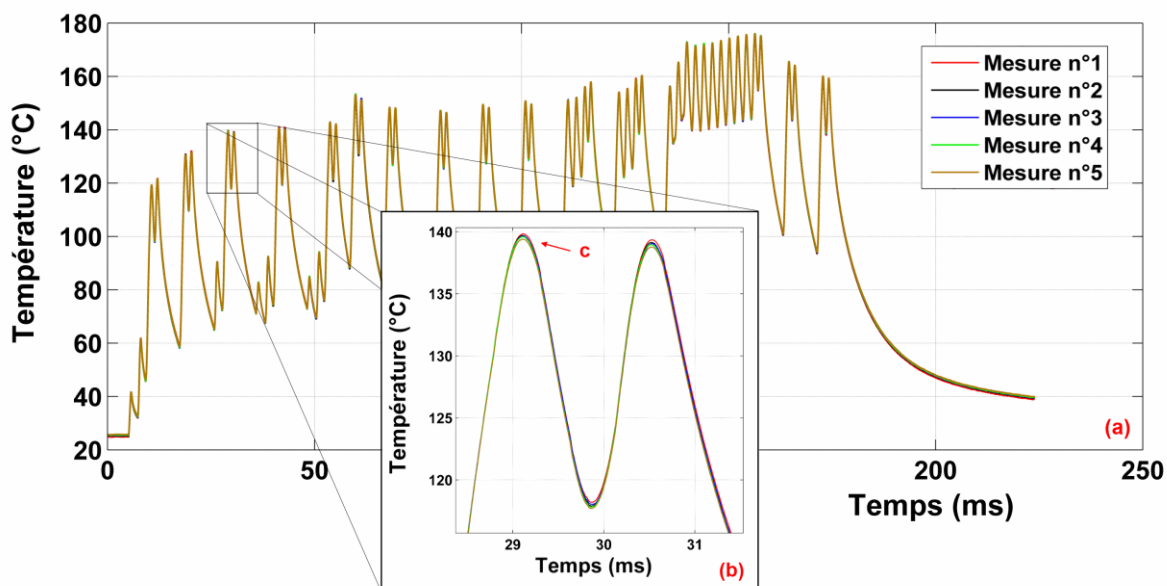
## Modélisation du système d'impression

thermocouples. L'indice énergétique considéré a été fixé à une valeur de 12. La force appliquée sur la tête d'impression a été fixée au niveau de référence (cf. § IV.3.1.2).

- Un temps de repos de 5 mn a été respecté entre chaque mesure afin de permettre le retour de la température de la tête d'impression au niveau prévalent au début de la première d'entre elles. Toutes les mesures ont été réalisées au cours d'une seule et même campagne.
- Les mesures ont été enregistrées sur un appareil DAS 1000, paramétré de manière identique pour chaque essai.
- Les paramètres environnementaux sont considérés constants du fait de l'encapsulation du système, d'où l'absence de phénomènes convectifs.

### IV.3.2.1 Répétabilité

La Figure IV.15 présente les résultats de l'analyse de répétabilité obtenus à partir du thermocouple numéro 3. Nous constatons sur la Figure IV.15 – a, ainsi que sur l'agrandissement présenté par la Figure IV.15 –b, que les cinq thermo-grammes obtenus sont superposables. Par exemple, au niveau du pic de température atteint lors de l'écriture du trait numéro 3 (Figure IV.15 - c), l'écart maximum par rapport à la moyenne obtenue à partir de cinq répétitions, n'excède pas 0,2°C. Pour les mesures 1 à 5, les écarts types calculés en fonction du temps sont compris entre 0,025 et 0,5°C pour une moyenne de 0,26°C. L'écart de température maximal par rapport à la moyenne est, quant à lui, de 0,78°C. Cela montre, pour cet exemple, la bonne répétabilité des mesures.



**Figure IV.15 - Répétabilité des mesures de température du thermocouple n°3**

Sur l'ensemble des thermocouples équipant les micro-sources de la tête d'impression, les résultats sont similaires (Tableau IV.3) excepté pour le numéro 4, qui montre une stabilité de la mesure d'un essai sur l'autre, plus faible. La moyenne des écarts type calculée en fonction

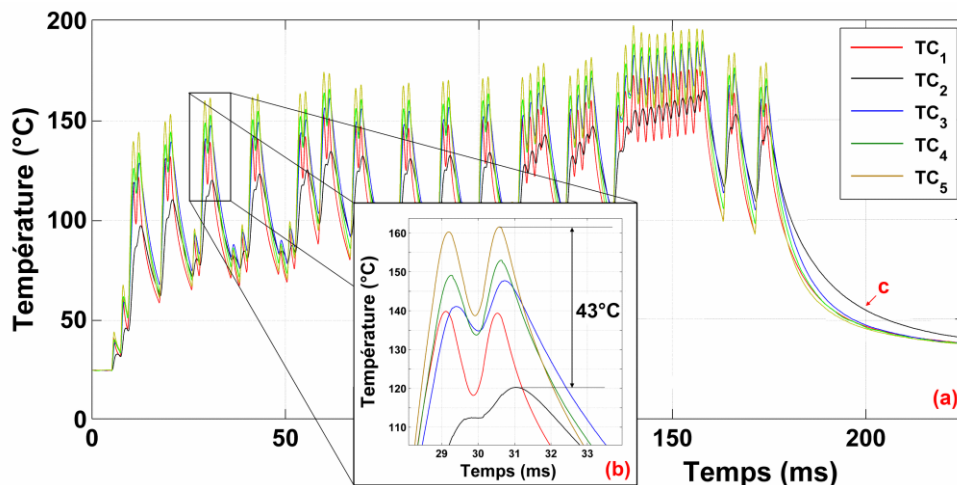
des différents capteurs est comprise entre 0,26 et 1,06°C, tandis que l'erreur absolue maximale par rapport à la moyenne des températures s'étale de 0,77 à 2,41°C.

	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5
<b>Moyenne des écarts types</b>	0,26	0,44	0,26	1,06	0,29
<b>Erreur absolue maximale par rapport à la moyenne</b>	0,77	1,71	1,21	2,41	1,23

**Tableau IV.3 – Synthèse de l'analyse de répétabilité des mesures de température**

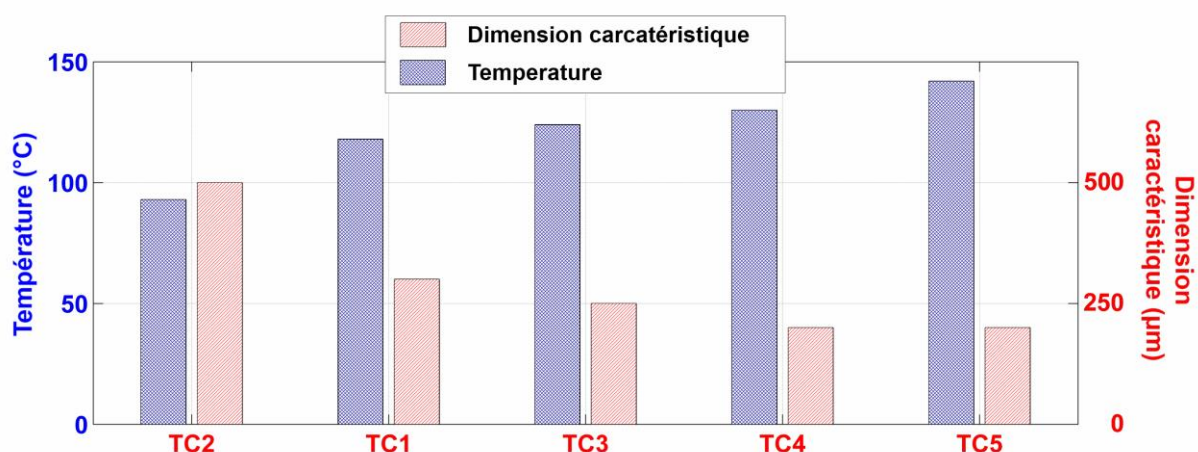
#### IV.3.2.2 Reproductibilité

Une analyse de reproductibilité des mesures a été menée. Nous comparons la réponse thermique des différents capteurs lors de l'excitation du système. La Figure IV.16 présente les résultats obtenus. Nous constatons d'emblée une forte variabilité de la réponse renvoyée par les thermocouples (Figure IV.16 - a). L'agrandissement présenté en b permet d'apprécier, pour le trait numéro 3, les différences de température d'un capteur à l'autre. La variation maximale observée dans ce cas, soit entre les thermocouples deux et cinq, est de 43°C. Nous pouvons également observer que, au-delà des niveaux de température, le comportement thermique des capteurs affiche des différences. La Figure IV.16 – c, par exemple, montre que l'un des thermocouples refroidit de façon moins rapide que les autres. Sur l'ensemble des signaux recueillis, les écarts types calculés en fonction du temps sont compris entre 0,4 et 23,7°C pour une moyenne de 8°C. L'écart de température maximal observé par rapport à la moyenne est, quant à lui, de 38°C.



**Figure IV.16 - Reproductibilité des mesures de température – Essai n°1**

Le Figure IV.16 montre le lien direct qui existe entre la qualité de l'instrumentation et la réponse en température des thermocouples (cf. Tableau IV.4). La température maximale, représentée en bleu, atteinte par les thermocouples lors du tracé du motif de référence, diminue à mesure que la dimension caractéristique de l'instrumentation correspondante augmente (barres rouges).



**Tableau IV.4 – Dimension caractéristique des thermocouples et température maximale**

Ce constat peut être lié à plusieurs facteurs. En premier lieu, nous pouvons penser à l'inertie thermique apportée par le liant utilisé pour fixer les thermocouples sur la tête d'impression. Compte tenu des faibles dimensions mises en jeu, la quantité de colle déposée ne pouvait pas être contrôlée finement entraînant des variations de la réponse des différents capteurs. De plus, nous ne pouvons pas, malgré tout le soin apporté à l'instrumentation, garantir le centrage des thermocouples sur les micro-sources de chaleur tant dans le sens des X que des Y. Or, nous avons vu précédemment qu'il n'y avait pas uniformité des températures en surface des sources de chaleur (cf. Figure III-13). Enfin, nous ne pouvons pas assurer que le contact des thermocouples avec la surface des dots est identique de l'un à l'autre. Il peut exister des inclusions d'air, une épaisseur de colle entre le capteur et la surface à mesurer, des irrégularités volumiques du thermocouple, autant de facteurs qui généreront une modification aussi bien du flux de chaleur provenant de la source que du signal thermique recueilli. Pour ces raisons, nous avons choisi de travailler, dans la suite de nos travaux, à partir du thermocouple n°5, dans la mesure où c'est celui qui offre la sensibilité la plus élevée.

### IV.3.3. Résultats expérimentaux

Dans cette partie, nous détaillons le résultat de la mesure de la température au centre d'un dot, dans les conditions d'utilisation industrielle de l'imprimante, pour le tracé du CaB de référence. Les paramètres expérimentaux retenus sont les suivants :

- La force de serrage a été fixée au niveau déterminé au paragraphe IV.2.1.2.a.
- Les mesures ont été réalisées en présence des rubans et supports d'impression.
- La vitesse de défilement a été fixée à  $v = 60, 150$  et  $300 \text{ mm.s}^{-1}$  et l'indice énergétique à  $I_E = 15$ .

#### IV.3.3.1 Analyse d'un thermo gramme issu d'une mesure à la vitesse de $60 \text{ mm.s}^{-1}$

La Figure IV.17 présente les températures mesurées à la vitesse de  $60 \text{ mm.s}^{-1}$  ainsi que le signal électrique correspondant. Pour faciliter la lecture de ce dernier, une représentation du

code à barres souhaité, a été insérée dans la Figure IV.17 - b, au bas du signal. Celui-ci est constitué des créneaux destinés à provoquer la fusion de l'encre, ainsi que de sept groupes d'impulsions de préchauffage notées en bleu de Pc1 à Pc7, intervenant avant les traits 1, 4, 5, 8, 9, 10 et 11. Dans le cadre noté i, nous pouvons observer que les créneaux 62 et 63 sont uniquement constitués de leur sous-parties 1 et 3.

La durée totale de la mesure est de 220 ms. Au cours de ce temps, le système passe de la température du local expérimental soit environ 24°C, à la température maximale de 160 °C, atteinte au bout de 135 ms. Entre deux traits consécutifs, aucun signal n'est envoyé et la température diminue d'environ 70°C.

D'emblée, nous pouvons observer que le capteur restitue tous les évènements thermiques potentiels, portés par le signal électrique. L'effet des créneaux de préchauffage décrits précédemment est observable sur le thermo gramme (Figure IV.17 – partie de la courbe bleue). Ils provoquent une augmentation de la température en surface des dots, de l'ordre de 15 à 30°C. Lorsque le préchauffage est constitué de 2 créneaux tels que c'est le cas pour Pc1, Pc2 et Pc4, nous retrouvons nettement les deux pics thermiques correspondants. De la même manière, nous avons vu précédemment que l'écriture d'un trait unitaire requerrait deux créneaux (Figure IV.17 – b – ii). L'effet de ceux-ci est transcrit thermiquement comme le montre, pour le trait n°2, la Figure IV.17 – a – ii. La variation de température observée entre un maximum et un minimum, dans ce cas, est de l'ordre de 25°C. Enfin, le capteur mesure des évènements plus fins tels que ceux décrits dans la partie b – i, de la Figure IV.17. Si l'on considère les créneaux 62 et 63, nous remarquons l'absence d'excitation électrique, correspondant aux sous créneaux  $cr_{62.2}$  et  $cr_{63.2}$ . Cette architecture se manifeste sur le thermo-gramme par une rupture de l'augmentation de la température mesurée, lors de l'inscription théorique du trait n°13 (Figure IV.17 – a – i). Cette analyse montre que les thermocouples de 12  $\mu\text{m}$  bien qu'étant fortement intrusifs, permettent de révéler tous les évènements potentiellement portés par le signal électrique.

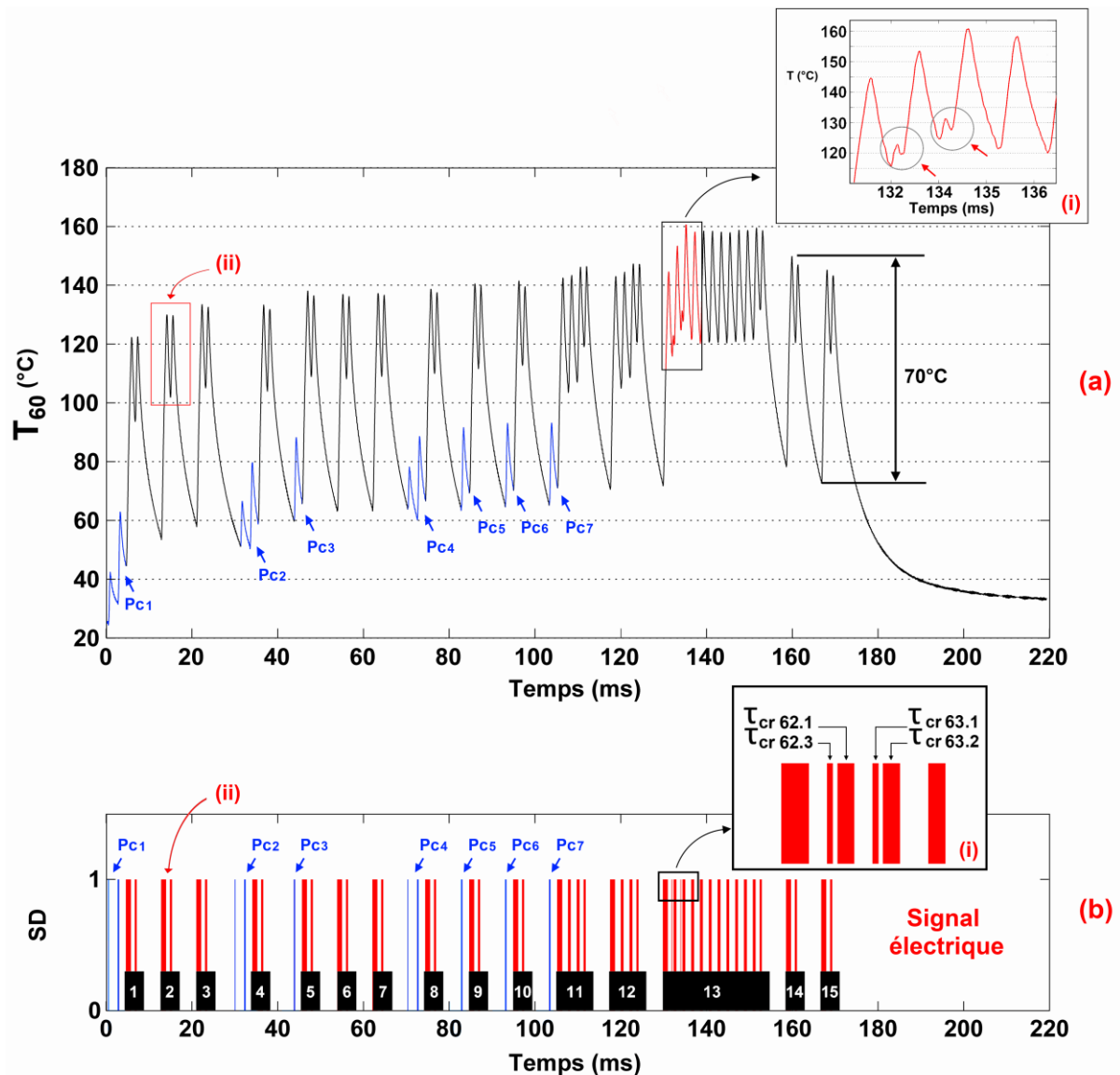


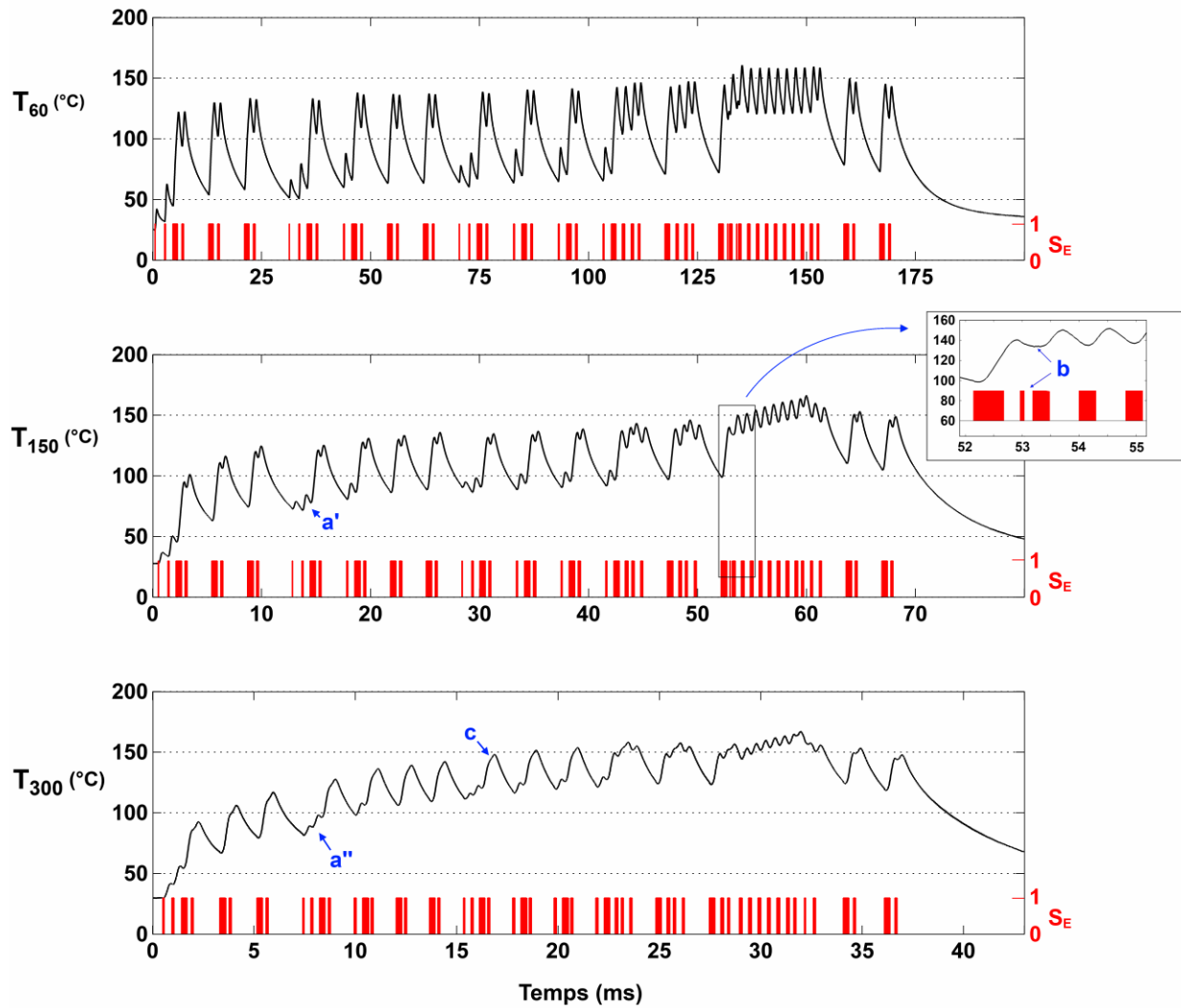
Figure IV.17 – Mesure par thermocouple en condition de défilement  
( $v=60 \text{ mm.s}^{-1} - I_E=15$ )

#### IV.3.3.2 Influence de la vitesse d'impression

L'effet inertiel du capteur et de la colle augmente pour des vitesses croissantes. La Figure IV.18 présente les thermo grammes issus des mesures réalisées à 60, 150 et 300  $\text{mm.s}^{-1}$ , pour un indice énergétique constant  $I_E = 15$ . L'architecture des signaux électriques normalisés correspondant est insérée au bas de chacun des graphiques.

Nous constatons que, pour les trois vitesses testées la température maximale atteinte est du même ordre, soit 160°C. En effet, le raccourcissement des temps de cycle avec l'augmentation de la vitesse est compensé par une puissance injectée plus élevée. Nous observons également que pour des vitesses croissantes, les capteurs perdent de leur sensibilité. L'effet des créneaux de préchauffage est moins bien transcrit par les thermocouples, comme le montrent les Figure IV.18 – a' et Figure IV.18 – a''. À 300  $\text{mm.s}^{-1}$ ,

ces signaux sont moins perceptibles et apparaissent plus comme des ruptures de pente de la montée en température du système, que comme des événements thermiques à part entière. De plus, des événements du signal électriques qui étaient clairement visibles sur les thermo-grammes obtenus à  $60 \text{ mm.s}^{-1}$ , ne sont plus perceptibles dès  $150 \text{ mm.s}^{-1}$  (Figure IV.18 - b). Enfin, nous constatons qu'à  $300 \text{ mm.s}^{-1}$ , les deux créneaux nécessaires à l'impression d'un trait unitaire ne sont plus distingués thermiquement (Figure IV.18 - c).



**Figure IV.18 – Thermo-grammes comparés pour trois vitesses ( $v = 60, 150$  et  $300 \text{ mm.s}^{-1}$ ) –  $I_E 15$**

### **Conclusion**

Les mesures de températures de surface, réalisées sur l'axe du centre des micro-sources de chaleur, amènent à plusieurs commentaires. Malgré tout le soin apporté à cette étape d'instrumentation, pour garantir un contact optimal entre le capteur et son support, on observe une variation de la réponse en température mesurée par les thermocouples. La mesure est perturbée par la présence de résistances thermiques de contact, qui entraîne une modification des flux de chaleur dans le dot et par l'inertie propre au capteur. Quand bien même aurions-nous minimisé la quantité de colle utilisée et maximisé le contact entre le capteur et la surface du dot, la perturbation du flux de chaleur par macro-constriction aurait entaché d'erreur, d'un point de vue quantitatif, la mesure des températures obtenues [42].

