



HAL
open science

Contribution au développement d'une nouvelle technologie d'optique ophtalmique pixellisée. Étude et optimisation du report de films fonctionnalisés sur une surface courbe

Paul Lefillastre

► **To cite this version:**

Paul Lefillastre. Contribution au développement d'une nouvelle technologie d'optique ophtalmique pixellisée. Étude et optimisation du report de films fonctionnalisés sur une surface courbe. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2010. Français. NNT : . tel-00807651

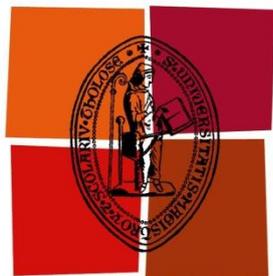
HAL Id: tel-00807651

<https://theses.hal.science/tel-00807651>

Submitted on 4 Apr 2013

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

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



Université
de Toulouse

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du titre de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par **L'Université Toulouse III – Paul Sabatier**
spécialité : **Micro-Nano Systèmes**

Présentée et soutenue par
Paul LEFILLASTRE
le 26 janvier 2010

***Contribution au développement d'une nouvelle technologie d'optique
ophtalmique pixellisée. Étude et optimisation du report de films
fonctionnalisés sur une surface courbe***

JURY

*François OLIVIÉ
Noëlle BILLON
Christian GAUTHIER
Jean Paul CANO
Costantino CRETON
Sylvie VINSONNEAU
Antoine MARTY*

*Professeur – LAAS – Toulouse
Professeur – CEMEF – Sophia Antipolis
Professeur – Institut Charles Sadron – Strasbourg
Ingénieur – ESSILOR – Labège
Directeur de recherche – ESPCI - PARIS
Ingénieur – ESSILOR – Labège
Directeur de recherche – LAAS - Toulouse*

*Président
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Invitée
Directeur de thèse*

Ecole doctorale : GEET
Unité de recherche : LAAS-CNRS
Directeur de Thèse : Antoine MARTY

REMERCIEMENTS

Le travail de recherche que décrit ce mémoire a été effectué dans le cadre d'une convention CIFRE entre la société ESSILOR International et le Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS à Toulouse.

Je voudrais en tout premier lieu adresser mes plus chaleureux remerciements à mon directeur de thèse : Monsieur Antoine Marty, pour avoir suivi et encadré ce travail avec intérêt, compétence et disponibilité.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Monsieur François Olivié (LAAS) qui m'a fait l'honneur de présider mon jury de soutenance, à Madame Noëlle Billon (CEMEF) et Monsieur Christian Gauthier (ICS) pour avoir rapporté ce manuscrit. et à Monsieur Costantino Creton (ESPCI) qui a accepté de faire partie de mon jury.

Je remercie Jean-Paul Cano de m'avoir permis de participer à la mise au point du verre de lunettes du futur, pour la confiance et l'autonomie qu'il m'a accordé au long de ces années. Merci particulièrement à Sylvie Vinsonneau pour ses conseils et sa motivation. Je tiens bien sûr à saluer l'ensemble des personnes avec qui j'ai eu la chance de travailler au sein d'ESSILOR (Labège, Saint-Maur et Grenoble), du LAAS, du laboratoire commun PIX-CELL Lab., du CEA LETI, d'IDEAs Lab. et du CEMEF, et qui m'ont permis de mener à bien ce travail

J'adresse mes plus sincères remerciements à Messieurs Malik Ghallab et Raja Chatila, directeurs successifs du LAAS, ainsi qu'à Jean-Yves Fourniols responsable du groupe Nano Ingénierie et Intégration Systèmes (N2IS) et Pierre Temple Boyer, responsable du Groupe "Microdispositifs et Microsystèmes de Détection" (M2D) pour m'avoir ouvert les portes de leurs locaux et du monde de l'infiniment petit. Merci également à toute la TEAM pour leur aide et leur savoir-faire inestimables.

Je souhaiterai remercier mes collègues devenus amis : Laëtitia Pont-Bruère, Feng Shi, Thierry Leichlé, Matthieu Gavel, Jérôme Launay, Ludovic Salvagnac, Laurent Bouscayrol pour leur accueil, et les franches rigolades que nous avons partagées.

Je tiens enfin à remercier mes parents, ma sœur, Camille Roth et l'ensemble de nos familles pour le soutien et l'amour que vous m'avez apporté. Merci beaucoup.

Table des matières

<u>INTRODUCTION GENERALE</u>	1
---	---

CHAPITRE I

<u>LE PROJET DE LENTILLE OPHTALMIQUE DIGITALE : CONTEXTE ET OBJECTIFS</u>	7
--	---

1. L'optique ophtalmique active	9
1.1. Bref état de l'art de l'optique ophtalmique active	9
1.2. Le concept de lentille digitale et les briques technologiques	12
2. Le film pixellisé : la fonction active de la lentille digitale	14
2.1. La fabrication des microcuves	15
2.1.1. La géométrie des microstructures	15
2.1.2. Le substrat des microcuves et sa mise en place.....	16
2.1.3. Les couches barrière des parois et du substrat	21
2.2. Le remplissage des microcuves	22
2.2.1. Le remplissage global.....	23
2.2.2. Le remplissage par jet d'encre	24
2.3. Le scellement des microcuves	25
2.3.1. Le scellement sur les cuves remplies de liquide fonctionnel	25
2.3.2. L'encapsulation du liquide fonctionnel	25
2.4. Le remplissage par scellement.....	27
2.5. Vers la conception et la réalisation de dispositifs actifs	28
3. La problématique du report du film pixellisé sur la lentille ophtalmique	28
3.1. Les objectifs de l'étude	29
3.2. Caractéristiques imposées par la nature et les géométries de la lentille ophtalmique hôte	30
4. Conclusion.....	32

CHAPITRE II

<u>LE REPORT DU FILM PIXELLISE SUR LA LENTILLE OPHTALMIQUE</u>	35
1. Les pratiques du report de films chez <i>ESSILOR</i>	37
1.1. Le collage d'un film de protection sur le verre	37
1.2. Le procédé de report MARS	38
1.3. Le procédé de report BST	39
1.4. Évaluation de la compatibilité de ces procédés avec le report du film pixellisé	40
2. Considérations préliminaires sur la déformation du film au cours du report	42
2.1. Report de type 1 : repliement du disque sans le contraindre dans ses diamètres	43
2.2. Report de type 2 : repliement du disque juste contraint pour conserver sa surface	44
2.3 Report de type 3 : repliement du disque contraint avec projection des bords	46
3. Synthèse et propositions de reports les plus appropriés	48
3.1. Analyse comparée des 3 types de reports	48
3.2. Proposition des modes opératoires de procédés de mise en œuvre	53
3.3. Nos choix des modes opératoires de report mis en œuvre	59
3.4. Premières évaluations par simulations numériques	61
4. Conclusion.....	65

CHAPITRE III

<u>LE PROTOTYPE PIXIS POUR LE REPORT DE FILMS PIXELLISES</u>	67
1. Conception et réalisation du prototype de report PIXIS	70
1.1. L'architecture générale du prototype.....	70
1.2. L'enceinte de thermoformage	71
1.3. Les contrôles du prototype	73
1.4. Automatisation du prototype	75
1.5. Exemples