Néanmoins, malgré ces limites, nous avons vu que le capteur le plus sensible ( $TC_5$ ) était en mesure de restituer tous les événements portés par le signal électrique délivré au système, au moins pour la vitesse la plus faible ( $v = 60 \text{ mm.s}^{-1}$ ). Ces mesures vont être réinvesties dans la suite de ces travaux afin de valider le comportement thermique du modèle numérique intégrant les rubans et supports en défilement.

## **IV.4. Modélisation numérique 2D**

Il s'agit ici de développer un modèle thermique bidimensionnel de l'ensemble du système d'impression. L'objectif de celui-ci est de prédire le comportement thermique de la tête d'impression et du support encré et de mener une analyse de sensibilité du modèle aux paramètres maîtrisés par l'industriel fabriquant le ruban. De plus, les températures calculées par celui-ci sont appelées à être réinvesties dans un programme de simulation virtuelle de code à barres (Chapitre V).

### **IV.4.1. Modèle numérique**

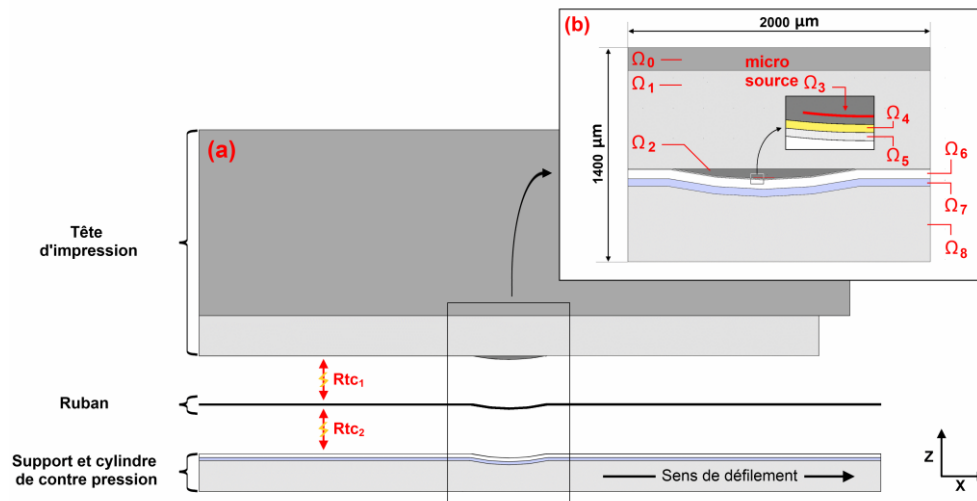
#### **IV.4.1.1 Géométrie et matériaux**

Le modèle numérique bidimensionnel du système global que nous avons développé intègre celui de la micro-source que nous avons décrit au Chapitre III. À ce dernier, sont ajoutés les couches représentatives des rubans et supports d'impression, ainsi qu'une partie du revêtement du cylindre de contre-pression (Figure IV.19 - a).

Afin de diminuer les temps de calcul, le modèle a été réduit à l'environnement proche de la micro-source (Figure IV.19 - b). Une analyse de sensibilité aux conditions aux frontières de ces nouveaux domaines, sera développée plus loin. De plus ce modèle intègre la possibilité d'introduire des résistances thermiques de contact aux interfaces entre la tête d'impression et le ruban ( $Rtc_1$ ) et entre le ruban et le support papier ( $Rtc_2$ ).

En outre, nous pouvons remarquer que le domaine relatif au dos du ruban n'est pas décrit dans la Figure IV.19 - b. En effet, compte tenu de sa faible épaisseur, de l'ordre de 100 nm, son intégration au modèle aurait entraîné un accroissement important du nombre de degrés de liberté et donc un coût en termes de temps de calcul, élevé. Compte tenu du fait que ses

propriétés thermo-physiques sont proches de celle du PET, nous assumons la simplification consistant à intégrer le dos à ce dernier, en augmentant d'autant son épaisseur.



**Figure IV.19 – Modèle numérique global**

Les dimensions et propriétés thermiques attribuées aux différents domaines du modèle sont rappelées dans le Tableau IV.5.

Groupe	Domaine	Description	Épaisseur (µm)	$\lambda$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	Cp (J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	$\rho$ (kg.m <sup>-3</sup> )
Tête d'impression	$\Omega_0$	Support aluminium	150	240	900	2700
	$\Omega_1$	Support Alumine	650	18	880	3690
	$\Omega_2$	Dot	67	1,4	835	2225
Ruban	$\Omega_4$	PET	4.6	0.14	$f(T)$	1040
	$\Omega_5$	Encre	4	0.36	$f(T)$	1010
Support d'impression et cylindre de contre-pression	$\Omega_6$	Papier	50	0.09	1340	1160
	$\Omega_7$	Liner	60	0.12	1340	1380
	$\Omega_8$	Caoutchouc	500	0.13	1100	2010

**Tableau IV.5 – Propriétés thermiques des matériaux constitutifs du modèle numérique**

#### IV.4.1.2 Équations

Le transfert de chaleur opéré lors du processus d'impression est régi dans les parties fixes du dispositif, par l'équation suivante:

$$(\rho C_p)_k \frac{\partial T_k}{\partial t} = \lambda_k \Delta T_k + Q_k(t) \quad (k = 0:3) \quad (IV-2)$$



### Modélisation du système d'impression

Dans les parties mobiles du système, à savoir le ruban, le support d'impression ainsi que le revêtement du cylindre de contre pression, un terme advectif  $\vec{v} \cdot \nabla T_{ti,k}$  est introduit, afin de modéliser le déplacement de la matière. L'équation de la chaleur devient :

$$(\rho C_p)_k \frac{\partial T_k}{\partial t} + (\rho C_p)_k \cdot \vec{v} \cdot \nabla T_k = \lambda_k \Delta T_k + Q_k(t) \quad (k = 4:8) \quad (IV-3)$$

Le terme  $Q_k(t)$  représente les apports volumiques dans chaque couche, non nuls uniquement pour la micro source (IV-4).

$$Q_{0 \rightarrow 2}(t) = Q_{4 \rightarrow 8}(t) = 0; Q_3(t) = Q(t) \quad (IV-4)$$

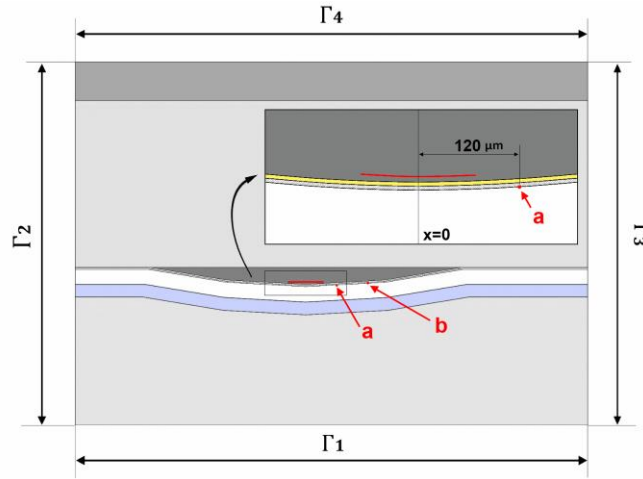
Afin de faciliter l'interprétation ultérieure des résultats du calcul numérique, nous avons choisi d'implémenter dans le modèle numérique, la **vitesse moyenne**  $\vec{v}$ , de défilement des rubans et supports d'impression. En effet, nous verrons ultérieurement que les résultats du calcul numérique sont post-traités afin de reproduire un code à barres virtuel en vue d'analyse. La prise en compte de la vitesse vraie, c'est-à-dire telle que mesurée par le codeur incrémental, aurait induit des incertitudes quant à l'interprétation des phénomènes observés, notamment du point de vue de l'analyse de sensibilité aux paramètres d'entrée du modèle. De plus, nous faisons l'hypothèse que, dans les parties courbes du modèle, la norme du vecteur vitesse est égale à la vitesse moyenne au niveau de l'interface entre le PET et l'encre.

Le modèle admet la possibilité d'introduire des Résistances Thermiques de Contact aux interfaces entre la tête d'impression et le ruban ainsi qu'entre le ruban et le support (Figure IV.19 –  $R_{tc1}$  –  $R_{tc2}$ ).

Les équations régissant le transfert de chaleur au sein du complexe « tête d'impression/matériaux défilants », sont résolues à partir du logiciel de calcul par éléments finis Comsol Multiphysics®, version 3.5 a. Le solveur « direct UMFPACK » est utilisé, avec une gestion automatique des pas de temps d'une durée maximale de 4  $\mu$ s, conformément à la fréquence d'acquisition du signal électrique

#### IV.4.1.3 Réduction de domaine et conditions limites

Afin de réduire les temps de traitement informatique, comme nous l'avons présenté dans la Figure IV.19, nous avons fait le choix de restreindre le domaine du modèle numérique. Les conditions aux limites de ce nouveau domaine ont été testées afin de s'assurer que, dans les zones qui nous intéressent, c'est-à-dire à l'interface entre l'encre et le papier et à proximité de la micro-source, les niveaux de température atteints y étaient peu sensibles. La Figure IV.20 montre les points de mesure de température a et b que nous avons pris en référence. Le premier se situe à 120  $\mu$ m de l'axe passant par le centre de la micro-source et le second à 240  $\mu$ m.



**Figure IV.20 – Conditions aux frontières du modèle global**

Trois configurations ont été testées. Dans la première, considérée arbitrairement comme la référence, nous faisons l'hypothèse que les domaines sont des milieux semi-infinis. Une condition limite de première espèce est imposée. La température de paroi prise en compte est la température ambiante.

$$\forall(x, y) \in (\Gamma_{1 \rightarrow 4}), \quad T(x, y, t) = T_{amb} \quad (\text{IV-5})$$

Dans le second cas, nous choisissons d'imposer une condition limite de troisième espèce. La valeur du coefficient de convection  $h$  considéré est de  $8 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ .

$$\forall(x, y) \in (\Gamma_{1 \rightarrow 4}), \quad \varphi(x, y, t) = h(T - T_{amb}) \quad [\text{W.m}^{-2}] \quad (\text{IV-6})$$

Enfin, nous avons testé un troisième cas qui prend en compte en plus des phénomènes convectifs, la matière absente. Les coefficients d'échange  $h_{eq}$  sont calculés à partir de la conductivité thermique et de l'épaisseur de matière manquante, auxquels viennent s'ajouter le coefficient de convection  $h$  mentionné précédemment.

$$\forall(x, y) \in (\Gamma_{1 \rightarrow 4}),$$

$$\varphi(x, y, t) = h_{eq}(T - T_{air}) = \left(\frac{\lambda}{e} + h\right)(T - T_{amb}) \quad [\text{W.m}^{-2}] \quad (\text{IV-7})$$

Les résultats obtenus dans les configurations deux et trois ont été comparés au produit du calcul numérique issu du modèle semi infini (IV-5). Aux points a et b, les erreurs maximales respectives que l'on peut observer sont de 0,07 et 0,1°C. Les écarts types moyens que l'on obtient sont quant à eux de 0,03 et 0,05°C. Ces résultats montrent que, à proximité de la source, la température calculée par le logiciel est peu sensible aux conditions aux frontières du modèle. La réduction du modèle est rendue possible du fait du faible temps d'expérimentation numérique. Les effets de bords dus aux conditions aux frontières des domaines seront plus influents pour des temps de calcul plus longs. Nous faisons le choix d'appliquer la troisième configuration testée (IV-7), soit celle d'un coefficient d'échange global intégrant le manque de matière dû à la réduction du domaine, ainsi que les phénomènes convectifs.

IV.4.1.4 Maillage

Enfin, une étude de maillage a été réalisée en faisant varier le raffinement des éléments constitutifs du ruban, en jouant sur la taille maximale des mailles situées à l'interface entre l'encre et le papier. L'écart type calculé au point a (Figure IV.20) entre les températures issues d'un modèle de référence et différents essais montre que, au-delà de 95000 degrés de liberté, la précision est de 0,01°C et qu'elle n'évolue quasiment plus. Nous pouvons observer que conjointement, les temps de calcul augmentent de façon importante. Bien que ce choix nous soit défavorable en termes de temps de calcul, nous avons retenu le maillage qui nous offre la meilleure précision, soit une précision de 0,01°C. Le modèle global est constitué en tout, de 45412 éléments triangulaires à six nœuds.

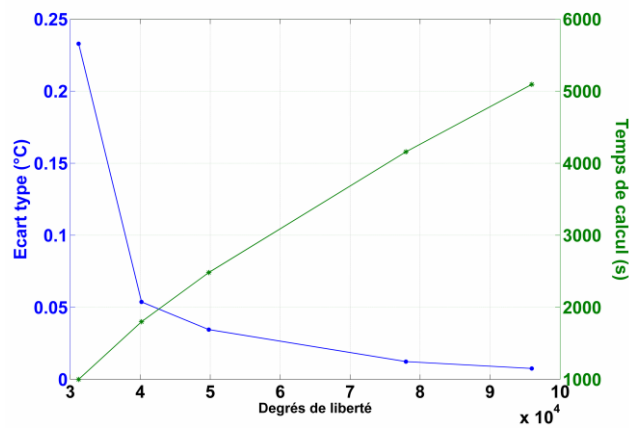


Figure IV.21 – Etude de maillage

La Figure IV.22 présente le maillage choisi ainsi qu'un agrandissement des couches de PET et d'encre constitutives du ruban. Celles-ci sont constituées dans le sens de l'épaisseur, à minima de 4 mailles.

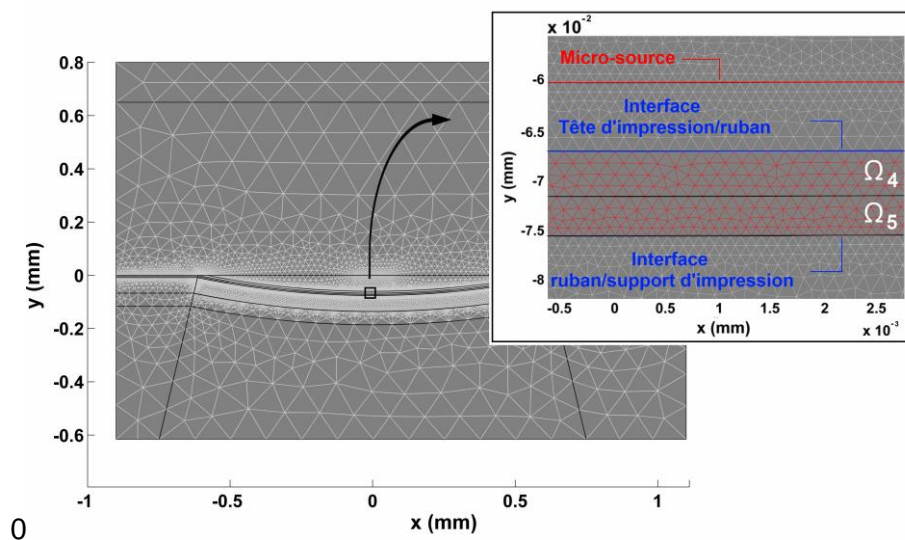
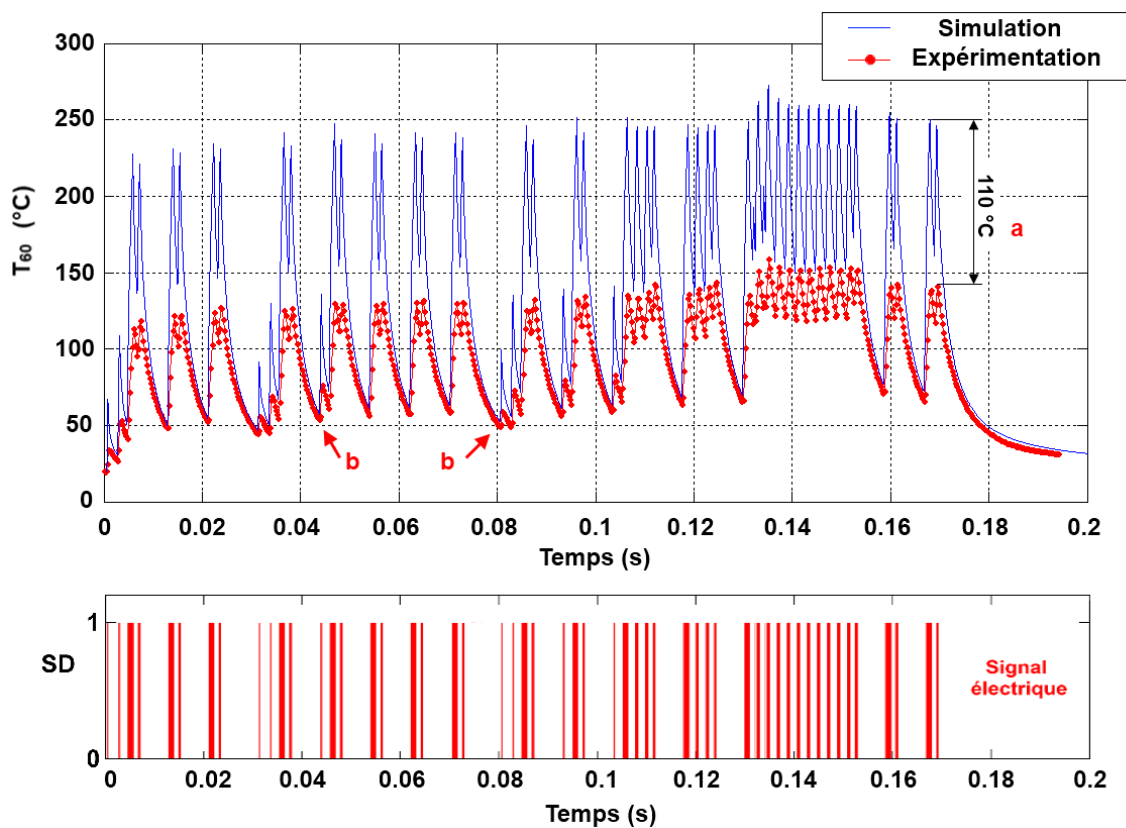


Figure IV.22 – Maillage retenu et raffinement dans l'épaisseur du ruban

#### IV.4.2. Comparaison mesures / simulations numériques

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe relatif aux mesures thermiques obtenues à l'aide de thermocouples (§ IV.2.2), il semble difficile d'exploiter ces données du fait de la perturbation thermique induite par la présence du capteur. Celle-ci rend les niveaux de température mesurés peu fiables. Nous pouvons nous attendre à une erreur importante entre les résultats calculés par le modèle numérique et ceux issus de l'expérimentation. Il ne semble donc pas possible d'utiliser les données expérimentales à des fins de validation par comparaison directe des thermo-grammes.

La Figure IV.23 présente les courbes obtenues expérimentalement ( $TC_5$ ) et numériquement, à la vitesse  $v = 60 \text{ mm.s}^{-1}$  et pour  $I_E = 15$ . L'architecture du signal électrique correspondant est représentée conjointement.



**Figure IV.23 Comparaison simulation / expérimentation ( $v = 60 \text{ mm.s}^{-1}$  -  $I_E = 15$ )**

Nous pouvons observer que, à la manière du thermocouple, le modèle numérique transcrit thermiquement tous les événements portés par le signal. Les effets, notamment du préchauffage, sont nettement apparents. Cependant, nous remarquons une divergence importante des niveaux maximums de température atteints, entre le produit de l'expérimentation et celui des résultats du calcul numérique (Figure IV.23 - a). L'erreur mesurée est de l'ordre de  $110^\circ\text{C}$ . À contrario, nous pouvons observer que les températures minimales atteintes entre deux créneaux d'excitation sont concordants (Figure IV.23 - b). Il apparaît ici clairement qu'il n'est pas possible d'utiliser les mesures thermiques obtenues par thermocouple en l'état, afin de vérifier la conformité des résultats du calcul numérique par rapport à la réalité. La méthode de mesure intrusive perturbe trop la mesure et minore fortement les niveaux de température réellement atteints par le système. Néanmoins, afin de

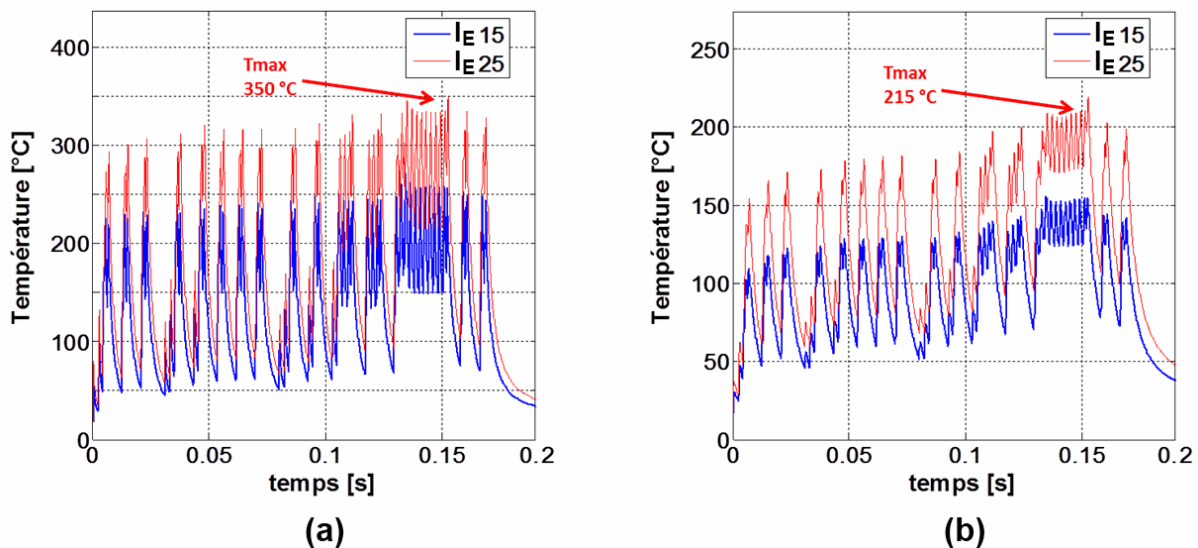
## Modélisation du système d'impression

pouvoir accorder raisonnablement à notre modèle un niveau de confiance suffisant pour permettre son exploitation, nous avons cherché à comparer les effets d'une perturbation induite expérimentalement et numériquement. La perturbation appliquée consiste en une variation de l' $I_E$  appliquée au système. Les niveaux de température calculés et mesurés n'étant pas du même ordre, nous avons exprimé l'effet mentionné, en termes de pourcentage de variation par rapport à la température maximale atteinte par le système (IV-8) :

$$\Delta T_{\%} = \frac{T_{25} - T_{15}}{T_{25}} * 100 \quad (IV-8)$$

avec  $T_{15}$  et  $T_{25}$ , les températures obtenues respectivement pour des  $I_E$  de 15 et 25.

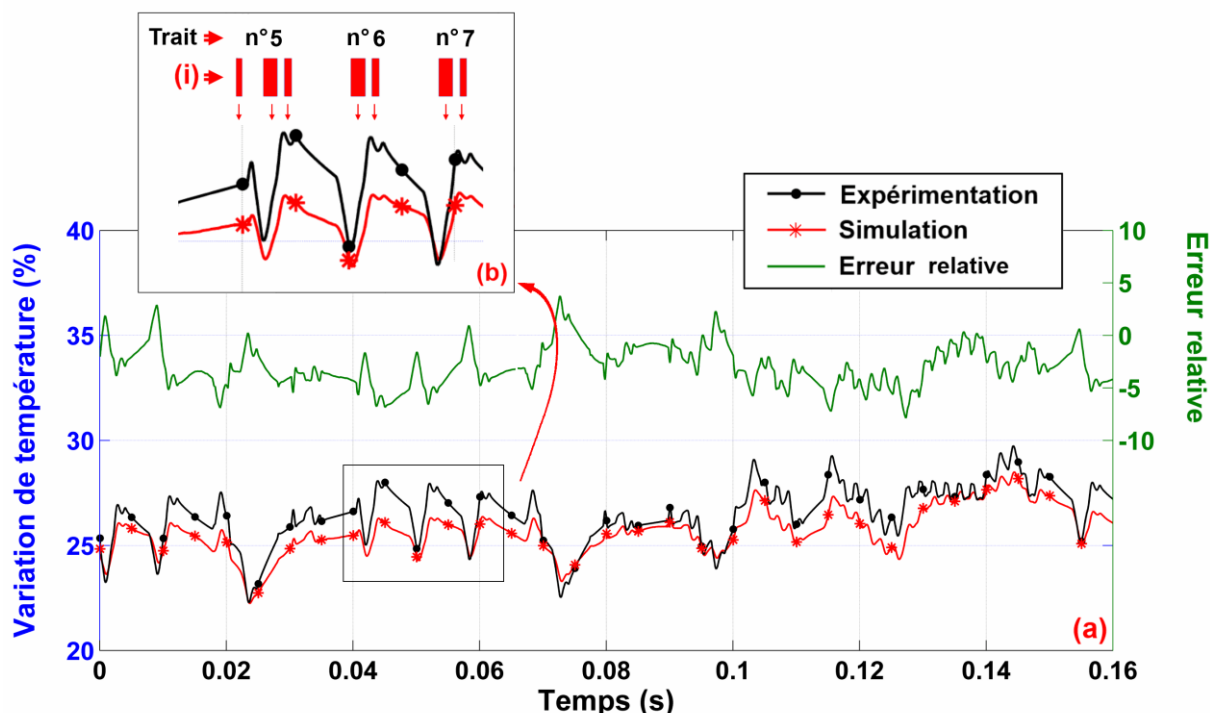
La Figure IV.24 présente l'effet de la perturbation induite expérimentalement et numériquement. La Figure IV.24 – a, se rapporte aux résultats issus de la simulation tandis que la Figure IV.24- b traite de la partie expérimentale.



**Figure IV.24 Comparaison des thermo-grammes calculés (a) et mesurés (b) pour des Indices Énergétiques de 15 et 25 à la vitesse  $v = 60 \text{ mm.s}^{-1}$**

La diminution de l'Indice Énergétique de la valeur de 25 à 15, se traduit dans les deux cas par une diminution de la température en surface, au centre du dot. Pour un  $I_E$  de 25, nous remarquons l'écart important atteint entre le maximum numérique, de l'ordre de 350 °C et celui atteint expérimentalement, de l'ordre de 215 °C. Pour un  $I_E$  de 15, les températures maximales sont respectivement de 255 et 155 °C. Cependant, nous constatons que, si l'on adimensionne les valeurs obtenues tel que nous l'avons mentionné précédemment, la perturbation appliquée entraîne un effet thermique proportionnellement identique, numériquement et expérimentalement.

La comparaison des courbes des rapports expérimentaux et numériques adimensionnés, sur toute la durée du signal électrique, est donnée sur la Figure IV.25 a. L'erreur relative entre ces deux séries de données y est aussi représentée.



**Figure IV.25** Incidence d'une perturbation des systèmes expérimentaux et numériques équivalant à une diminution de 10 points d' $I_E$  –  $v=60 \text{ mm.s}^{-1}$

Nous pouvons remarquer que les rapports des thermo-grammes qui sont présentés ont des comportements semblables au cours du temps. Pour chacun d'entre eux, les mêmes évènements thermiques sont observables. Par exemple, la Figure IV.25 b illustre les rapports comparatifs, relatifs au tracé des traits 5, 6 et 7. Les différents créneaux d'excitation électrique associés sont représentés conjointement. Nous pouvons constater que tous les évènements portés par le signal sont transcrits thermiquement, aussi bien expérimentalement que numériquement. De plus, si l'on calcule la moyenne de chacun des rapports, nous obtenons une diminution des niveaux de température mesurées de 27% et des températures calculées de 26,2%. En prenant les données expérimentales en référence, l'erreur relative entre simulations et mesures que l'on obtient oscille entre -8 et 4%.

Bien que ne s'agissant pas d'une validation à proprement parler, la méthode de contrôle que nous avons adoptée montre que du point de vue comportemental, le modèle numérique que nous avons développé semble retranscrire correctement les phénomènes thermiques ayant cours dans la réalité. Les produits de la simulation et de l'expérimentation nous semblent suffisamment concordants pour que nous puissions accorder à notre modèle le niveau de confiance nécessaire à son exploitation.

## IV.5. Étude thermique du système d'impression

Afin de montrer le comportement thermique du modèle développé, nous avons volontairement simplifié le signal. Le signal de référence retenu est un créneau d'une durée de 1 ms, ce qui correspond au temps d'excitation  $\tau_{cr}$  obtenu à la vitesse de  $60 \text{ mm.s}^{-1}$  et à un indice énergétique de 12. Précisons que ce signal n'est pas précédé de créneaux de

## *Modélisation du système d'impression*

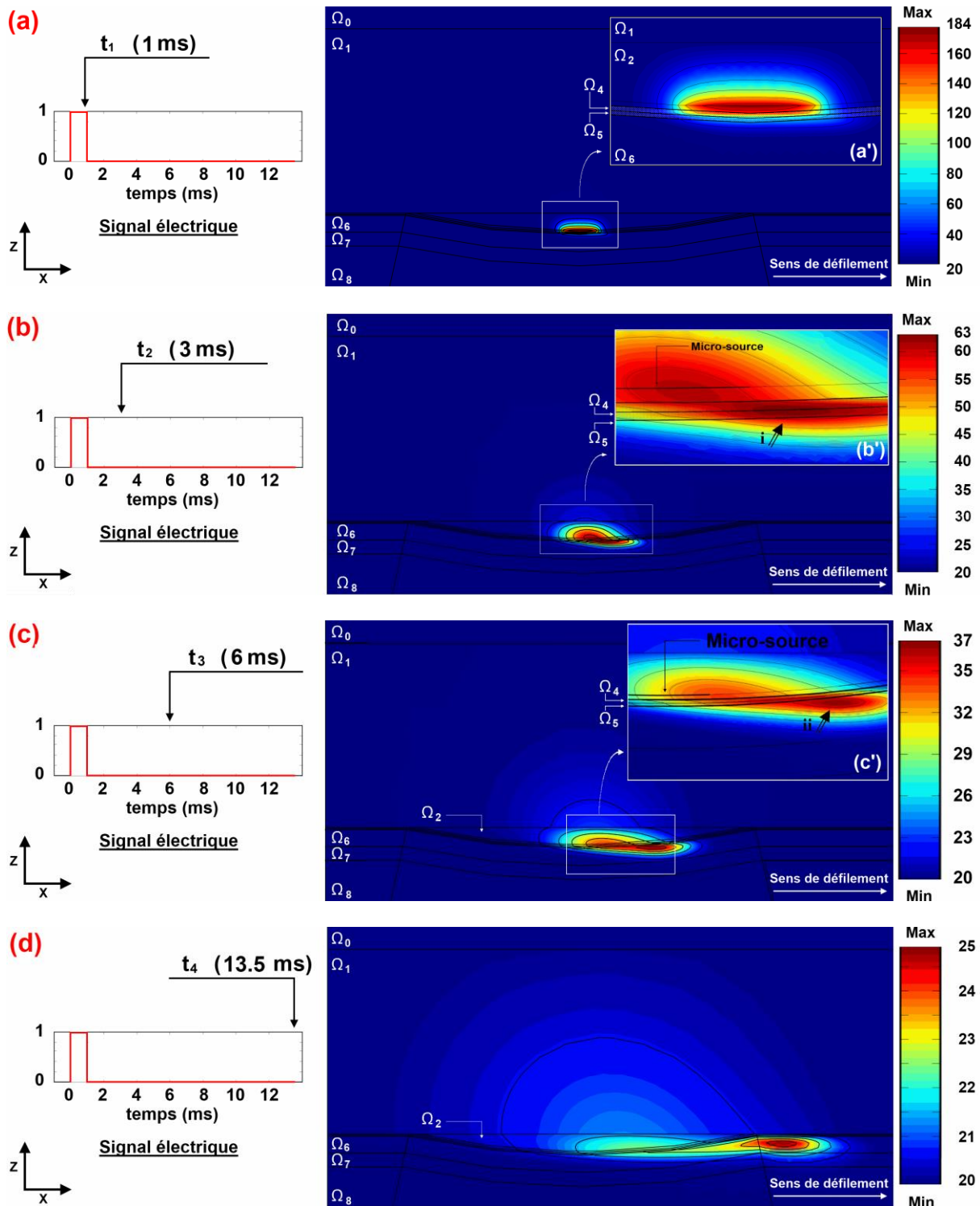
préchauffage. La température initiale du système est de 20°C. Un contact parfait est considéré entre les différentes couches.

### IV.5.1. Champ de température à proximité de la micro-source de chaleur

La Figure IV.26 présente le champ de température obtenu à quatre instants différents:  $t_1 = 1$  ms (fin du créneau),  $t_2 = 3$  ms,  $t_3 = 6$  ms et  $t_4 = 13,5$  ms.

Nous pouvons observer que le flux de chaleur, dans la partie immobile du dispositif d'impression ( $\Omega_{0-2}$ ), est centré sur la source. Au cours du temps, il subit l'effet du déplacement des matériaux défilants et se déforme légèrement. En revanche, dans la partie mobile du système constitué du ruban, du support d'impression et du revêtement du cylindre de contre pression, la chaleur est transportée préférentiellement dans la direction  $x$  (direction de défilement du support), plutôt que selon l'axe  $z$ , perpendiculaire. Nous pouvons voir sur les quatre figures, le flux de chaleur partir de la source (Figure IV.26 a), longer la courbure du dot (Figure IV.26 b et c), et repartir dans le sens des  $X$ . Dans un même temps, nous pouvons voir que celui-ci pénètre dans l'épaisseur des matériaux défilants.

L'observation des agrandissements présentés par les Figure IV.26 a', b' et c', permet de révéler que le flux de chaleur traverse rapidement le ruban d'impression. Au terme du créneau appliqué au système, la chaleur commence à pénétrer le PET (domaine  $\Omega_4$ ). Au bout des 2 ms suivantes, l'énergie, transportée par le ruban dans le sens des  $x$ , a suffisamment gagné le système pour provoquer la montée en température de la couche d'encre (domaine  $\Omega_5$  - Figure IV.26 - b'- i). 3 ms plus tard, l'essentiel du flux de chaleur a traversé le ruban (domaine  $\Omega_6$  - Figure IV.26 - c'- ii). Au terme de ces 5 ms consécutives à la fin du créneau d'excitation, le ruban a parcouru à peu près 300  $\mu\text{m}$  de distance. Donc, nous pouvons avancer que l'essentiel des phénomènes thermiques opérant dans un système d'impression dit « flat head » (Figure II-4), se déroule dans les tous premiers instants suivant l'émission d'un créneau d'énergie et surtout, qu'ils ont lieu à proximité du dot.



**Figure IV.26 Résultats du calcul numérique pour un créneau de 1 ms,  $v = 60 \text{ mm.s}^{-1}$  et  $l_E = 12$**

La température maximale modélisée qu'atteint le système est localisée au centre de la micro-source. Elle est de 184 °C et intervient à la fin de la période d'excitation à  $t=0,975 \text{ ms}$ . Ce niveau de température peut paraître faible mais est cependant à relativiser puisqu'il ne s'agit que d'un seul créneau, que le système est initialement à 20 °C et qu'il n'y a pas de préchauffage.



## *Modélisation du système d'impression*

Cette analyse nous permet de montrer que le modèle développé permet de restituer l'effet thermique du changement d'état de l'encre. Les niveaux de température calculés permettent d'envisager une exploitation plus avant, afin de mieux cerner les contours du phénomène d'impression par transfert thermique.

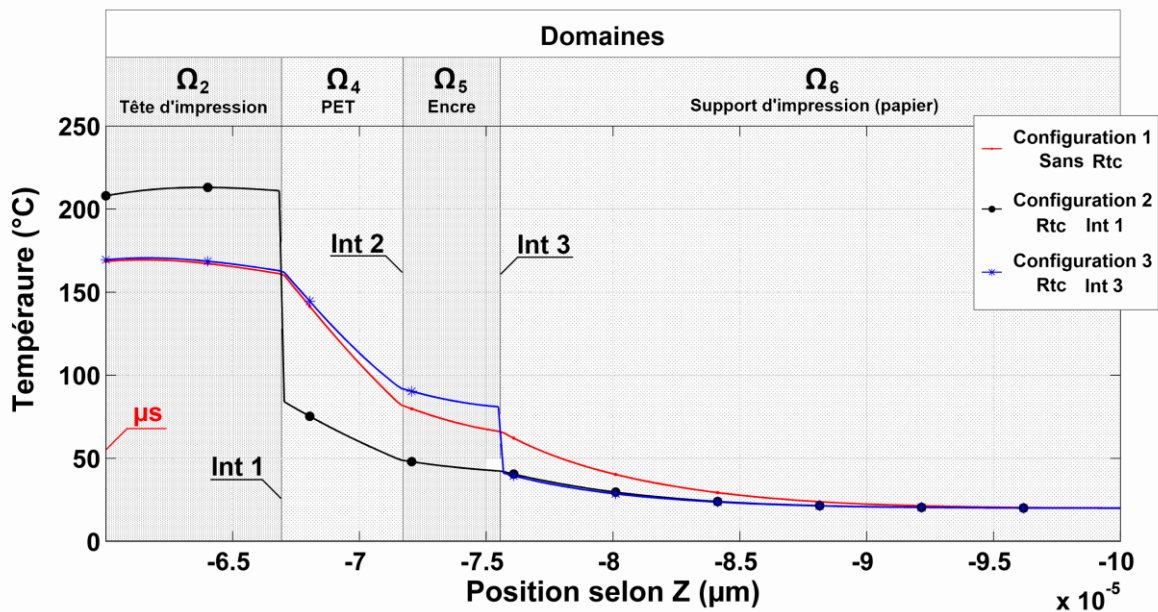
### IV.5.2. Influence des résistances thermiques de contact

Dans cette partie, la prise en compte des résistances thermiques de contact aux interfaces du ruban avec son environnement, c'est-à-dire d'un coté la tête d'impression et de l'autre le support, est discutée. Cependant, nous n'avons pas cherché à déterminer expérimentalement les valeurs de ces  $R_{tc}$ . En effet, procéder à leur évaluation aurait requis de développer un outil de laboratoire spécifique afin de prendre en compte le déplacement des rubans et du supports opérant dans la réalité. Ce travail aurait requis un investissement en temps trop important pour des résultats incertains. Dans cette étude, l'impact de la présence de  $R_{tc}$  sur le comportement thermique du système a donc été évalué numériquement.

Trois configurations ont été testées. La première n'intègre pas de résistance thermique de contact. Dans la seconde, une  $R_{tc}$  de  $10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$  a été introduite au niveau de l'interface entre la tête d'impression et le ruban (Int 1). Elle est continue et constante sur toute la zone de contact. La dernière résistance prise en compte a été implémentée au niveau de l'interface n°3 (ruban/support papier). Dans ces deux cas, nous avons volontairement choisi une valeur de résistance élevée afin d'en augmenter les effets. Les niveaux de température calculés ne sont donc pas réalistes mais permettent de mieux révéler les tendances liées à la prise en compte des  $R_{tc}$ .

La Figure IV.27 présente les températures calculées à  $t = 1 \text{ ms}$  dans ces trois configurations, au centre du dot, le long d'une ligne portée par l'axe  $z$ , traversant le ruban. Les différents domaines impliqués sont représentés ainsi que la localisation des interfaces. Les relevés de température intègrent la tête d'impression à partir de la micro-source, les couches constituant le ruban, ainsi qu'une partie de l'épaisseur de papier.

Les éléments classiques sont ainsi observés. A savoir, sans  $R_{tc}$ , une température qui décroît de façon continue à partir de la micro-source, jusqu'à la température ambiante de  $20 \text{ °C}$  et des pentes différentes d'un domaine à l'autre, liées aux diffusivités thermiques. Lorsque l'on intègre une résistance de contact, nous pouvons observer la présence d'une discontinuité sur le thermo-gramme correspondant.



**Figure IV.27 Influence de la présence de Rtc aux différentes interfaces**

A titre d'exemples, on peut noter dans la seconde configuration, une chute brutale des niveaux de température calculés de part et d'autre de l'interface allant de 211°C à 84°C. Dans la troisième configuration, qui prend en compte une résistance de contact à l'interface ruban/papier, la température baisse de 81°C à 41°C. L'introduction d'une résistance thermique de contact entraîne une variation de la température maximale ainsi que de la température moyenne de l'encre et du PET. Le Tableau IV.6 présente une synthèse des valeurs caractéristiques calculées dans ces deux domaines.

Configuration	Températures Domaine Ω4 (PET)			Températures Domaine Ω5 (Encre)		
	Minimum	Maximum	Moyenne	Minimum	Maximum	Moyenne
<i>Pas de Rtc</i>	82	160,1	119,2	65	82	72,8
<i>Rtc int 1</i>	48.9	84	65,4	42	48,9	45,1
<i>Rtc int 3</i>	92.1	161,9	124,5	81	92,1	85,6

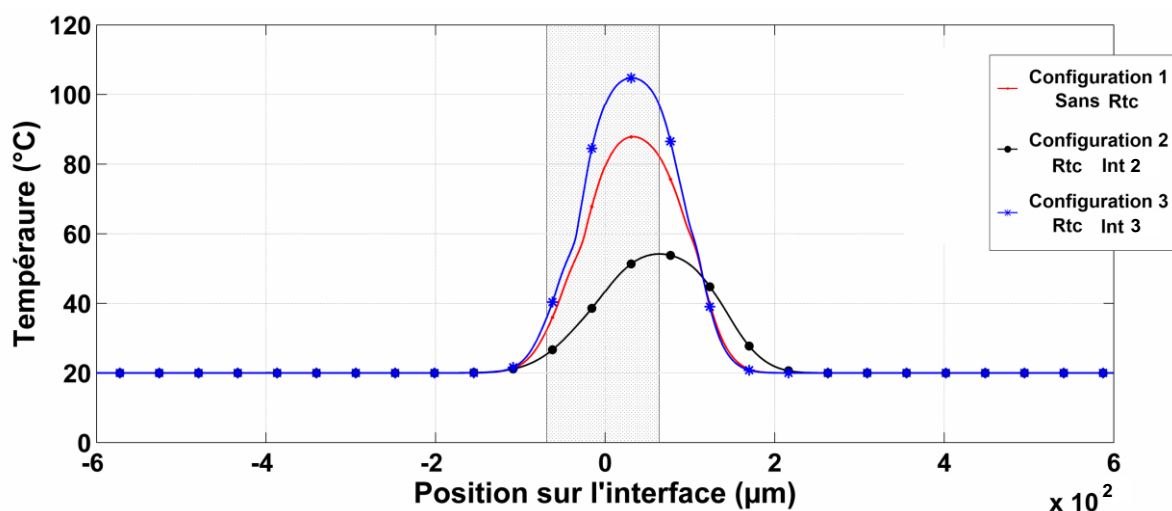
**Tableau IV.6 – Températures minimales, maximales et moyennes dans les couches de PET et d'encre selon la présence de Rtc aux interfaces 1 et 3**

Nous constatons que la présence d'une résistance thermique de contact à l'interface du ruban avec la tête d'impression génère globalement une diminution des températures dans les matériaux défilants. Le flux de chaleur est contraint dans ce cas à se diffuser dans le dispositif mécanique augmentant ainsi d'autant, son niveau d'énergie. Lorsque nous introduisons une Rtc au niveau de l'interface du ruban avec le support d'impression, le phénomène est identique. Le flux de chaleur est limité à l'interface entre le ruban et le papier et se propage dans les matériaux se situant entre la Rtc et la micro-source. Cela se traduit par une augmentation des températures dans les couches de PET et d'encre.

## Modélisation du système d'impression

Néanmoins, la spécificité de ce système, à savoir la présence conjointe d'éléments fixes (le dispositif mécanique) et d'éléments en mouvement (les rubans et supports), rend les analyses difficiles. La Figure IV.28 présente les thermo-grammes obtenus le long de l'interface du dot, entre le ruban et le papier support d'impression (Int 3), dans les trois configurations de modélisation évoquées. Ils ont été extraits à l'instant où, selon la configuration expérimentale retenue, ils donnent la température maximale obtenue sur toute la durée du calcul. Il s'agit respectivement de  $t = 5,27$  ms (conf. 1),  $t = 5,52$  ms (conf. 2) et  $t = 5,26$  ms (conf. 3). La projection de la micro-source sur cette frontière est représentée en grisé sur la Figure IV.28.

Nous retrouvons les tendances décrites précédemment à savoir que l'introduction d'une résistance thermique de contact au niveau de l'interface 1 entraîne une diminution des températures dans la couche encrée et qu'à l'inverse, elle provoque leur augmentation si elle est prise en compte à la frontière entre l'encre et le papier (interface 3). Les températures maximales calculées sont de  $87,9^{\circ}\text{C}$  pour la configuration 1 et de  $54,2^{\circ}\text{C}$  et  $104,7^{\circ}\text{C}$  respectivement pour les configurations 2 et 3. Elles sont respectivement situées à  $33\ \mu\text{m}$  (config. 1),  $64\ \mu\text{m}$  (config. 2) et  $31\ \mu\text{m}$  (config. 3) de l'interface ruban/papier (Int. 3)



**Figure IV.28 Impact des Rtc sur les températures à proximité de l'interface encre/support papier (Int. 3)**

Nous avons montré dans cette partie que le modèle que nous avons développé prend correctement en compte le changement d'état de la matière et qu'il y est sensible. Nous avons également montré que le déplacement des matériaux défilants était correctement modélisé, de même que les résistances thermiques de contact. Cependant, force est de constater que le transfert des résultats du calcul numérique vers l'acquisition de connaissance au regard du procédé industriel étudié n'était pas aisé du fait principalement du déplacement de la matière. Le modèle que nous avons développé et qui nous a permis d'analyser le comportement de la micro-source et de son environnement impose de raisonner dans un cadre eulérien. Dans la suite de ce travail, afin de mieux analyser le comportement thermique du ruban qui est au cœur de ce procédé, un passage au repère lagrangien est envisagé.

## IV.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit la démarche que nous avons adoptée pour aboutir au développement d'un modèle bidimensionnel du procédé d'impression par transfert thermique. Celui-ci reprend les acquis des travaux concernant la modélisation de la micro-source de chaleur présentés au Chapitre III, auxquels nous avons ajouté la prise en compte des rubans et support d'impression en condition de défilement.

Une observation minutieuse du système en conditions de fonctionnement réelles nous a convaincu de la nécessité qu'il y avait à caractériser la vitesse de défilement des matériaux, la force appliquée sur la tête d'impression ainsi que la nature du contact la reliant au ruban. En effet, compte tenu des faibles temps d'excitation électrique du système, il nous semblait nécessaire de vérifier comment se comportait l'appareil en cours de fonctionnement. Nous souhaitons notamment déterminer si le déplacement du ruban se faisait de façon intermittente, c'est-à-dire s'il était constitué d'une succession de mouvements et d'arrêts, tel que le suggérait la présence d'un moteur d'entraînement pas à pas. De fait, nous avons montré que la vitesse de défilement était de type quasi-sinusoïdal. Ensuite, la mesure de la force de serrage nous a servi à normaliser les conditions de fonctionnement optimales de l'appareil. Nous avons pu observer si le contact entre la tête d'impression et le ruban était continu ou non. Ces informations nous ont permis de mieux maîtriser les hypothèses simplificatrices faites dans notre modèle afin d'en tenir compte dans nos interprétations.

Dans ce chapitre, nous avons également présenté l'architecture du code à barres de référence que nous avons adopté. L'objectif que nous nous étions assignés lors de sa création était de maximiser les conditions d'apparition de défauts d'inscription, en un minimum de temps de calcul. Le CaB de référence sera de fait, réinvesti ultérieurement afin de corréliser les paramètres thermo-physiques et géométriques du système avec la survenue de ces anomalies d'écriture.

In fine, nous avons présenté le modèle bidimensionnel du système d'impression par transfert thermique. Les résultats du calcul numérique ont été comparés avec des mesures par thermocouples réalisées en conditions de fonctionnement réelles. L'instrumentation de ceux-ci et leur réponse thermique ont été préalablement décrites. Malgré tout le soin apporté à cette étape, nous avons montré qu'il y avait une forte perturbation de la mesure du fait de la simple présence du capteur dans le système. Il a été néanmoins possible d'en exploiter les résultats dans le cadre d'une comparaison en tendance avec le produit du calcul numérique. Ayant acquis un degré de confiance suffisant dans les résultats de la modélisation, nous avons présenté le potentiel de l'outil numérique au travers de l'analyse de quelques aspects du problème posé. Les exemples de résultats que nous avons obtenus, nous semblent de nature à nourrir la réflexion de l'utilisateur final au regard du procédé d'impression par transfert thermique et nous semblent source de compréhension et d'avancée des connaissances.

Le modèle ainsi développé est à présent réinvesti pour élaborer un Programme d'Impression Virtuelle (PIV) de code à barres permettant ainsi l'acquisition de nouvelles connaissances sur le procédé d'impression par transfert thermique.

# Chapitre V

## Imprimante virtuelle et exploitation du modèle numérique

### V.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous décrivons le développement d'un outil informatique de simulation d'écriture de code à barres à 90°. La Figure V.1 résume la démarche adoptée. Pour aboutir à l'écriture d'un code à barres numérique à 90°, nous avons changé de mode de représentation du système, en passant d'une description eulérienne du problème à une description lagrangienne.

Cet outil que nous appellerons imprimante virtuelle repose sur l'exploitation des résultats du calcul numérique présentés au Chapitre IV. Il a pour objectif de permettre d'étudier l'influence thermique des paramètres du système ainsi que de mieux comprendre la genèse de défauts d'écriture observés sur les CaB à 90°.

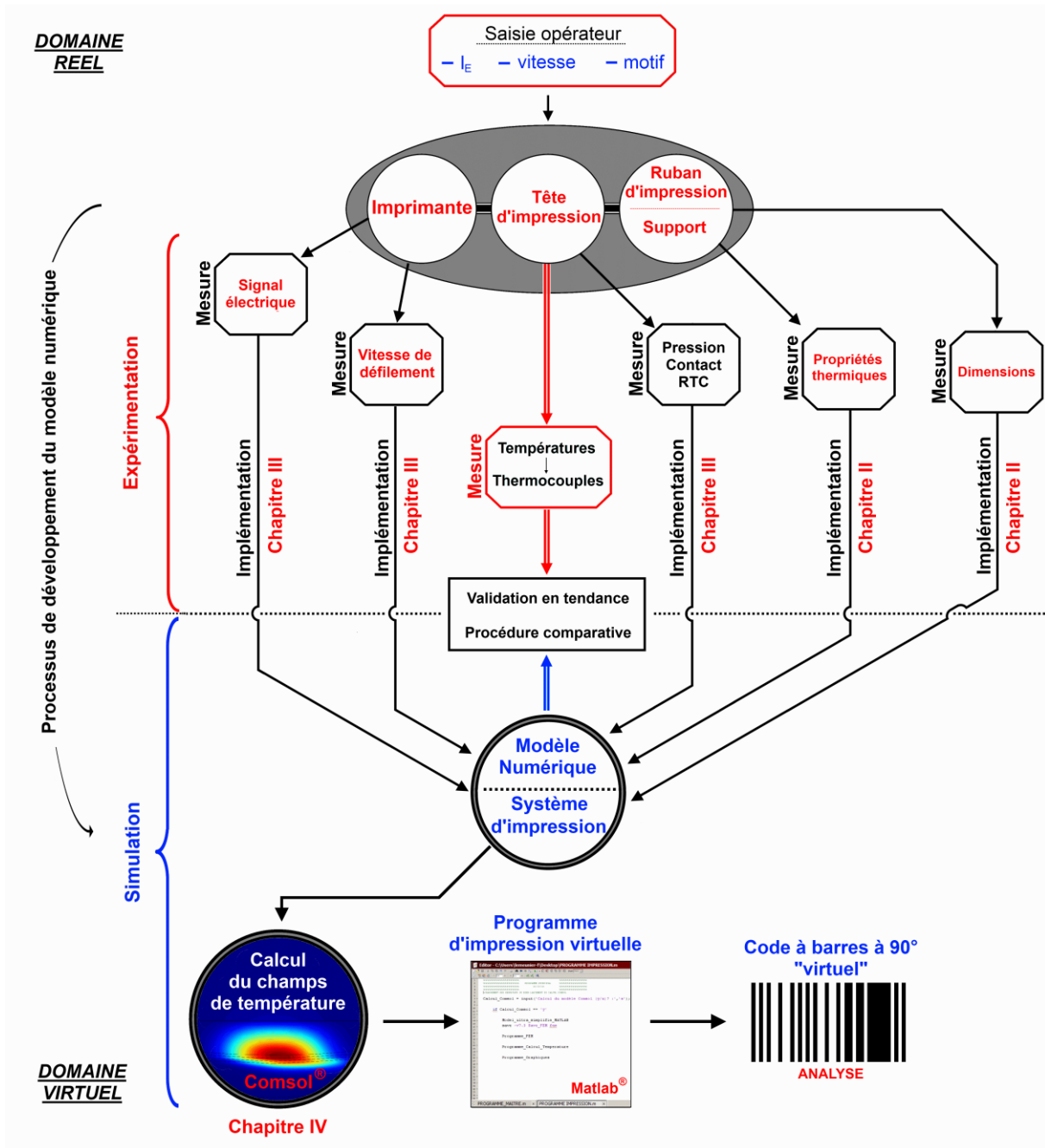


Figure V.1 - Synoptique d'étude du Chapitre V

## V.2. Présentation du concept d'imprimante virtuelle

### V.2.1. Espace Eulérien et espace Lagrangien

Les notions d'espace eulérien et d'espace lagrangien sont souvent employées pour caractériser les écoulements et la déformation des solides. Dans la description lagrangienne tout d'abord, le fluide ou le solide est découpé en éléments de volume mésoscopiques, physiquement fermés que l'on nomme particules matérielles. Cette description admet qu'on

## *Imprimante virtuelle et exploitation du modèle numérique*

les suivre géométriquement au cours de leur évolution temporelle, l'ensemble des positions successives étudiées définissant leurs trajectoires. La description lagrangienne consiste donc à déterminer des grandeurs physiques en des points attachés à la matière.

Dans la description eulérienne, l'espace étudié est discrétisé en éléments de volume mésoscopiques fixes dans le référentiel d'étude, donc physiquement ouvert si les particules sont en mouvement. La description eulérienne consiste donc à définir des grandeurs physiques en des points fixes du référentiel.

Jusqu'à présent, nous avons analysé le transfert de chaleur dans ce système d'impression, sous un jour eulérien ; L'espace ayant été préalablement discrétisé, les niveaux de température atteints à tous temps, en chacun des points  $M_i$  du système ont été déterminés, décrivant ainsi un champ de température  $T(M_i, t)$  tel que celui présenté en Figure IV.26.

Dans la suite de ces travaux, nous allons nous attacher à décrire le système étudié sous un jour lagrangien. L'attachement à décrire l'histoire thermique d'éléments de volumes encrés portés par le ruban va nous permettre, par le truchement d'un critère d'impression restant à déterminer, de recréer un code à barres numérique.

### V.2.2. Description lagrangienne du modèle numérique d'impression virtuelle

Le concept d'imprimante virtuelle repose sur l'exploitation de l'évolution du champ de température calculé numériquement.

Dans ce travail, on ne tient pas compte des variations de propriétés rhéologiques qui pourraient introduire un déplacement supplémentaire de l'encre soumise au flux de chaleur lors de son changement de phase. Ceci implique que les composantes de vitesse et donc la position de chaque élément de volume du système encré, peuvent être calculées au cours du temps. En effet, à un instant «  $t$  », ces composantes ne reposent que sur la géométrie et sur la vitesse linéaire imposée aux rubans et supports. Il devient donc possible de suivre un élément de volume de la couche encrée au cours du temps et d'en connaître l'histoire thermique.

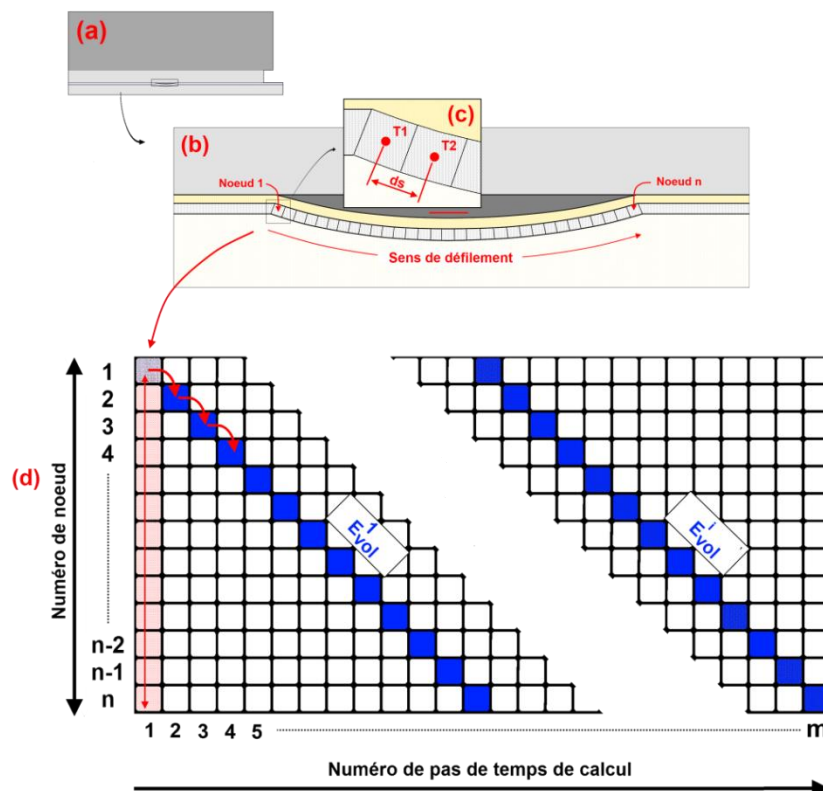
Ainsi, en considérant des éléments contigus, nous comprenons qu'il devient possible de reproduire numériquement un motif porté par une excitation thermique correspondant à un signal électrique obtenu expérimentalement. Il suffit pour cela de déterminer un critère booléen signifiant si oui ou non, l'élément de volume considéré a été transféré sur le support d'impression. Ce critère sera présenté dans le paragraphe suivant.

La Figure V.2 présente le processus numérique que nous avons mis en œuvre afin de caractériser le comportement thermique du système sous un jour lagrangien. Tout d'abord, cette méthode ne se rapporte qu'à la partie de la couche d'encre se situant au voisinage du dot, au niveau de la partie courbe du système (Figure V.2 - b). En effet, dans le chapitre précédent, nous avons montré que le flux de chaleur traversait le ruban lors de son passage au niveau du dot (Figure IV.26). La température maximale de l'élément de volume  $E_{vol}^i$  considéré aura donc été atteinte avant qu'il n'ait terminé son parcours au voisinage du dit dot. Ensuite, nous considérons qu'un tel élément occupe toute l'épaisseur de la couche encrée. Sa dimension dans le sens de déplacement du ruban est, pour sa part, directement

indexée sur le pas de temps d'acquisition des résultats numériques. Nous assumons la simplification selon laquelle la température moyenne d'un élément de volume quelconque est égale à celle régnant en son centre (Figure V.2 - c).

A chaque pas de temps de sauvegarde  $dt$ , nous extrayons les températures à mi épaisseur de la couche encrée en des nœuds équidistants. La distance  $ds$  séparant deux de ces nœuds vaut  $v * dt$ , avec  $v$ , la vitesse de déplacement des rubans et supports. Les températures calculées sont extraites tout le long de la couche encrée immédiatement située sous le dot et organisées en colonne dans une matrice que nous appellerons « matrice lagrangienne (Figure V.2 - d). Le nœud numéro « 1 » correspond au début de la partie courbe de la zone encrée et le nœud « n », à la fin de cette même zone. Cette opération d'organisation est répétée « m » fois, soit autant de fois qu'il y a de pas de temps durant l'expérience numérique.

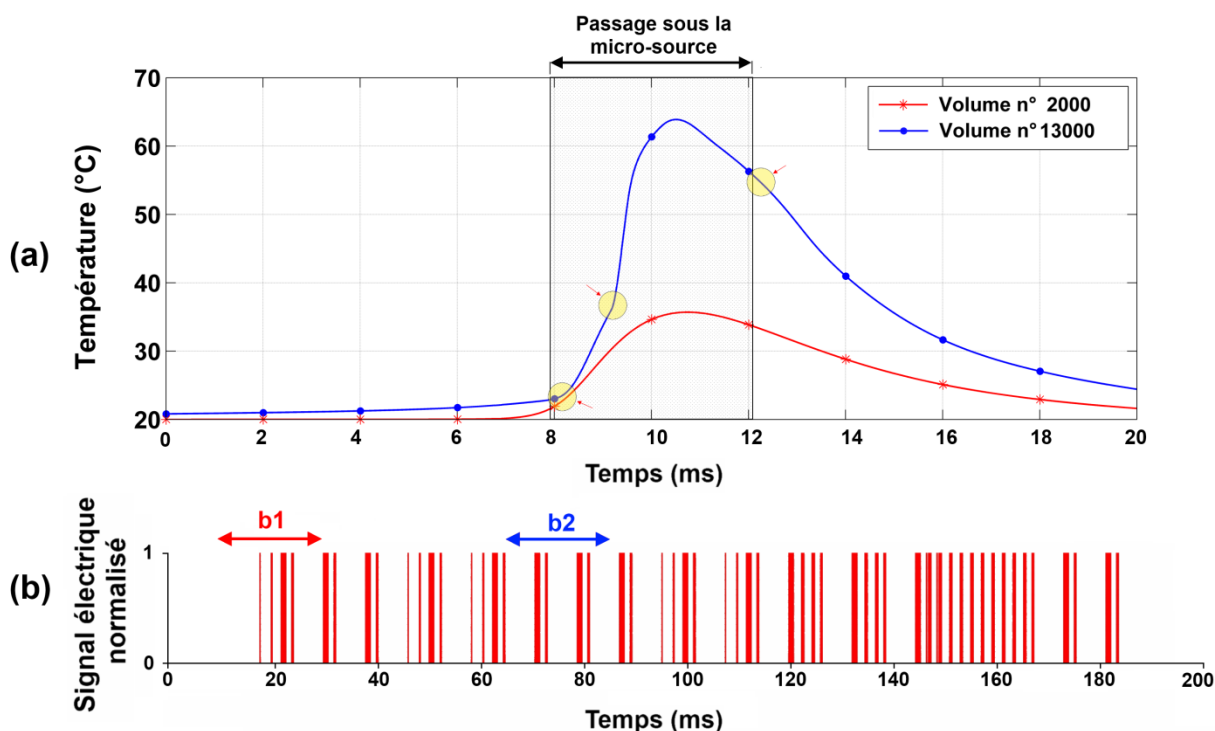
La description lagrangienne du système encré consiste alors à lire en diagonale la matrice ainsi produite. Considérons par exemple l'élément de volume positionné au nœud numéro « un » c'est-à-dire au début du dot, à l'issu du premier pas de temps de calcul. La température de cet élément de volume est consignée dans la matrice lagrangienne dans la cellule (1,1). Au terme du second pas de temps de calcul identifié par la deuxième colonne de la matrice lagrangienne, sa température vaudra la valeur de la cellule (2,2). En effet la seconde colonne renvoie aux températures à l'issu du deuxième pas de temps. Au cours du temps  $dt$ , l'élément de volume se sera déplacé d'une distance  $ds$  correspondant au nœud suivant, dont la température est consignée sur la seconde ligne.



**Figure V.2 - Schéma explicatif du processus numérique de création de la matrice de lecture des températures**



La Figure V.3 suivante présente les histogrammes de deux éléments de volumes représentatifs (n° 2000 et 13000) (Figure V.3 - a). Ce graphique présente conjointement le signal électrique normalisé, source de l'excitation thermique (Figure V.3 - b). Les plages de temps pendant lesquelles les éléments de volumes sont positionnés sous le dot, sont représentées (Figure V.3 - b1 et b2 ainsi que Figure V.3 - a1). Nous pouvons observer que pendant les 8 premières millisecondes du parcours des éléments de volume, leur température est quasi-stable. Néanmoins, le système étant thermiquement chargé du fait de l'accumulation thermique due aux excitations précédentes, nous pouvons observer que la température de l'élément 13000 est supérieure à celle de l'élément 2000 de 3°C. Ensuite, nous pouvons observer que la température de ces deux éléments volumiques augmente sous l'effet de la charge thermique délivrée par la micro-source. La température du premier élément passe de 20 à 36 °C tandis que celle du second élément passe d'un peu plus de 20 °C à approximativement 63 °C. Nous pouvons également observer concernant ce dernier, qu'il subit l'influence de plusieurs créneaux thermiques repérables aux ruptures de pente observables sur son thermo-gramme.



**Figure V.3 – Histoire thermique des éléments n°2000 et 13000 au cours de leur passage sous le dot et signal électrique associé**

Ce graphique révèle que les histoires thermiques des éléments de volumes en déplacement sous le dot montrent de grandes disparités de niveaux de température maximale atteinte. Nous avons fait l'hypothèse selon laquelle les sollicitations thermiques subies par les éléments de volumes devaient justifier qu'ils aient été transférés ou non, du PET sur lequel ils étaient fixés vers le support d'impression. Dans ce sens, nous avons recherché un critère thermique d'impression que nous présentons dans le paragraphe suivant.

### V.2.3. Définition du critère thermique d'impression

Nous avons retenu en première approche, dans ce travail, un critère d'impression fondé sur la température de fusion de l'encre. Celle-ci a été préalablement mesurée par DSC (§ II.4.2). Nous avons retenu la valeur de 58,5°C. Nous avons formulé l'hypothèse selon laquelle si, au cours de son histoire thermique, un élément de volume, dépassait ce niveau de température, alors nous estimions qu'il y'avait eu transfert de l'encre du PET vers le support d'impression. Ce critère a été appliqué à l'ensemble des éléments de volume passant sous le dot au cours de la phase d'excitation thermique représentative du code à barres souhaité. Nous avons ainsi pu simuler l'impression d'un CaB unidimensionnel dans la mesure où la dimension «  $ds$  » des éléments de volume dans le sens de déplacement du ruban était une donnée connue. Ce tracé a par la suite été « extrudé » afin de reproduire un CaB faussement bidimensionnel, dans le but d'en faciliter la lecture. Si l'on considère les éléments de volume numéros 2000 et 13000 mentionnés précédemment, nous pouvons voir que le premier n'aurait pas été considéré comme transféré puisque la température maximale qu'il atteint est de 36 °C tandis que le second l'aurait été puisqu'il excède les 60 °C.

#### *Synthèse sur le concept d'impression virtuelle*

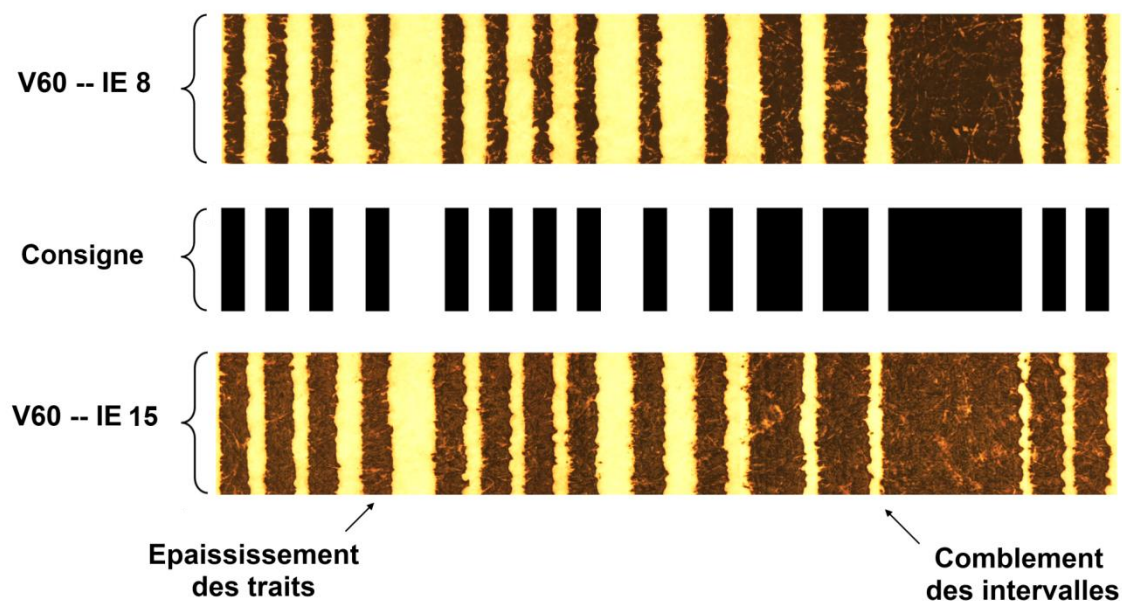
Dans cette partie, nous avons décrit la démarche adoptée pour générer à partir du champ de température calculé au cours du temps, un code à barres numérique. Le passage d'un repère eulérien à un repère lagrangien est rendu possible par le fait que l'on connaisse précisément la vitesse et le sens de déplacement de chaque élément de volume. La durée séparant deux temps de sauvegarde du code de calcul étant une donnée paramétrée, il est aisé de déterminer le pas d'espace  $ds$  séparant deux positions successives d'une même particule matérielle :  $ds = v \times dt$ . Nous pouvons donc ainsi suivre au cours du temps l'évolution en température d'un élément de volume déterminé. En lui appliquant un critère d'impression fondé sur la température maximale qu'il a atteinte, nous pouvons supposer s'il a ou non été virtuellement transféré sur le support d'impression. En répétant cette démarche pour chaque élément de volume, nous pouvons recréer numériquement un code à barres. Nous verrons dans la partie suivante que le choix de la température de fusion de l'encre est pertinent dans la mesure où il permet la validation du modèle numérique d'impression virtuelle.

### V.3. Validation du modèle numérique

Il s'agit à présent de décrire le processus de validation du programme numérique de reproduction de code à barres obtenu à partir du critère d'impression mentionné au paragraphe V.2.3. Cette étape s'est articulée autour de deux points. Dans un premier temps, à partir du motif de référence présenté au § IV.3.1, nous avons généré un tracé expérimental que nous avons ensuite numérisé. L'image bidimensionnelle obtenue a été analysée pour déterminer la quantité d'encre déposée dans le sens des Y, exprimée en pourcentage par rapport à la largeur totale. Dans un second temps, nous avons généré à l'aide du modèle numérique des transferts de chaleur, un code à barres virtuel. Celui-ci est fondé sur la détermination du critère thermique d'impression décrit au § V.2.3. Pour finir, les deux motifs obtenus, l'un expérimental et l'autre virtuel, ont été comparés à des fins de validation du modèle numérique.

### *Imprimante virtuelle et exploitation du modèle numérique*

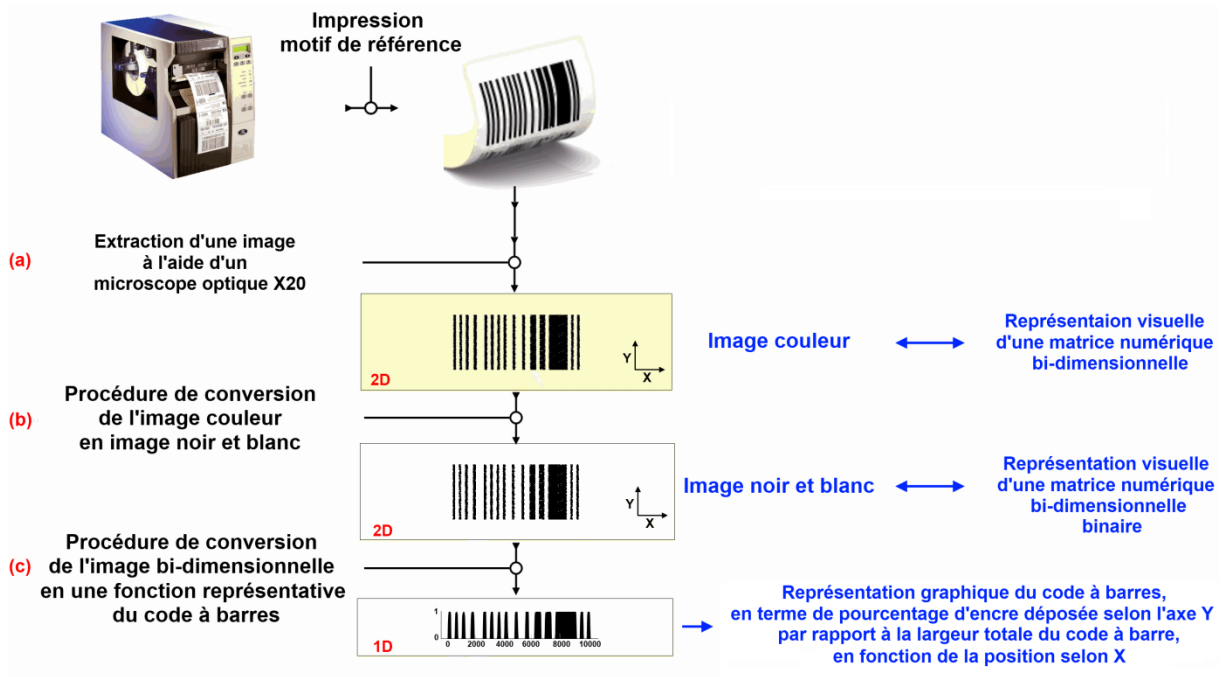
Cette procédure a été répétée sur deux points de fonctionnement obtenus en modifiant le paramétrage de l'imprimante. Pour un même motif tracé, nous avons ainsi obtenu deux codes à barres présentant une qualité d'écriture différentes (Figure V.4). Dans un premier cas, nous avons considéré un paramétrage de l'imprimante générant un code à barres optimal, donc lisible ( $v = 60 \text{ mm.s}^{-1} - I_E = 8$ ). Dans un second cas, nous avons généré un code à barres porteur de défauts. Ici, nous avons surévalué la quantité d'énergie apportée au système dont l'effet a été de combler les intervalles entre deux traits rendant sa lecture impropre ( $v = 60 \text{ mm.s}^{-1} - I_E = 15$ ).



**Figure V.4 – Codes à barres numérisés**

#### V.3.1. Mesure expérimentale

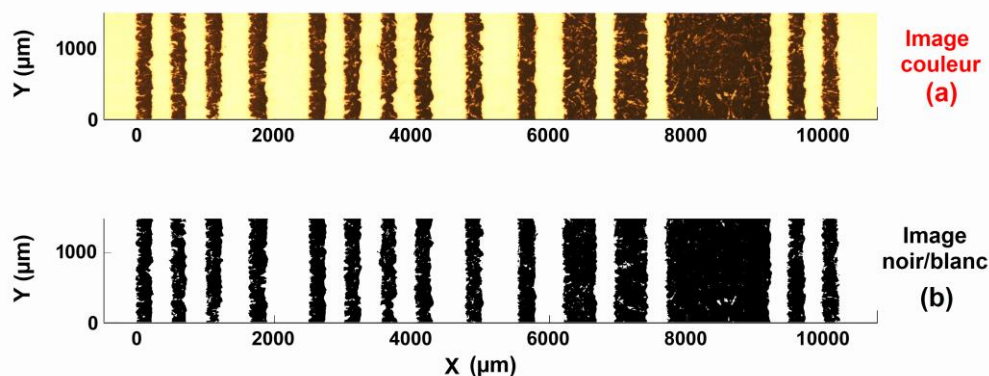
La procédure de numérisation des codes à barres expérimentaux est décrite dans la Figure V.5.



**Figure V.5 – Procédure de numérisation d'un code à barres expérimental**

Les codes à barres imprimés aux deux points de fonctionnement mentionnés ont été dans un premier temps photographiés à l'aide d'un microscope optique grossissant 20 fois (Figure V.5 a). Nous avons obtenu une image constituée d'un ensemble de pixels dont les dimensions sont directement liées au facteur d'agrandissement choisi. En l'occurrence, chaque pixel de l'image était représentatif d'une surface du code à barres imprimé de  $1,1612 * 1,1612 \mu\text{m}^2$ .

Dans les étapes suivantes, les images ont été transcrites en une matrice numérique codée dans le format RVB. Elles ont dans un premier temps été converties en « niveau de gris ». Nous avons ensuite analysé la matrice bidimensionnelle ainsi générée et déterminé la valeur seuil représentative de la frontière entre les zones encrées et non-encrées. In fine, la matrice initiale codée au format RVB (Figure V.6 a) a donc été convertie en une matrice binaire (Figure V.6 b) constituée des valeurs 0 pour les parties non encrées et 1 pour les parties encrées.



**Figure V.6 – Image numérisée du code à barres de référence ( $v = 60 \text{ mm.s}^{-1} - I_E = 8$ ) avant (a) et après (b) procédure de binarisation**

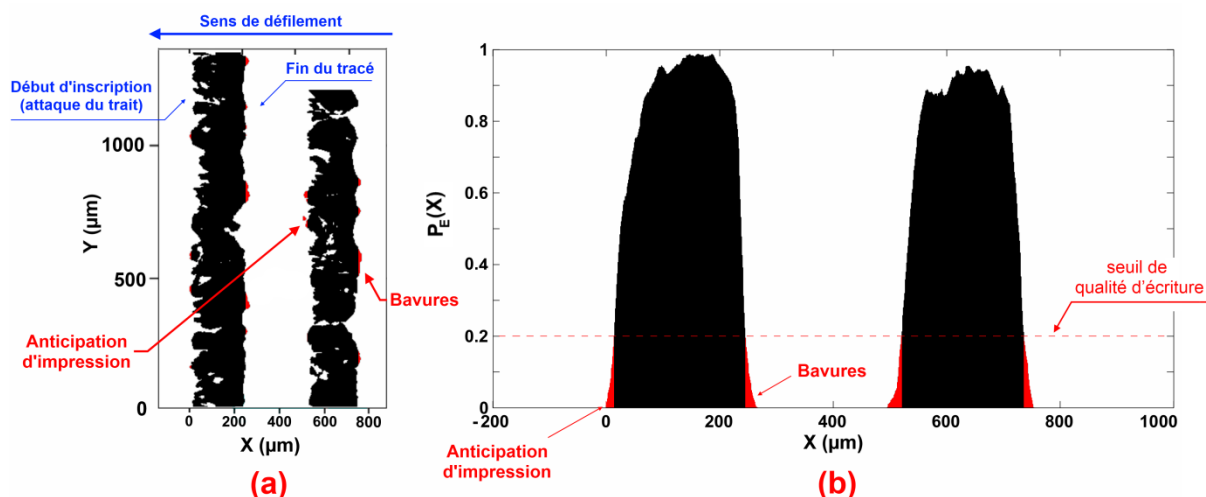
## Imprimante virtuelle et exploitation du modèle numérique

Le calcul de la valeur moyenne des colonnes de la matrice binaire nous a permis d'exprimer le pourcentage d'encre  $P_E(X)$ , déposé selon  $Y$  (V-1). Chaque pourcentage vaut pour une longueur égale à la dimension du pixel de l'image numérique initiale.

$$P_E(X_j) = \frac{1}{n_y} * \sum_{i=1}^n y_{i,j} \quad (V-1)$$

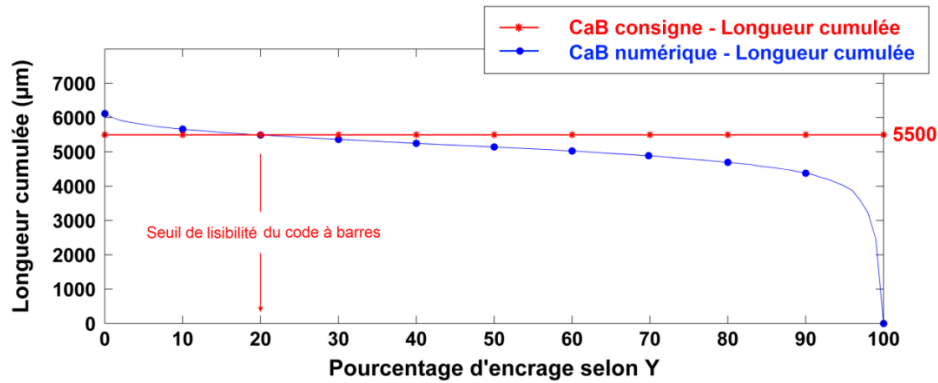
avec  $X_j$ , la position longitudinale considérée,  $n_y$ , le nombre de pixels dans le sens des  $Y$  et  $Y_{i,j}$ , la valeur numérique associé au pixel «  $i$  », de la position  $X_j$ .

La Figure V.7 représente les traits n°1 et 2 après binarisation (Figure V.7 a) ainsi que le graphique de caractérisation de ceux-ci en termes de pourcentage d'encrage (Figure V.7 b). Ce dernier permet de caractériser l'attaque et la fin de chaque trait. Par exemple, plus l'attaque du trait sera « franche » plus la pente de la représentation en terme de pourcentage s'y rapportant sera importante. A l'inverse, plus le code à barres présentera de défauts d'impression, qu'il s'agisse d'anticipation d'impression ou bien de bavures, plus la pente sera faible, respectivement en début ou fin de tracé.



**Figure V.7 – Exemple de caractérisation des deux premiers traits du code à barres en termes de pourcentage d'impression selon  $Y$**

Néanmoins, cette représentation est incomplète puisque l'on sait qu'une bavure par exemple, ne peut pas être interprétée comme une partie codante. Il convient donc de déterminer le pourcentage de pixels noircis, en dessous duquel il est difficile de distinguer l'écriture volontaire du code à barres de l'apparition involontaire de défauts tels qu'une bavure. Cela revient à déterminer un seuil de lisibilité (Figure V.7 - b). Nous avons défini celui-ci en calculant la longueur cumulée des traits expérimentaux et en prenant pour critère de lisibilité, le pourcentage d'encre déposé selon  $Y$ . Nous avons ainsi déterminé le seuil pour lequel ces valeurs étaient les plus proches de la consigne, c'est-à-dire le CaB tel qu'il devrait être au regard du motif paramétré (cf. IV.3.1- Figure IV.14).



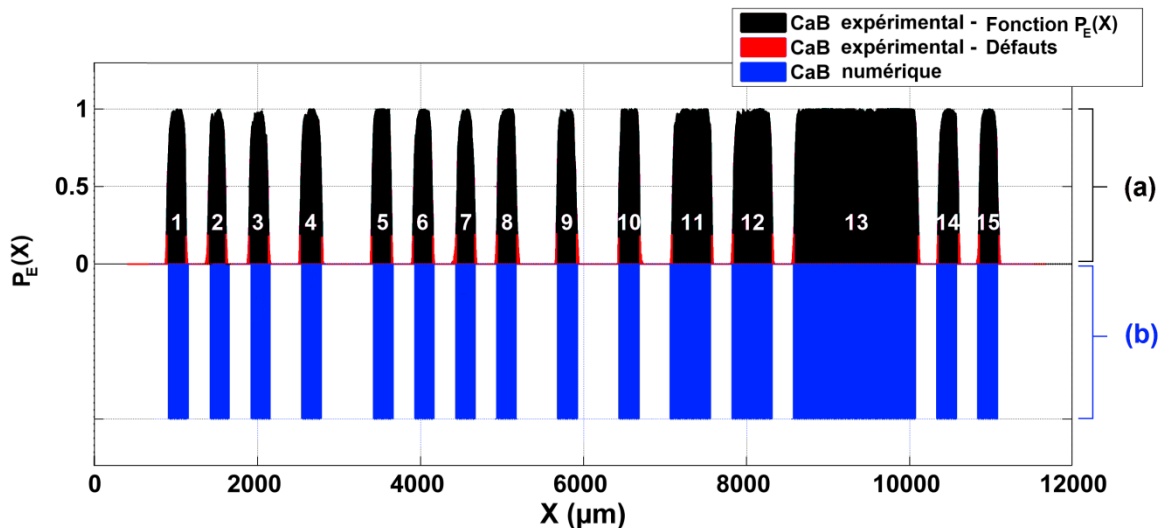
**Figure V.8 – Détermination du seuil de lisibilité du code à barres**

### V.3.2. Comparaison expérimentation/simulation

#### V.3.2.1 Code à barres fonctionnel ( $v = 60 \text{ mm/s}$ et $I_E = 8$ )

Le premier point de validation du modèle numérique se rapporte au paramétrage de l'imprimante permettant l'obtention d'un code à barres lisible. La vitesse de défilement considérée est  $v = 60 \text{ mm.s}^{-1}$  et l'indice énergétique vaut  $I_E = 8$ . La Figure V.9 montre en « a », la fonction  $P_E(X)$  représentative du CaB expérimental et en « b », le CaB calculé.

Les traits simulés sont correctement calés sur les marques expérimentales. Les longueurs totales des CaB mesurées et calculées sont proches puisqu'elles sont respectivement de  $10244 \mu\text{m}$  et  $10166 \mu\text{m}$ , pour un motif théorique (consigne) de  $10000 \mu\text{m}$ .

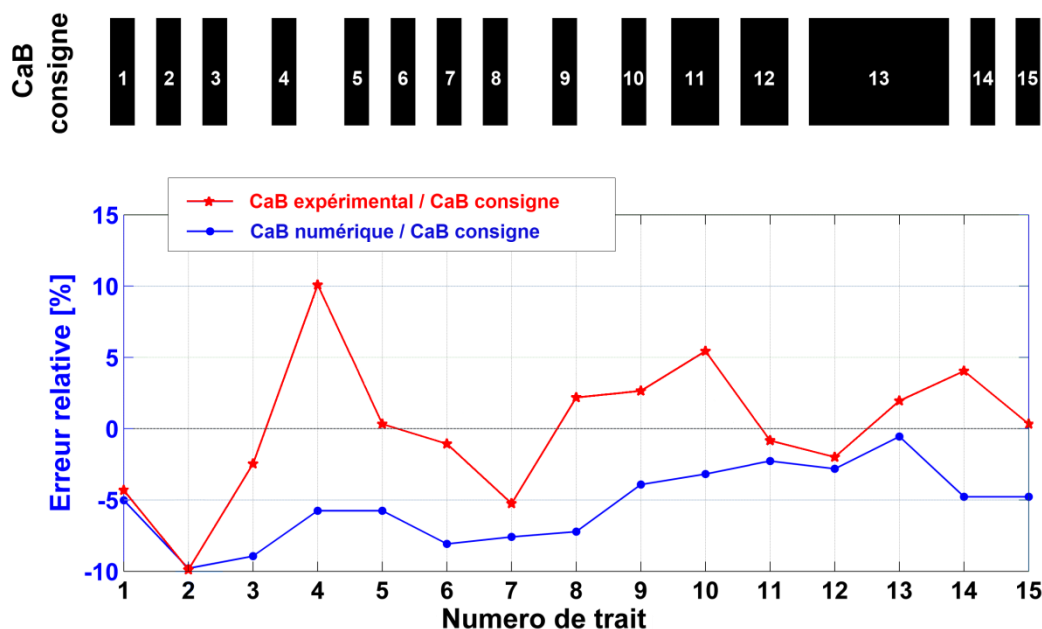


**Figure V.9 – Comparaison graphique des CaB expérimental et numérique  
 $v=60 \text{ mm.s}^{-1}$   $I_E=8$**

Pour chaque largeur de trait, l'erreur relative entre la consigne et, d'une part le produit expérimental ainsi que d'autre part, le CaB virtuel, a été calculé (Figure V.10). L'écart maximal observé est de 10% dans les deux cas. Pour la partie expérimentale, l'erreur moyenne est inférieure à 0,1 %. L'observation de la courbe se rapportant à la mesure

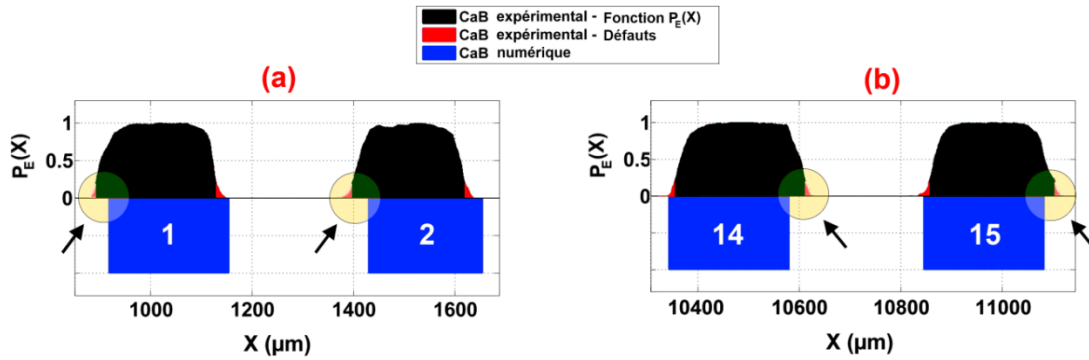
## Imprimante virtuelle et exploitation du modèle numérique

expérimentale montre que l'erreur relative attribuable à chaque trait tend à osciller autour de la valeur 0. L'écart type calculé pour l'ensemble des traits est de 4,8%. Pour la partie numérique, l'erreur moyenne est de -5,4% et l'écart type de 2,6%. Dans ce cas, nous constatons que l'erreur relative tend à se réduire au cours du temps. Ceci peut être expliqué par le chargement thermique du modèle de tête d'impression.



**Figure V.10 – Calculs d'erreur au point de validation numéro 1 (CaB fonctionnel)**

L'observation plus précise du graphique comparatif des tracés des CaB expérimentaux et virtuels montre cependant une dérive de l'adéquation entre les deux représentations (Figure V.9). La Figure V.11- a présente les deux premiers traits tracés et La Figure V.11b, les deux derniers. Nous pouvons observer que la position relative des traits expérimentaux et virtuels se décale à mesure que l'on se rapproche des extrémités des CaB. Ceci peut s'expliquer au regard de l'incertitude liée au calcul de la vitesse moyenne de défilement des rubans et supports. En effet, celui-ci repose sur la mesure du déplacement angulaire du cylindre de contre pression au cours du temps ainsi que sur la mesure du diamètre de ce dernier. Son revêtement de caoutchouc étant déformable sous la contrainte de serrage de la tête d'impression, il demeure une incertitude sur la mesure de son diamètre.

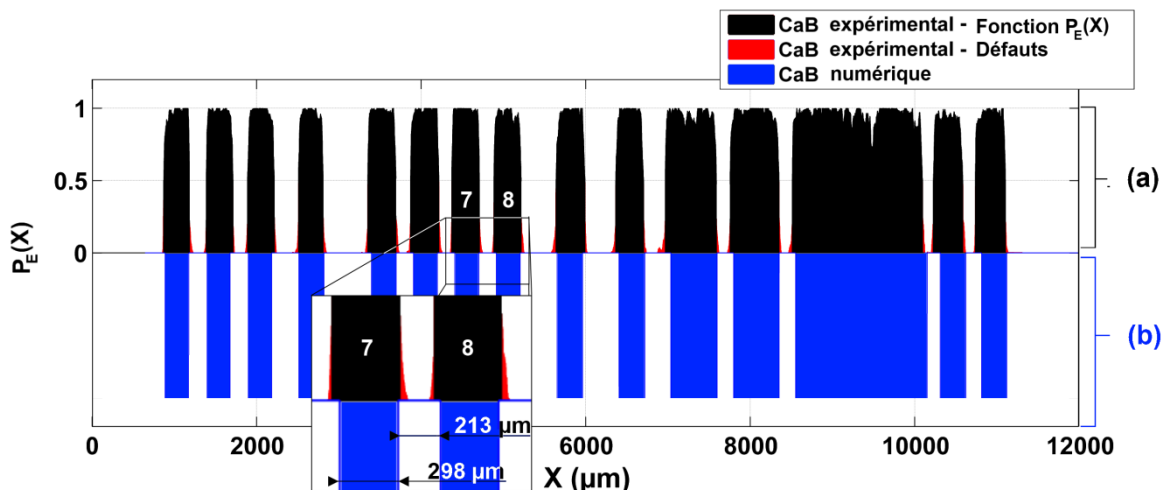


**Figure V.11 – Comparaison expérimentale et numérique des deux premiers et deux derniers traits du code à barres**

### V.3.2.2 Code à barres non-fonctionnel ( $v = 60 \text{ mm/s}$ et $I_E = 15$ ).

Le second point de validation du modèle est fondé sur un paramétrage de l'imprimante ne permettant pas l'obtention d'un code à barres lisible. L'indice énergétique considéré dans ce cas vaut 15. La Figure V.12 montre en « a », la fonction  $P_E(X)$  représentative du CaB expérimental et en « b », le CaB calculé.

L'augmentation de l'Indice d'Energie génère un allongement du tracé global du motif de référence, mesuré à  $10386 \mu\text{m}$  pour le CaB expérimental et à  $10264 \mu\text{m}$  pour le CaB simulé. Nous pouvons observer également que, comparativement à la Figure V.9, l'un et l'autre des codes à barres décrits dans la Figure V.12 présentent un rétrécissement des intervalles entre deux traits, justifiant en cela de leur non-fonctionnalité. Nous pouvons observer que la distance séparant les traits 7 et 8 est réduite de  $250 \mu\text{m}$  à  $213 \mu\text{m}$ .

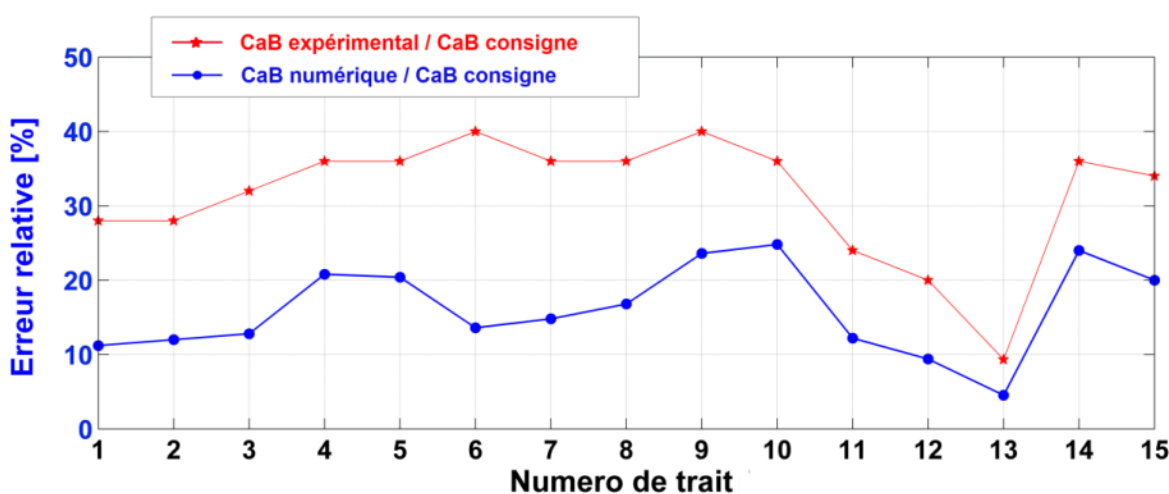


**Figure V.12 – Comparaison graphique des CaB expérimental et numérique  $v=60 \text{ mm.s}^{-1}$   $I_E=15$**

L'erreur relative entre, d'une part, la consigne et le produit expérimental ainsi que, d'autre part, la consigne et le CaB virtuel, a été également calculée sur ce point de fonctionnement



(Figure V.13). Nous pouvons observer qu'il y a adéquation en tendance entre les deux courbes. L'écart maximal observé est de 39% pour la partie expérimentale et de 24% pour la partie numérique. On constate qu'il y a un écart de valeur entre le CaB expérimental tracé et le CaB virtuel. Cela peut s'expliquer par l'approximation faite sur l'ajustement des propriétés thermiques de la tête et de la puissance injectée, réalisée en un point de fonctionnement précis, à savoir pour l' $I_E$  12 (cf. §. III.4.4). Lors de cette étape, nous avons tenté d'approcher les bons jeux de données sans pour autant garantir leur absolue justesse. Dans ces conditions il paraît normal qu'à mesure que nous nous éloignons du dit point de fonctionnement, l'on observe une certaine dérive du modèle. Il n'en demeure pas moins que les tendances comportementales des résultats expérimentaux et numériques sont concordantes et justifient de la confiance que nous accordons à notre modèle.



**Figure V.13 – Calculs d'erreur au point de validation numéro 2 (CaB non fonctionnel)**

### V.3.3. Conclusion

L'analyse comparative des codes à barres expérimentaux et virtuels, dans les deux configurations de paramétrage de l'imprimante, montre que le modèle numérique est fiable, à basse vitesse. Ce résultat montre que le choix du critère d'impression fondé sur la température de fusion de l'encre est pertinent. Cela signifie que le procédé d'impression par transfert thermique est essentiellement piloté par les propriétés du ruban. En effet, l'adéquation des tracés mesurés et calculés est bonne à la vitesse de  $60 \text{ mm.s}^{-1}$  pour des indices énergétiques de 8, soit produisant un CaB lisible, et 15, ce qui génère des défauts rédhibitoires à leur lecture. Les écarts que l'on peut relever sont explicables par les incertitudes liées au système. Ils peuvent être en partie attribués aux incertitudes sur la vitesse de défilement des rubans et supports, ou sur la précision des propriétés de diffusion de la chaleur attribuées à la tête d'impression. Le critère d'impression fondé sur la température de pic de fusion de l'encre pourrait aussi être amélioré en tenant compte par exemple de la vitesse de chauffage du système. Malgré cela, les résultats de cette étape de validation du modèle numérique prouvent la prédominance des aspects thermiques dans la technologie d'impression étudiée. Nous allons pouvoir exploiter les prédictions du modèle

afin de mieux comprendre les phénomènes physiques opérant au cours de l'impression par transfert thermique et tester numériquement l'impact des différents paramètres du système.

## V.4. Étude de l'influence thermique des paramètres du système

### V.4.1. Introduction

Cette étape de notre travail vise à déterminer l'influence des différents paramètres d'entrée du système. Pour mesurer leur effet, nous avons retenu comme observable, la longueur des tracés calculés par le programme d'impression virtuelle. Pour un support donné et un type de ruban, en l'occurrence ceux à base de cire, les facteurs les plus influents ont ainsi pu être révélés. Afin de réduire les temps de calcul, nous avons fait le choix d'exciter thermiquement le système pendant une durée de 1 ms, ce qui correspond au créneau unitaire obtenu à la vitesse de défilement minimale pour un Indice énergétique de 12.

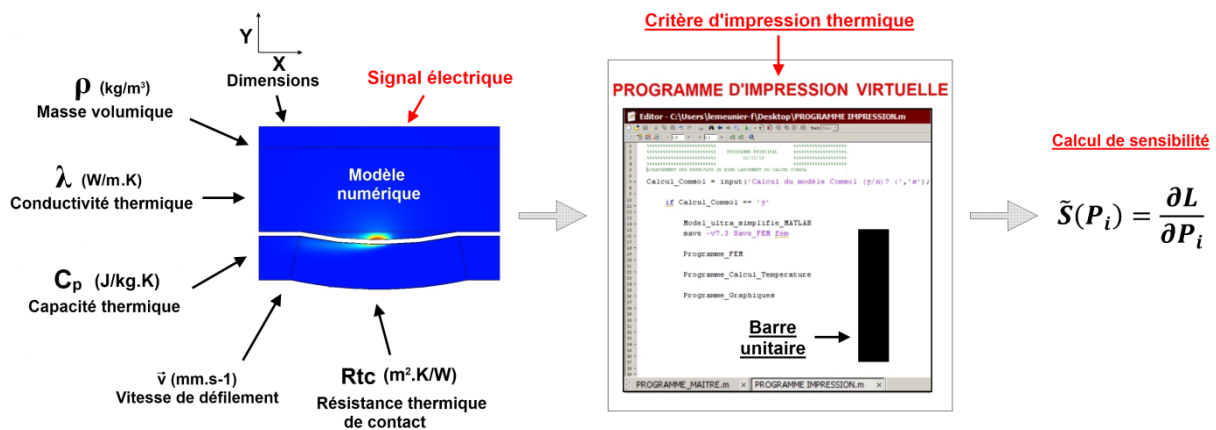


Figure V.14 – Schématisation du processus d'analyse de sensibilité

Afin de s'assurer de la sensibilité du modèle aux variations générées, un pas de temps d'acquisition numérique de faible durée, soit 5  $\mu$ s, a été choisi. Celui-ci conditionne la longueur des éléments de volume servant de base au calcul du CaB virtuel, en l'occurrence 0,306  $\mu$ m (§ V.2.2).

Les paramètres qui ont été testés lors de cette étude sont résumés dans le Tableau V.1. Nous y indiquons leur valeur initiale ainsi que le potentiel de variation associé à chacun d'entre eux. Les pourcentages que nous avons retenus reposent, soit sur des données en provenance des fabricants, par exemple en ce qui concerne l'incertitude sur l'épaisseur du PET, soit sur une appréciation de l'usure du matériel (diminution de l'épaisseur de vernis) ou bien sur une évaluation d'incertitude de mesure (propriétés matière). Nous avons également intégré à cette étude les résistances thermiques de contact opérant entre la tête d'impression et le ruban ( $R_{tc1}$ ) ainsi qu'entre ce dernier et le support d'impression ( $R_{tc2}$ ). Nous avons également pris en considération le potentiel de variation qu'offrait la formulation de nouvelles encres. Nous avons évalué l'effet d'une modification de la composition de ces dernières sur leurs propriétés thermo-physiques.

*Imprimante virtuelle et exploitation du modèle numérique*

Catégorie	Paramètre testé	Désignation	Valeur initiale	Variabilité
Référence	∅	Ref	∅	∅
Énergie	Indice Énergétique	$P_{IE}$	8	
Géométrie	Épaisseur PET	$P_{PET}^{ep}$	4.6 ( $\mu\text{m}$ )	+/- 5%
	Épaisseur Encre	$P_{Encre}^{ep}$	4 ( $\mu\text{m}$ )	+/- 5%
	Épaisseur Papier	$P_{Papier}^{ep}$	60 ( $\mu\text{m}$ )	+/- 15%
	Épaisseur Liner	$P_{Liner}^{ep}$	50 ( $\mu\text{m}$ )	+/- 10%
	Épaisseur vernis	$P_{Verni}^{ep}$	7 ( $\mu\text{m}$ )	+/- 10%
Vitesse de défilement	Vitesse linéaire	$P_v$	61,2 ( $\text{mm.s}^{-1}$ )	+/- 1%
Résistance thermique de contact	Tête d'impression / Ruban	$Rtc\ 1$	$10^{-6}$ ( $\text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$ )	∅
	Ruban / Support	$Rtc\ 2$	$10^{-6}$ ( $\text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$ )	∅
Propriétés matière	Conductivité thermique Encre	$P_{Encre}^{\lambda}$	0,36 ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )	+/- 30%
	Conductivité thermique PET	$P_{PET}^{\lambda}$	0,14 ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )	+/- 5%
	Conductivité thermique Papier	$P_{Papier}^{\lambda}$	0,09 ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )	+/- 10%
	Capacité thermique Encre	$P_{Encre}^{Cp}$	1301 ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )	+/- 30%
	Capacité thermique PET	$P_{PET}^{Cp}$	952 ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )	+/- 5%
	Capacité thermique Papier	$P_{Papier}^{Cp}$	1340 ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )	+/- 10%
	Masse volumique Encre	$P_{Encre}^{\rho}$	1010 ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	+/- 10%
	Masse volumique PET	$P_{PET}^{\rho}$	1040 ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	+/- 5%
	Masse volumique Papier	$P_{Papier}^{\rho}$	1160 ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	+/- 10%
	Diffusivité thermique Verre	$P_{Verre}^{\alpha}$	$5,38 \cdot 10^{-7}$ ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ )	+/- 20%

**Tableau V.1 – Analyse de sensibilité – Paramètres testés**

Afin de calculer la sensibilité du modèle aux paramètres d'entrée présentés ci-dessus, une variation de +50% a été imposée alternativement à chacun d'entre eux sauf en ce qui

concerne la durée du créneau d'énergie suppléé au système. La variation imposée à ce paramètre correspond dans ce cas précis, à une augmentation de 5 points d'indice énergétique, ce qui représente une augmentation de 30% de l'énergie suppléée au système.

#### V.4.2. Résultats de l'analyse de sensibilité

Dans cette partie, nous présentons dans un premier temps les résultats de l'analyse des sensibilités telles que calculées selon l'équation (V-2). Ces sensibilités sont exprimées en m par unité (Up) du paramètre testé.

$$\tilde{S}(P_i) = \frac{\partial L}{\partial P_i} \quad [m. Up^{-1}] \quad (V-2)$$

La Figure V.15 présente les paramètres pour lesquels une augmentation de la valeur génère une diminution du tracé calculé, tandis que la Figure V.16, présente l'inverse, soit les paramètres pour lesquels une augmentation de la valeur génère une augmentation de la longueur du tracé.

Nous constatons que pour nombre des paramètres testés, une variation positive de la valeur qui leur a été initialement attribuée, génère une diminution de la longueur de code à barres. Les paramètres concernés sont relatifs aux données dimensionnelles du système, à la vitesse de défilement des rubans et supports ainsi qu'à certaines propriétés thermo-physiques ayant trait au Papier, à l'encre et au PET. Seules les conductivités thermiques de ces deux derniers, génèrent une augmentation de la longueur du tracé. Nous pouvons également remarquer que le modèle n'est pas sensible aux paramètres liés aux épaisseurs des deux couches constitutives du support d'impression, le papier et le liner. Enfin, nous pouvons voir que la résistance thermique de contact présente à l'interface entre la tête d'impression et le ruban minore le flux d'énergie traversant le ruban, réduisant ainsi le tracé.

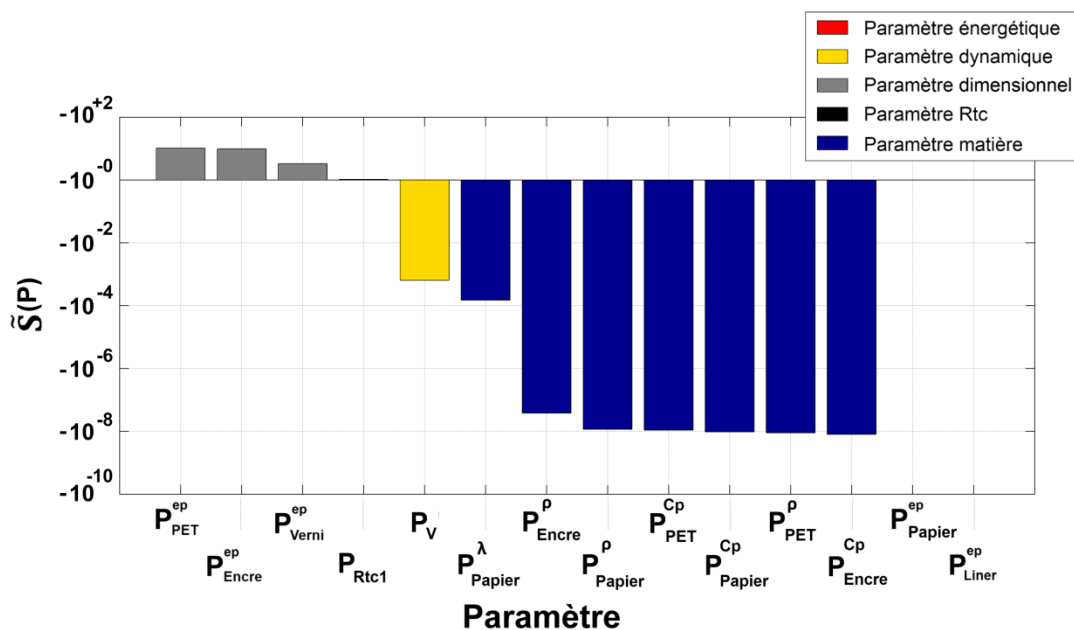
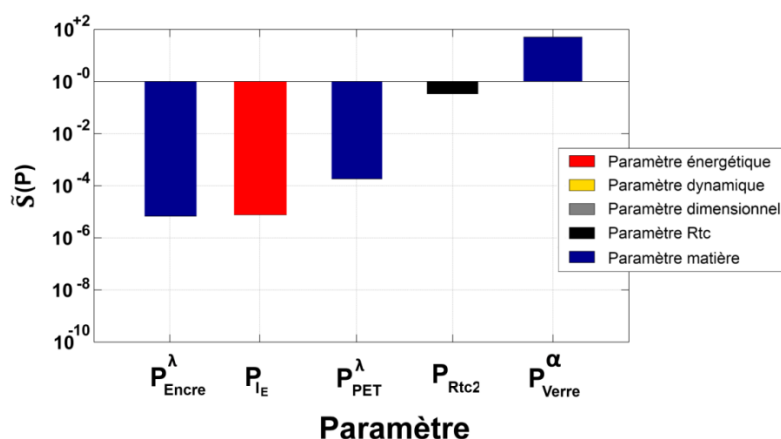


Figure V.15 – Paramètres responsables d'un raccourcissement du tracé

La Figure V.16 présente pour sa part, les paramètres entrainant un allongement du code à barres. Nous retrouvons les conductivités des encres et PET évoquée précédemment ainsi que le paramètre lié à la quantité d'énergie injectée dans le système. Nous pouvons également observer l'influence d'une augmentation de la résistance thermique de contact qui limite le flux de chaleur évacué dans le support, générant ainsi une augmentation de la température de l'encre. Enfin, nous remarquons que l'augmentation de la diffusivité thermique du matériau constitutif du dot génère un allongement du tracé. Cela montre qu'une modification de la fabrication des têtes d'impression peut avoir un effet important sur les performances finales des produits fabriqués par l'industriel et expliquer des variations observées en situations d'entreprise sur des équipements existants.



**Figure V.16 – Paramètres responsables d'un allongement du tracé**

De plus, les sensibilités réduites décrites ci-dessus recourent la notion industrielle de « sensibilité d'impression » que l'on attribue à un ruban. On la décrit comme sa faculté à imprimer à bas Indices Énergétiques. Cette notion est importante dans la mesure où les niveaux de température atteints conditionnent la durée de vie des têtes d'impression. De plus, la limitation du flux de chaleur traversant le dos ainsi que le PET réduit les risques de rupture du ruban ainsi que les phénomènes d'encrassement de la tête d'impression<sup>6</sup>. D'un point de vue fonctionnel, il est préférable pour ces raisons de favoriser les éléments susceptibles de conférer au ruban final une meilleure sensibilité d'impression. La Figure V.15 et la Figure V.16 présentent l'intérêt de donner les tendances comportementales du système d'impression et permettent de mieux cerner les leviers d'action dont disposent les formulateurs chimistes de l'entreprise pour générer un effet désiré. On comprend, par exemple, que pour accroître la sensibilité d'impression d'un ruban, on peut réduire les épaisseurs des matériaux constitutifs du ruban, augmenter les valeurs des diffusivités thermiques du PET et de l'encre ou bien influencer sur les résistances thermiques de contact, en d'autres termes, sur la pression.

Ces informations sont cependant incomplètes dans la mesure où elles ne représentent que des tendances. La Figure V.17 reprend les sensibilités réduites décrites précédemment

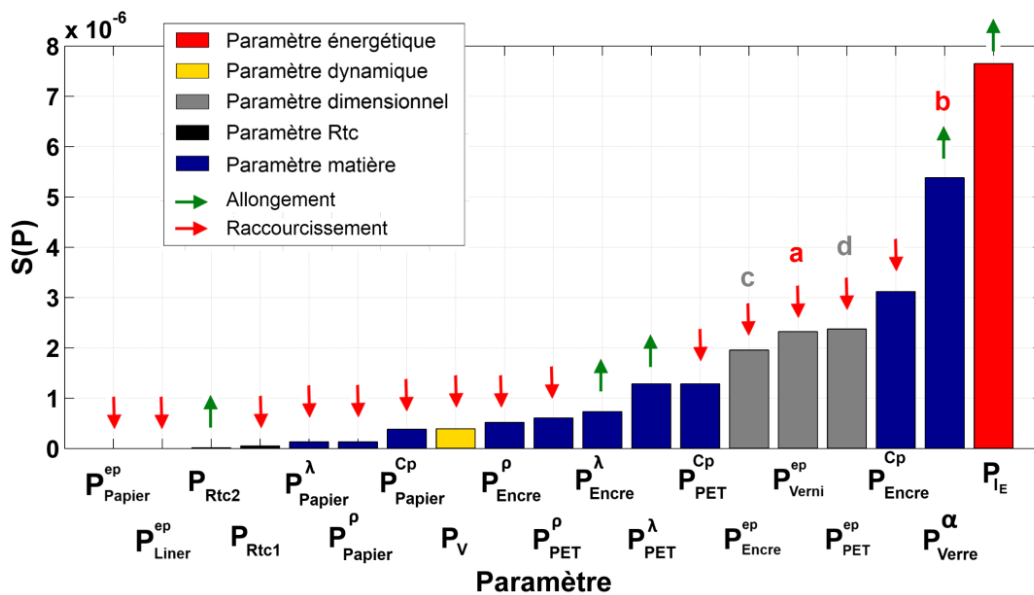
<sup>6</sup> LECHANTRE, J., spécialiste des tête d'impression par transfert thermique - Société ARMOR, 2015.

pondérées du potentiel de variation estimé pour chacun d'entre eux (cf. Tableau V.1). Elles sont calculées selon l'équation (V-3).

$$S(P_i) = \frac{\partial L}{\partial P_i} * var(P_i) [m] \quad (V-3)$$

L'expression des sensibilités réduites, que nous qualifierons de pondérée, permet de hiérarchiser les leviers d'action dont dispose l'industriel et de déterminer ceux sur lesquels il pourra jouer préférentiellement pour influencer sur la sensibilité d'impression du ruban final.

Parmi les paramètres testés, certains ne lui sont cependant pas accessibles. L'industriel ne pourra donc pas influencer directement sur ceux-ci. La lecture de la Figure V.17 pourra permettre néanmoins de mieux comprendre l'origine de phénomènes observés dans l'entreprise ou tout du moins d'en proposer une explication. Par exemple, on comprend que le développement par un fabricant, de nouvelles tête d'impression, intégrant potentiellement une profondeur de micro-source de chaleur différente ou bien, des matériaux avec des propriétés thermo-physiques différentes (Figure V.17 a et b), sera susceptible de générer une modification du comportement d'un ruban d'impression. Les anciennes préconisations d'utilisation de ce dernier, en matière de réglage de l'indice énergétique, deviendront donc caduques et devront faire l'objet de nouvelles investigations au regard du nouveau matériel mis en œuvre.



**Figure V.17 – Sensibilité en fonction du potentiel de variation des paramètres d'entrée du modèle – Variation positive**

La Figure V.17 révèle également que parmi les leviers d'action préférentiels sur lesquels l'industriel peut jouer afin de modifier la sensibilité des rubans d'impression, se distinguent les épaisseurs des couches de PET et d'encre (Figure V.17, c et d). Nous comprenons donc au regard de la figure présentée que l'industriel a intérêt à utiliser les capacités de ces deux paramètres. Réduire les épaisseurs de l'une ou l'autre de ces couches permettra d'augmenter la sensibilité des rubans et donc d'en tirer les bénéfices évoqués plus amont, en matière de protection de la tête. Cela permettra également, à diamètre de bobine égal,

d'augmenter le métrage de ruban et donc constituera un argument commercial. Cependant, ce faisant, l'industriel se heurtera à d'autres considérations sous forme de limites, liées notamment à la résistance mécanique du ruban dans le cas d'une diminution de l'épaisseur de PET ou bien à des problèmes de noirceur du dépôt d'encre dans le cas d'une diminution de l'épaisseur de cette dernière couche. Cette information en matière de sensibilité implique également qu'il devra porter une attention particulière aux fournisseurs de PET.

Outre les paramètres dimensionnels, ainsi que ceux liés à la tête d'impression, nous observons que les propriétés thermo physiques de l'encre et du PET sont importantes.

Concernant le polyéthylène téréphtalate, les poids relatifs de ces différentes propriétés, les unes par rapport aux autres, vont s'exprimer par les valeurs d'effusivité et de diffusivité thermiques. Elles vont influencer sur la capacité du PET à capter l'énergie produite par la tête d'impression ainsi que sur sa faculté à transmettre rapidement cette énergie à la couche encrée. Malgré le rôle capital de cette couche, elle ne constitue pas véritablement un levier d'action de l'industriel sur la sensibilité de ses produits. Il ne peut adapter les propriétés des rubans de PET qu'au travers du choix des spécialités proposées par le marché.

Au regard de l'encre, nous pouvons observer que le principal levier dont dispose l'industriel pour moduler la sensibilité du ruban, est la capacité thermique de cette couche. La Figure V.17 montre que, pour une valeur de pic de fusion constante, l'augmentation de la ligne de base de la courbe représentative de la capacité thermique entraîne une baisse de sensibilité du ruban d'impression. Cela signifie qu'un moyen efficace d'en augmenter la valeur consisterait à abaisser la température de pic de fusion de l'encre et conjointement à réduire la valeur de son enthalpie.

Enfin, la Figure V.17 montre que, dans la limite de la variabilité que nous lui avons attribuée, le choix du support d'impression ne constitue pas un levier influant de façon importante sur les niveaux de température atteints dans la couche encrée et donc sur l'impression. Cependant, les constats des spécialistes de l'entreprise fabriquant les rubans ne vont pas dans ce sens puisque l'on sait que, pour des propriétés thermo physiques proches, le choix des différents supports sera fortement impactant sur la qualité d'écriture. Cela signifie que d'autres phénomènes physiques sont à l'œuvre dans le procédé d'impression par transfert thermique, la condition de fusion de l'encre apparaissant comme étant nécessaire mais pas suffisante pour justifier de la qualité du transfert.

### V.4.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit la méthode par laquelle nous avons abouti à la création d'un observable numérique permettant d'analyser le procédé d'impression par transfert thermique. Nous avons créé cet observable en passant d'une description eulérienne du transfert de chaleur telle que décrite dans le Chapitre IV, à une description lagrangienne du problème. Nous avons abouti à la création d'un code à barres numérique constitué d'une suite d'éléments de volumes auxquels nous avons assigné une condition d'impression fondée sur la température de pic de fusion de l'encre. Cette démarche a été validée en comparant les résultats du calcul numérique avec les impressions physiques obtenues pour deux Indices Énergétiques différents, l'un codant un tracé fonctionnel, l'autre un tracé non-fonctionnel. Nous avons ainsi pu montrer que cet approche permettait de modéliser

correctement le procédé d'impression par transfert thermique, tout du moins pour un couple ruban/support constitué pour le premier d'une encre à base de cire et pour le second d'un papier vélin.

A partir de cet outil, nous avons réalisé une analyse de sensibilité du premier degré des paramètres les plus influents du modèle. Nous avons ainsi pu révéler les tendances comportementales générales du système vis-à-vis d'une variation positive des dits paramètres. Nous avons également intégré à cette première étude le potentiel de variation auquel l'industriel pouvait recourir. Cela nous a permis de hiérarchiser l'importance des leviers d'action dont il disposait. Cette étude nous a permis de montrer notamment que le choix du PET devait faire l'objet d'attentions particulières dans la mesure où il conditionnait le transfert de chaleur de la tête d'impression vers la couche encrée. Du point de vue de l'encre, nous avons montré que le paramètre offrant le plus de possibilité d'action était la capacité thermique et que c'est elle qui en grande partie conditionnait la sensibilité thermique du système. Enfin, nous avons révélé que la conformation technique des têtes d'impression (l'épaisseur de recouvrement des micro-sources de chaleur, les propriétés thermo physiques du dot) était de forte influence sur le comportement thermique du ruban et pouvait expliquer dans certains cas, les observations effectuées par l'industriel quant à des modifications des performances de ses produits.

Cependant, les formulateurs chimistes seront confrontés au fait qu'il est difficile de modifier une propriété thermo-physique sans en affecter une autre. Il est clair que la transposition du domaine virtuel au domaine physique ne sera pas sans poser problème, notamment du point de vue de l'encre et qu'elle devra faire l'objet de travaux ultérieurs. En effet, il serait hasardeux d'anticiper le comportement thermique d'un mélange de différentes cires au regard des propriétés thermiques de ses différents constituants (Figure II-24). Des interactions chimiques entre les différentes molécules du mélange peuvent générer l'apparition de nouvelles propriétés thermiques non anticipables d'un point de vue quantitatif et qualitatif uniquement à partir des seules propriétés des constituants pris séparément.

Cette étape franchie, il convient de continuer à développer l'approche numérique du modèle proposé d'impression par transfert thermique afin de fiabiliser nos résultats et extraire des informations supplémentaires destinées à mieux maîtriser le procédé industriel étudié.



# Conclusion et perspectives

Dans un contexte d'impression de motifs de plus en plus complexes associés à des contraintes de production fortes en termes de temps et de qualité, ce travail avait pour objectif d'investiguer le procédé d'Impression par Transfert Thermique. Notre premier objectif était de comprendre, sous un aspect thermique, les différentes composantes de ce système et d'en proposer un modèle numérique qui permette de définir un critère procédé témoignant de la qualité d'impression.

Pour répondre à ces objectifs, une première étape a consisté à déterminer le modèle d'imprimante étudié ainsi que les rubans et supports receveurs. Il nous a fallu faire un choix entre différentes technologies, en prenant en compte aussi bien la conformation géométrique des têtes d'impression, les dimensions des micro-sources de chaleur à l'origine des impulsions thermiques, l'accessibilité des microsystèmes en prévision des mesures, etc.

Dans un second temps nous avons procédé à l'analyse de ce système. Nous nous sommes intéressés aux dimensions des dots, à leur nature chimique, à l'architecture du signal électrique à l'origine des impulsions thermiques délivrées au ruban et au comportement dynamique du système. Ces informations ont pu être collectées grâce à des observations par Microscopie Électronique à Balayage, à une analyse EDX, à l'acquisition de données à haute fréquences et à l'instrumentation de l'imprimante choisie.

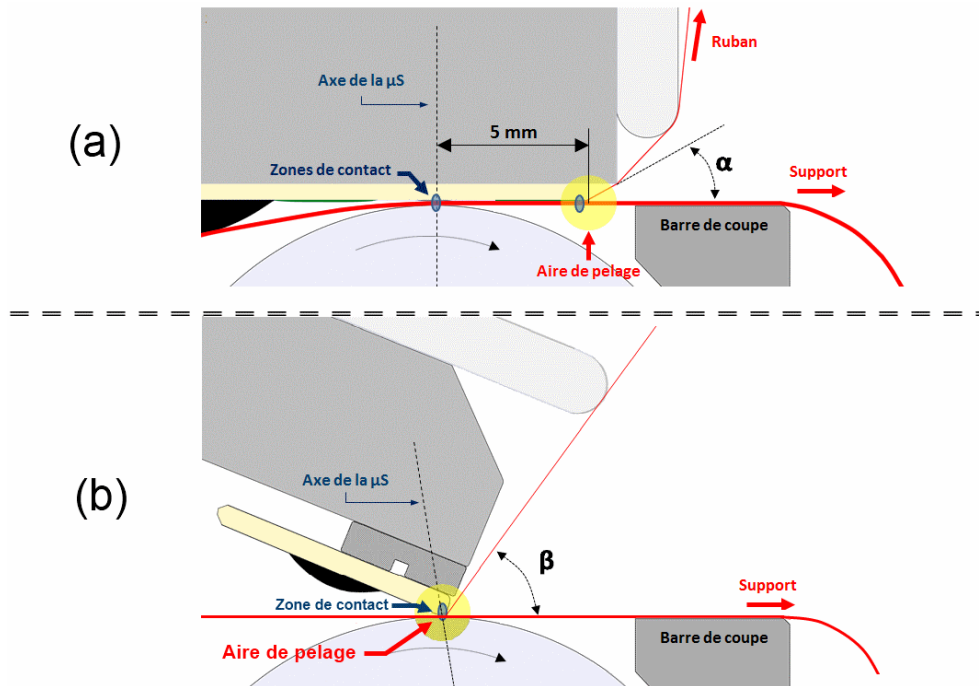
À partir de ces données, nous avons développé un modèle thermique bidimensionnel du procédé d'impression par transfert thermique. Celui-ci a été validé par comparaison des températures calculées avec des données expérimentales obtenues lors de deux campagnes de mesures. La première avait pour objectif de contrôler la fiabilité du modèle de la tête d'impression et d'en ajuster les paramètres thermo physiques et de puissance. Les mesures de températures en surface, au centre des dots, ont été obtenues par thermographie infra-rouge à l'aide d'une caméra thermique à haute résolution et haute fréquence. La seconde campagne de mesure avait pour but de valider le modèle global incluant les rubans et supports en condition de défilement. Les mesures, dans ce cas, ont été obtenues à l'aide de thermocouples fixés directement sur les micros sources de chaleur. Compte tenu de la nature intrusive de cette instrumentation, nous avons utilisé les données en température collectées afin de valider la tendance comportementale de notre modèle. Malgré les difficultés rencontrées tant d'un point de vue expérimental que numérique, nous avons in fine abouti à un modèle bidimensionnel représentatif du procédé d'impression par transfert thermique suffisamment fiable pour permettre son analyse. Celui-ci a permis de réaliser un premier travail d'analyse afin de mieux comprendre le transfert de la chaleur de la tête d'impression vers le ruban.

L'ultime étape de ce travail a consisté à développer un programme de post-traitement des données en température calculées par le modèle numérique. Nous sommes ainsi passés d'une description eulérienne du système à une description lagrangienne du transfert de chaleur dans le ruban. Cela nous a permis de définir un critère d'impression fondé sur la température de fusion de l'encre et finalement d'obtenir un code à barres virtuel. L'analyse de sensibilités menée sur les paramètres d'entrée du modèle montre que si des tendances

sont observées, il reste encore trop d'incertitude à ce jour pour se prononcer sur la possibilité du modèle à prévoir les bavures ou autres défauts induits. Des tests numériques supplémentaires pourraient être menés pour s'en assurer ou bien proposer des pistes d'amélioration du modèle.

Toutefois, la représentation numérique du procédé industriel d'impression par transfert thermique que nous avons développée tient compte des caractéristiques spécifiques de ce système multi échelles et multi composants ainsi que des temps de réponse très courts. Cependant, force est de constater que les difficultés de convergence du modèle sont réelles et les temps de calculs très longs. Ceci induit des limites aux tests que l'on peut réaliser, tant du point de vue de la taille des motifs que l'on souhaite simuler que de leur nombre. Avant d'en envisager la complexification, par exemple par l'introduction de couches de matériaux supplémentaires, des travaux de développement ultérieurs devront être menés afin d'en assouplir l'utilisation. D'autre part, il faut admettre que le modèle que nous avons développé n'est peut-être valide que dans le cas de couples de rubans et papier de type « encre fusible/support poreux ». En effet, nous pouvons faire l'hypothèse que l'adhésion de l'encre cire sur le papier vélin tels que nous les avons choisis, est principalement pilotée par des contingences thermomécaniques. On peut imaginer que, ne serait-ce que sous l'effet de la pression, l'encre parvenue à l'état liquide est contrainte à être absorbée par ce type de papier par nature très poreux. Après refroidissement, on peut supposer que l'intrication de ces deux matériaux justifie à elle seule l'impression d'un motif, au-delà des considérations liées à leur affinité chimique. Il se pourrait donc que le modèle que nous avons proposé soit limité aux impressions dont le ressort principal d'adhésion est de nature thermomécanique. Le critère d'impression tel que nous l'avons défini deviendrait alors une condition nécessaire mais pas suffisante de l'impression.

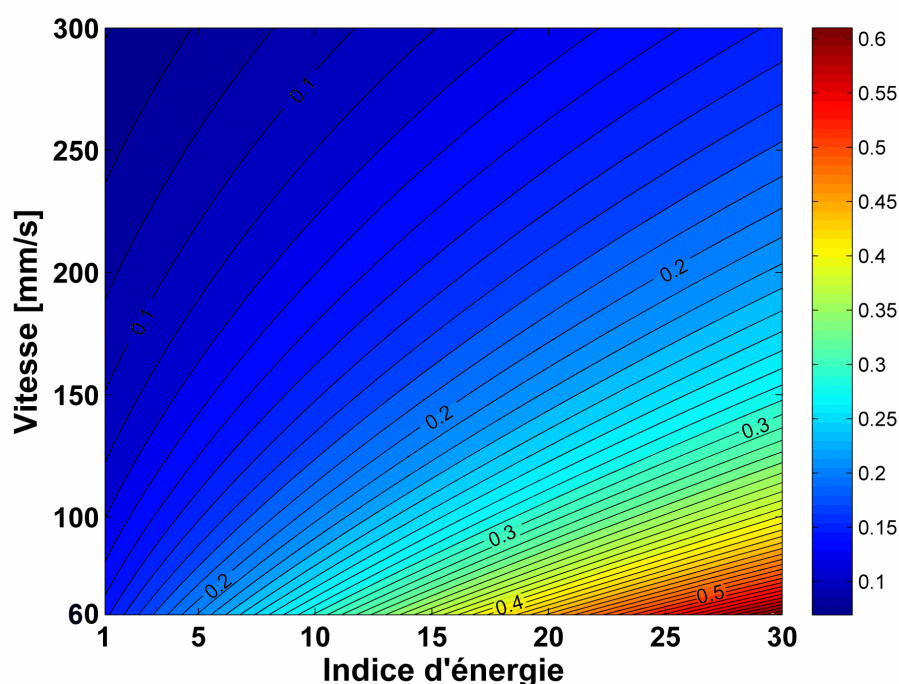
Pour autant, au-delà de la problématique de la modélisation du transfert de chaleur, cette thèse a permis de nourrir la réflexion de l'industriel quant à son procédé technique et offre des perspectives de recherche. Par exemple, de nos travaux numériques ressort que la zone de transfert de chaleur entre la tête d'impression et le ruban est concentrée sur les dots, au niveau des micro-sources de chaleur. Dans un contexte où nous avons montré que les industriels fabricant de tête d'impression minimisaient la surface de contact entre celle-ci et le ruban, une telle information a permis de comprendre que la différence entre les technologies de type « corner edge » ou « flat head » (Figure II-4 - Figure II-5), ne résidait pas uniquement dans le transfert de la chaleur.



**Figure C.1 – Aspects thermomécaniques dans les procédés d'impression de type « flat head » (a) et « corner edge » (b)**

Dans le cas de têtes d'impression « flat head » (Figure C.1 a), la distance séparant les dots de l'aire de pelage est de 5 mm et l'angle obtenu par rapport au support est approximativement de 30°. Dans le cas de tête « corner edge » (Figure C.1 b), la distance de séparation est nulle et l'angle est de 50°. On peut donc supposer que les conditions de pelage sont différentes tant d'un point de vue thermique que géométrique. La chimie des encres utilisées pour répondre aux applications auxquelles elles sont dédiées, devra être adaptée de ce point de vue.

Il ressort également de ces travaux que d'autres pistes pourraient être explorées et pourraient servir d'aide à la compréhension sous un jour énergétique du procédé d'impression par transfert thermique. Nous avons effectivement montré au cours de ces travaux qu'il était possible de déterminer le niveau d'énergie délivré par les micro-sources de chaleur en fonction de l'Indice Énergétique choisi et de la vitesse prise en compte (Figure C.2). Il pourrait être intéressant de voir s'il y aurait des enseignements à tirer de la corrélation de ces mesures avec les préconisations d'utilisation du fabricant de ruban d'impression. De tels travaux pourraient permettre de mettre en évidence l'existence de tendances communes à des encres de même nature ou bien à des couples rubans/supports. Si tel était le cas, ils pourraient peut-être permettre de détecter des éléments hors norme qu'il conviendrait alors d'exploiter en termes d'acquisition de connaissance.



**Figure C.2 – Energie délivrée par les micro-sources de chaleur**

Enfin, d'autres axes de recherche pourraient être entrepris du point de vue de la modélisation numérique. En effet, le modèle bidimensionnel que nous avons développé est uniquement représentatif du transfert de chaleur opérant dans le sens parallèle au sens de déplacement des rubans et supports. Il ne permet donc pas de modéliser les effets thermiques apparaissant lors de l'écriture de codes à barres à 0° (Codes à barres positionnées dans le sens de défilement des rubans et supports d'impression). Il pourrait être intéressant de développer un modèle tridimensionnel du système d'impression que nous avons étudié. Un tel développement permettrait, par exemple, de réfléchir du point de vue de la diffusion de la chaleur, à l'influence potentielle de la cristallinité des différents PET ainsi que celle de l'orientation des chaînes moléculaires les constituant sur l'impression par transfert thermique. Il s'agirait alors de s'interroger sur la notion d'anisotropie des propriétés thermiques des supports en polyéthylène. De telles investigations permettraient peut-être d'expliquer d'un point de vue thermique, des modifications de performances observées par l'industriel fabricant les rubans suivant les différents supports PET considérés. En effet, celles-ci pourraient justifier de variation dans un plan XY, du transfert de chaleur de la tête d'impression vers la (les) couche (s) fusible(s).

Les quelques pistes proposées pour prolonger les travaux présentés, ne sont pas exhaustives. D'autres seraient très certainement envisageables. Cependant, il ne faut pas méconnaître les difficultés inhérentes au procédé industriel étudié. Derrière la banalité que peut représenter l'impression d'un simple code à barres, se cache un procédé complexe, aux abords scientifiques multiples et pour certains, encore mal connus.

# BIBLIOGRAPHIE

1. atscan. [cited 2014; Available from: <http://www.atscan.com/atscan-le-guide-du-code-barre-2.asp>.
2. *Le code à barre*. 2015; Available from: <http://www.cerig.pagora.grenoble-inp.fr/memoire:rfid.htm>.
3. Whitaker, J.C., *The Electronics Handbook*. 1996: Taylor & Francis.
4. Kipphan, H., *Prepress*, in *Handbook of Print Media*, H. Kipphan, Editor. 2001, Springer Berlin Heidelberg. p. 449-578.
5. Bradbury, R., *Chapter 2 - Thermal Transfer Printing*, in *Colorants for Non-Textile Applications*, H.S.F.T. Peters, Editor. 2000, Elsevier Science: Amsterdam. p. 35-60.
6. *Fonctionnement d'une imprimante laser monochrome*. 2015; Available from: <http://www.imprimante.biz/doc/fonctionnement-imprimante-laser.html>.
7. *Thermal printing*. 2015; Available from: [http://en.wikipedia.org/wiki/Thermal\\_printing](http://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_printing).
8. Freeman, H.S. and A.T. Peters, *Colorants for Non-Textile Applications*. 2000: Elsevier Science.
9. Sanders, D.J., *Heat conduction in thermal transfer printing*. Canadian Journal of Chemistry, 1985. **63**(1): p. 184-188.
10. Hibino, I., *Study of high definition full color imaging to plain paper by thermal transfer printing*. The Journal of imaging science and technology, 2003. **47**: p. 379-387.
11. Davids, D.A. and H.L. Bertoni, *Measurement of temperature response in thermal-transfer printing*. Proceedings of the society for information display, 1986. **27**: p. 59-65.
12. Drees, F., et al. *Performances of thermal transfer printing and their improvement by model calculations*. in *CompEuro '89., 'VLSI and Computer Peripherals. VLSI and Microelectronic Applications in Intelligent Peripherals and their Interconnection Networks', Proceedings*. 1989.
13. Uyhan, R. and J.A. King-Hele, *Modelling of thermal printers*. Applied Mathematical Modelling, 2008. **32**(4): p. 405-416.
14. Nitta, I. and T. Hirotooshi, *Analysis of contact pressure acting on a thermal print head of a thermal transfer printer*. Machine Design and Tribology Division Meeting in JSME, 2003. **3**: p. 173-174.
15. Nitta, I., et al., *Measurement of real contact area on thermal print head using a laser microscope with a wide field of view*. Tribology International, 2014. **79**(0): p. 162-173.
16. Moroney, N.M. and J.A.S. Viggiano, *Color Imaging Using Variable Dot Thermal Wax Transfer*, in *Color Science, Systems and Applications*, T.S.f.I.S.a. Technology, Editor 1994: Rochester, NY. p. 167-169.

17. Chen, Y.-M. and J.-S. Shie, *Feasibility study on a contact-less direct thermal printing with electrothermal SPICE simulation*. Sensors and actuators. A, Physical, 2001. **88**: p. 93-103.
18. Gamme Zebra Xi documentation. <http://www.zebra.com/fr/fr/products-services/printers/printer-type/industrial/xi-series.html>.
19. Documentation Logiciel Bartender [http://www.seagullscientific.com/label-software/brochures/bartenderbrochure\\_francais.pdf](http://www.seagullscientific.com/label-software/brochures/bartenderbrochure_francais.pdf).
20. Horiuchi, H., et al., *Thermal print head*, 2002, Google Patents.
21. Yamade, T. and N. Kanei, *Thermal print head*, 2011, Google Patents.
22. Documentation Kyocera. <http://global.kyocera.com/prdct/printing-devices/thermal-printheads/tec/>.
23. Park, J.H. and Y.S. Oh, *Investigation to minimize heater burnout in thermal thin film print heads*. Microsystem Technologies, 2005. **11**(1): p. 16-22.
24. Park, J.-H. and H.-C. Choi, *FEM analysis of multilayered MEMS device under thermal and residual stress*. Microsystem Technologies, 2005. **11**(8-10): p. 925-932.
25. Nolde, K. and M. Morari, *Modeling and Control of Thermal Printing*. Vol. 18. 2010, New York, NY, ETATS-UNIS: Institute of Electrical and Electronics Engineers. 9.
26. Sanders, D.J. and R.C. Forsyth, *Measurement of thermal conductivity and contact resistance of paper and thin-film materials*. Review of Scientific Instruments, 1983. **54**(2): p. 238-244.
27. Jacky, R., *Microscopie électronique à balayage Images, applications et développements*. Techniques de l'ingénieur Techniques d'analyse par imagerie, 2013. **base documentaire : TIB387DUO**(ref. article : p866).
28. Zhou, Q., et al., *Fast response integrated MEMS microheaters for ultra low power gas detection*. Sensors and Actuators A: Physical, 2015. **223**(0): p. 67-75.
29. Bernard, J. and K. Miroslav, *Étude des métaux par microscopie électronique en transmission (MET) Analyse chimique locale*. Techniques de l'ingénieur Essais métallographiques des métaux et alliages, 2008. **base documentaire : TIB343DUO**(ref. article : m4136).
30. Lima, M.M.R.A., et al., *Structural, electrical and thermal properties of borosilicate glass–alumina composites*. Journal of Alloys and Compounds, 2012. **538**(0): p. 66-72.
31. Bergman, T.L. and F.P. Incropera, *Introduction to Heat Transfer*. sixth ed. 2011, New-York: John Wiley & Sons.
32. Bouras, N., et al., *Thermal and mechanical characterization of borosilicate glass*. Physics Procedia, 2009. **2**(3): p. 1135-1140.
33. Lahmar, A., et al., *Experimental investigation on the thermal contact resistance between gold coating and ceramic substrates*. Thin Solid Films, 2001. **389**(1–2): p. 167-172.

## BIBLIOGRAPHIE

34. Frank, B., et al., *Ellipsométrie Instrumentation et applications*. Techniques de l'ingénieur Métrologie optique et photonique, 2003. **base documentaire : TIB143DUO**(ref. article : r6491).
35. *Coating thickness measurement instruments*. Metal Finishing, 2000. **98**(2): p. 49.
36. *Accurate measurement and evaluation of coating thicknesses*. JOT-International Surface Technology, 2011. **4**(2): p. 73-74.
37. Vincent, R., *3-D modelling and simulation of fibrous network in view of predicting its physical properties*, 2006, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG.
38. Lopes, C.M.A. and M.I. Felisberti, *Thermal conductivity of PET/(LDPE/Al) composites determined by MDSC*. Polymer Testing, 2004. **23**(6): p. 637-643.
39. Mark, J.E., *Physical properties of polymers handbook*. 1996: Springer.
40. Chaussy, D. and Guérin, D, *Calandrage des papiers Paramètres de calandrage et propriétés des papiers*. Techniques de l'ingénieur Usinage des matériaux non métalliques, 2009. **base documentaire : TIB192DUO**(ref. article : bm7411).
41. Baker, R.J., *CMOS: circuit design, layout, and simulation*. Vol. 18. 2011: John Wiley & Sons.
42. Kyocera. *Documentation Kyocera*. 2015 [cited 2015; Available from: <http://global.kyocera.com/prdct/printing-devices/thermal-printheads/tec/>].
43. G. Gaussorgues, *La thermographie infrarouge : principes, technologies, applications*. Ed. Tec&doc ed. 1999.
44. Pajani, D., *Mesure par thermographie infrarouge*. ADD editeur ed. 1989.
45. Fillit, C., *Développement d'un banc de thermographie infrarouge pour l'analyse in-situ de la fiabilité des microsystèmes*, 2011.
46. Incropera, F. and D. DeWitt, *Introduction to Heat Transfer - 5th edition*. 2005: John Wiley and Sons.
47. Ozisik, N., *Inverse Heat Transfer: Fundamentals and Applications*. 2000: Taylor & Francis.







## Annexe 2 : Spécification Caméra Infrarouge FLIR



FLIR SC-SERIES

# FLIR SC7500-MB

State-of-the-art Infrared Systems For R&D And Thermography Applications

## Technical Specifications

Feature List For SC7500-MB	
Sensor type	InSb
Waveband	1.5 - 5.1 $\mu\text{m}$
Pixel Resolution	320 x 256
Pitch	30 $\mu\text{m}$
Aperture	F/3
Cooler	Close-cycle (rotary) stirling cooler
Sub array windowing	User defined size arbitrary location
Frame rate	1 Hz to 380 Hz Full Frame
Frame rate in subwindow mode	Max. 28 800 Hz with 64x4 pixels
Integration time	1 $\mu\text{s}$ to 20 ms programmable (250ns step) ITR

Optical Specifications	
Optical interface	M80 Thread Optional Janos Interface Optional Motorized Interface

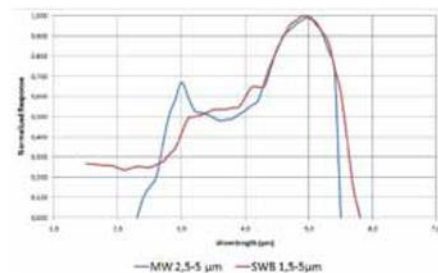
Measurement	
Temperature calibration range	-20 °C to 3000 °C in single ranges or in extended mode
Temperature measurement accuracy	$\pm 1^\circ\text{C}$ or $\pm 1\%$
NETD	<25 mK (20 mK typical)
Filter wheel	4 slots for 2x1" filter 1 mm thick
CNUC™ and Hypercal™	Yes

Timing & Signals	
Analogue video	PAL or NTSC, S-Video & composite
Digital video	CAMLINK / GigE
Trigger input / output	LVTTL (3.3V) Signal Programmable Delay & Active level Ultra low Jitter
Trigger jitter	< 200 ns
Analogue signal inputs	1 x (-5 to 5 V) + 2 x (0 to 10 V)

Physical Specifications	
Size (with 27 mm lens) (LxWxH)	253x130x168 mm
Weight (with 27 mm lens)	4.950 Kgs
Operational temperature	-20 °C / +55 °C
Shock	Operational 25G, IEC 68-2-29
Vibration	Operational 2G, IEC 68-2-26
Input voltage	12 VDC
Power consumption (cooldown / stab)	30 W / 25 W

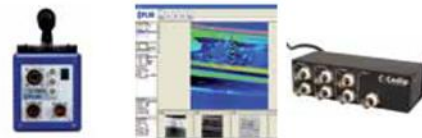
Optional Lenses	FOV	MW 2.5-5 $\mu\text{m}$	SWB 1.5-5 $\mu\text{m}$
12 mm	44° x 36°	Yes*	
25 mm	22° x 17°	Yes*	
27 mm	20° x 16°		Yes*
50 mm	11° x 8.8°	Yes*	Yes*
100 mm	5.5° x 4.4°	Yes	Yes
200 mm	2.7° x 2.2°	Yes	Yes
Microscope lens X1	9.6 x 7.2 mm	Yes*	
Microscope lens X3	3.2 x 2.4 mm	Yes*	
Lens Extenders			
Janos lenses compatibility			

\* Motorized Lens Interface Compatible



Typical Camera Spectral Sensitivity

## Accessories



Optional Industrial Grade Connectors & Cables

Thesa software - Lockin / Stress Analysis

USB record triggering rack

### Also available :

- Altair radiometric software
- Software development Kit (C++ / Labview)
- Factory Temperature Calibration
- Spectral filters
- Battery pack for up to 4 hours autonomy
- Industrial Grade Connectors & Cables
- Motorized Lens Interface with Autofocus

### Annexe 3 : Méthode d'ajustement des paramètres

Dans cette annexe est résumée la méthode utilisée pour recalculer les paramètres du modèle (Figure AIII-1).

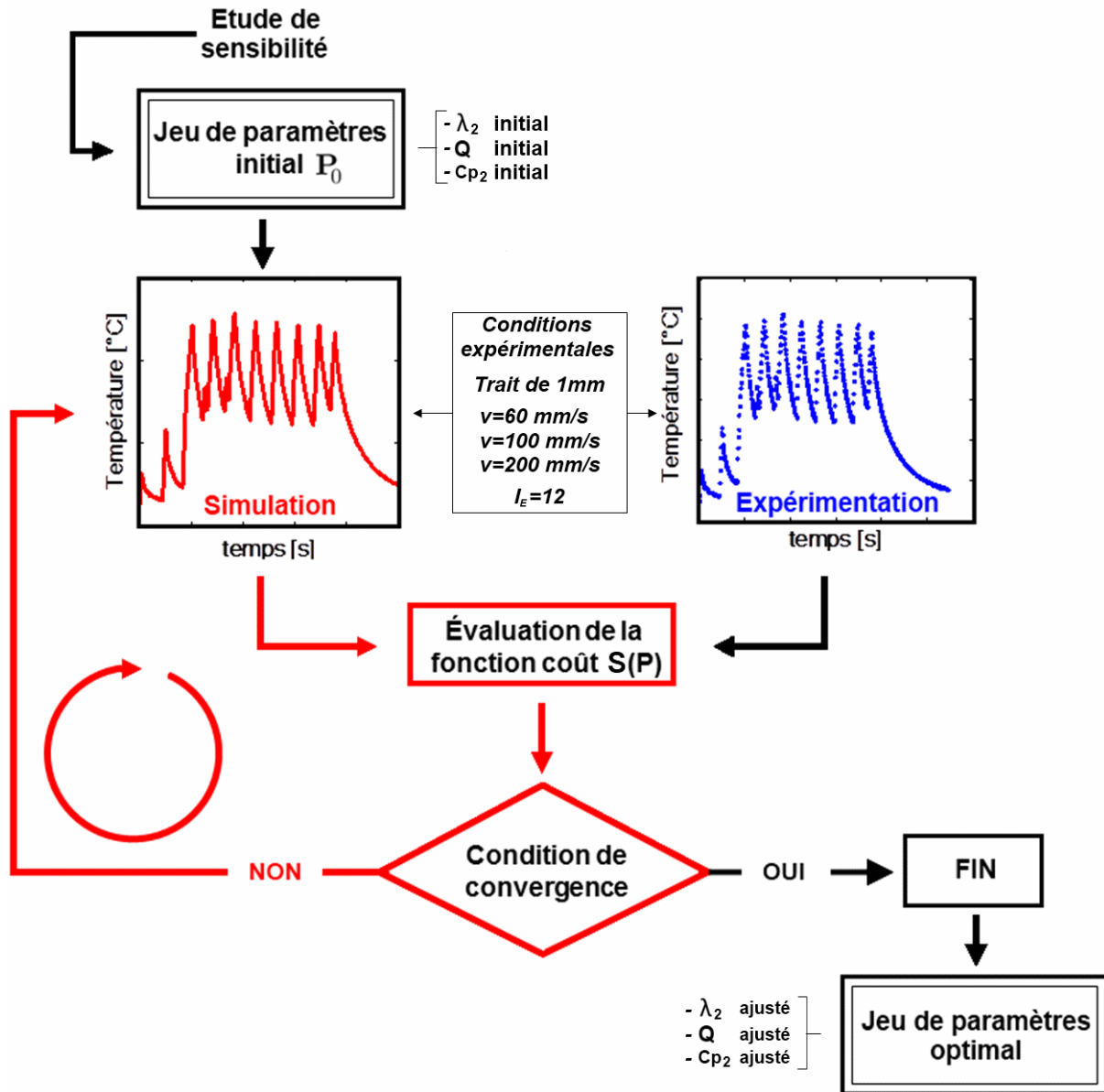


Figure AIII-1 – Organigramme de la procédure d'ajustement

Les paramètres d'entrée concernés par cette procédure sont la puissance volumique  $Q_{60}$  et les propriétés thermiques  $\lambda_2$  et  $c_{p2}$  du dot ( $\Omega_2$ ).

On définit  $S(P)$ , l'écart quadratique entre les températures mesurées expérimentalement au centre d'une micro source, par thermographie infra-rouge et celles calculées par le modèle numérique de la micro-source de chaleur :

$$S(P) = \frac{1}{3N} \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^N (T_{v_i,exp}^k - T_{v_i,sim}^k)^2 \quad (AIII-1)$$

avec N le nombre de mesures expérimentales utilisées. Les relevés expérimentaux obtenus pour trois vitesses d'impressions ( $v = 60, 100$  et  $200$  mm/s) sont pris en compte.

Dans un premier temps, un ensemble de triplets de paramètres [ $\lambda_2, C_{p2}, Q$ ], ont été testés avec un pas de variation donné. Les valeurs testées sont donnés dans le Tableau AIII-1

Paramètre (P)	Valeur initiale ( $P_{init}$ )	Encadrement de variation (%* $P_{init}$ )	Pas de variation
$\lambda_2$ fixée ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )	1,4	[90 – 110]	2%
Q ( $W.m^3$ )	$1,1 \cdot 10^7$	[90 – 140]	5%
$C_{p2}$ ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )	835	[100 – 150]	5%

**Tableau AIII-1 – Cartographie 3D – Triplets de paramètres testés**

La Figure AIII-2 présente pour une valeur constante du paramètre  $\lambda_2$ , le critère quadratique en fonction des valeurs de  $C_{p2}$  et Q.

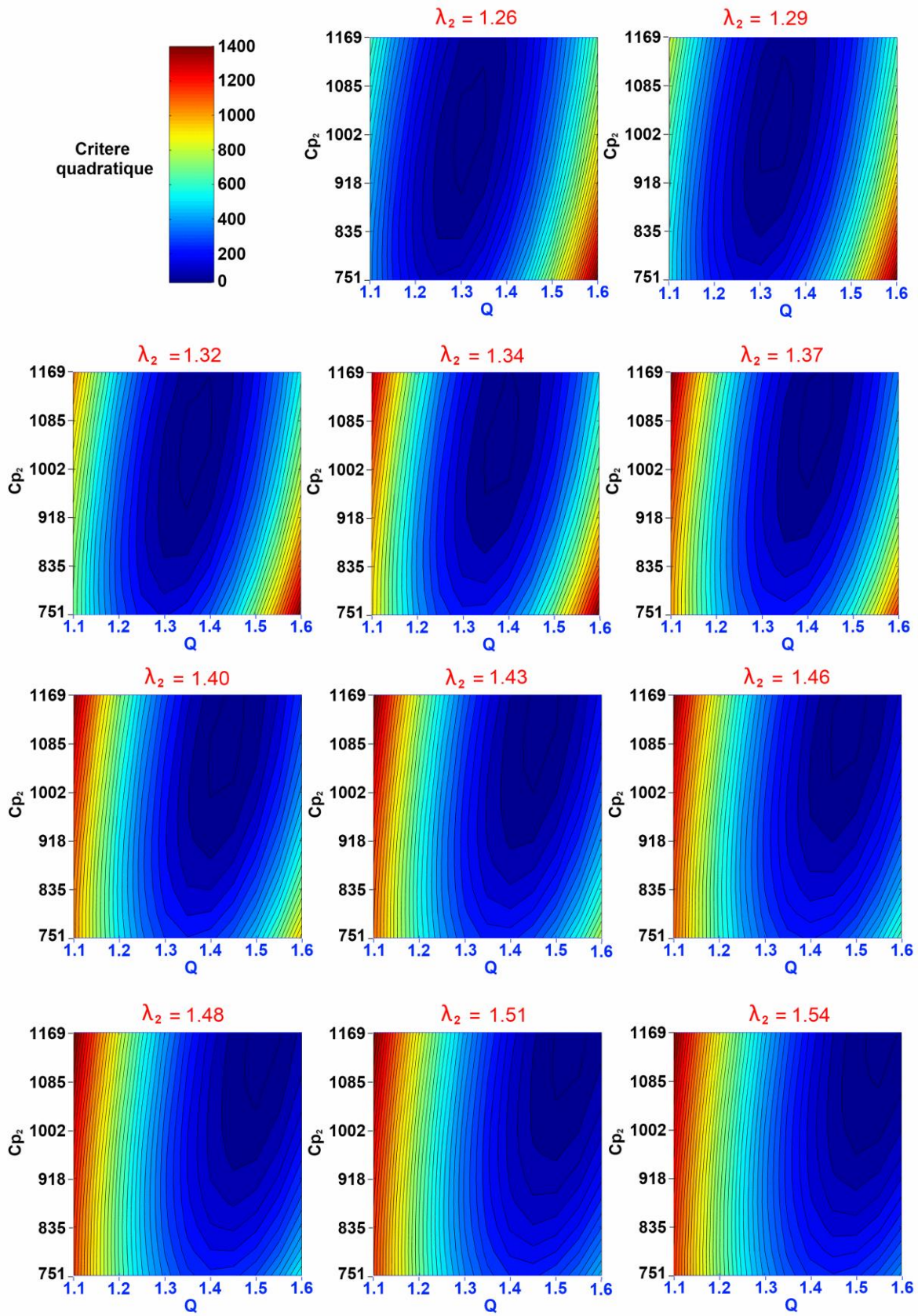


Figure AIII-2 – Evaluation du critère quadratique en fonction de  $\lambda_2$ ,  $Q$  et  $Cp_2$

Nous avons complété cette recherche manuelle en affinant la procédure d'ajustement des paramètres, dans la plage réduite de conductivité thermique du matériau  $\Omega_2$  [1,34-1,4]. Pour une valeur fixée de conductivité thermique, une procédure d'inversion numérique est utilisée pour déterminer la capacité thermique du verre ( $c_{p2}$ ) ainsi que la puissance injectée à la vitesse de 60 mm.s<sup>-1</sup> (Q). La procédure de minimisation de l'écart quadratique basée sur un algorithme d'optimisation classique de Levenberg Marquardt [47] répétée pour différentes valeurs de  $\lambda_2$ , a été utilisée.

Le Tableau AIII-2 présente les résultats de la procédure d'ajustement des paramètres.

	Ajustement N°1	Ajustement N°2	Ajustement N°3	Ajustement N°4	Ajustement N°5
$\lambda_2$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	1.344	1.358	1.372	1.386	1.4
Q (W.m <sup>-3</sup> )	1.388.10 <sup>7</sup>	1.411.10 <sup>7</sup>	1.418.10 <sup>7</sup>	1.423.10 <sup>7</sup>	1.443.10 <sup>7</sup>
Cp2 (J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	1050	1069	1074	1083	1085
S(P)	34.1	29.3	34.6	35.2	35.5

**Tableau AIII-2 – Résultats de la procédure d'inversion numérique pour différentes valeur de  $\lambda_2$**

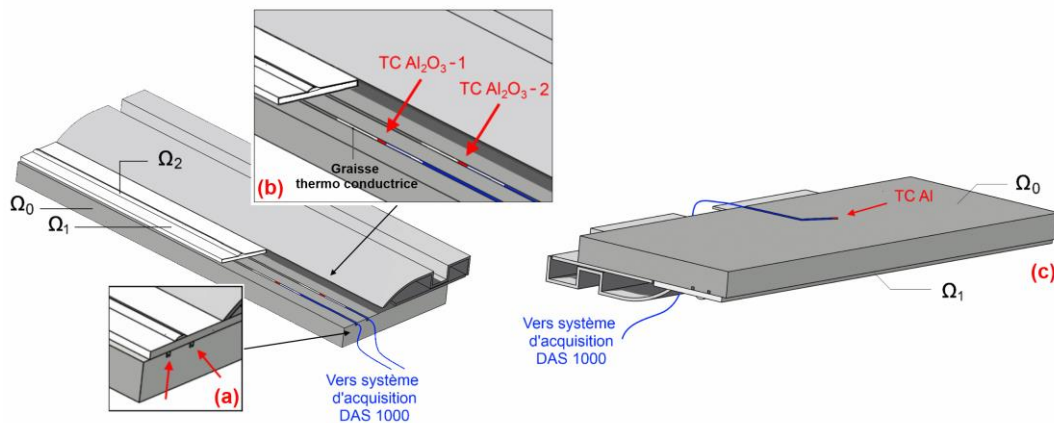
Nous retenons comme paramètres d'entrée du modèle le jeu de paramètres n°2 pour lequel l'écart quadratique est minimal.

## Annexe 4 : Instrumentation thermique complémentaire

Les couche  $\Omega_1$  (plaque d'alumine), ainsi que  $\Omega_0$  (support aluminium) ont été instrumentées à l'aide de thermocouples de type K, d'un diamètre de fil de 100  $\mu\text{m}$ .

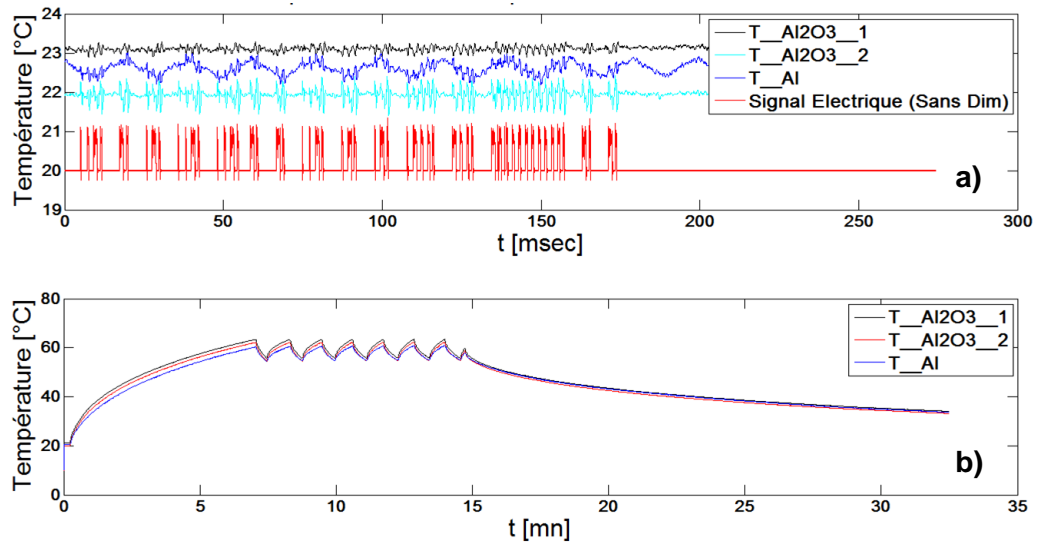
Concernant la première, les thermocouples ont été introduits dans les deux ouïes préalablement existantes dans l'épaisseur du support aluminium ( $\Omega_0$ ), en sous face de la plaque d'alumine ( $\Omega_1$ ) (Figure AIV-1 - a). Celles-ci parcourent toute la longueur de la tête d'impression. Elles se présentent sous la forme d'une rainure de section carrée, de 1 mm de côté. Les thermocouples ont été introduits sur une longueur de 30 mm pour le premier et de 20 pour le second, comme présenté sur la Figure - b. Avant introduction, afin de favoriser le transfert d'énergie, ces interstices ont été remplis de graisse thermo-conductrice.

De la même manière, le support en aluminium a été appareillé après avoir pratiqué une rainure de 1 mm de profondeur sur sa face arrière (Figure AIV-1 - c). Le thermocouple a été fixé au centre du dispositif à l'aide d'une résine époxy.



**Figure AIV-1 - Instrumentation de la face arrière de la plaque d'alumine (a-b) et du support aluminium (c)**

La Figure AIV-3 montre les résultats obtenus sur des temps de mesure courts (un motif code à barres) et relativement longs (plusieurs répétitions du signal). Sur un cycle, la température en face arrière est très peu sensible aux sollicitations thermiques de la tête d'impression (Figure AIV-3-a). La répétition de plusieurs cycles montre une température limite de fonctionnement autour de 60°C (Figure AIV-3 - b).



**Figure AIV-3 – Températures mesurées en face arrière ( $v = 60$  mm/s et  $I_E = 16$ ) sur des temps courts (a) et des temps longs (b)**



## Annexe 5 : Essais expérimentaux – Influence de l'indice énergétique

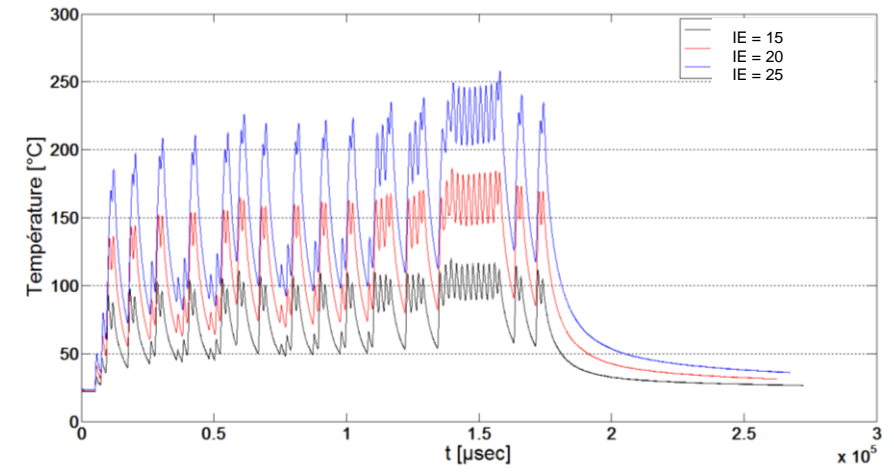


Figure AV-1 – Résultats expérimentaux obtenus à  $v = 60 \text{ mm/s}$ ,  $I_E = 15-20-25$

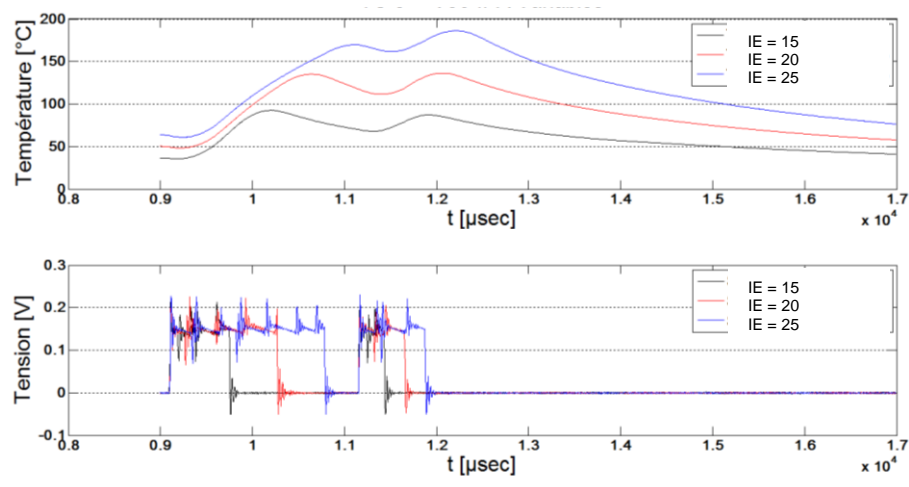


Figure AV-2 – Résultats expérimentaux obtenus à  $v = 60 \text{ mm/s}$ ,  $I_E = 15-20-25$ , zoom sur les premiers instants

## **Caractérisation et modélisation des transferts de chaleur lors de l'impression en transfert thermique**

La technologie d'impression par transfert thermique est un procédé largement employé dans l'industrie pour l'écriture de codes à barres et d'étiquettes. L'énergie apportée par des micro-sources de chaleur est transmise à un ruban encre, ce qui entraîne après changement d'état de l'encre, le transfert de matière vers un support receveur. L'obtention d'une haute qualité d'impression est un prérequis incontournable à la lecture des données numériques ainsi produites. La variété des encres et supports d'impression, la large gamme de vitesse de fonctionnement et la diversité des technologies de têtes d'impression et d'imprimantes rendent la maîtrise et le contrôle du processus délicat.

L'analyse et la modélisation des transferts de chaleur lors du procédé d'impression par transfert thermique sont au cœur de cette étude. Pour ce faire, l'ensemble des composants du système d'impression (tête d'impression, rubans et supports) a été caractérisé. Une imprimante industrielle a été instrumentée de capteurs thermiques et mécaniques.

De nombreuses expérimentations ont alors été menées dans diverses configurations d'impression. La base de données expérimentale obtenue a permis d'alimenter et de valider en tendance le modèle numérique du système global. Celui-ci tient compte de la structure multicouche opérant dans ce système multi-échelles et à la précision numérique requise pour pouvoir reproduire la rapidité des phénomènes engendrés.

Complété par un critère d'impression pertinent au regard des mesures dimensionnelles effectuées sur des codes à barres, celui-ci a permis d'élaborer une imprimante virtuelle.

Mots clés : Transferts thermiques, imprimante, micro-sources, modélisation numérique

## **Characterization and modelling of heat transfers in a thermal printing process**

Thermal printing process is a commonly used in manufacturing for the printing of labels and bar codes. Heating generated by micro-heaters is transferred to the inked ribbon. The ink melts which involves its transfer to the paper or either format. A higher printing quality is necessary .to success in the numerical information (bar codes) reading. The variety of inks and formats, the wide range of the operating speed and the diversity of printing heads and thermal printers make delicate the control of process.

The analysis and modelling of thermal transfers involved in printing process are central in this study. In this way, the whole of elements of printing system (printing head, ribbons and formats) are characterized. An industrial printer has been instrumented with mechanical and thermal sensors.

Many experiments are performed with several printing conditions. The experimental data base obtained has been used to feed and validate the model of the overall system. The model takes into account the multilayers structure constitutive of this multi-scale system. It has the required numerical precision to reproduce the speed of phenomena evolution.

The definition of a printing criterion exclusively based on thermal consideration was associated to the model to develop a virtual printer.

Key words : Thermal transfer, printer, micro-heaters, numerical modeling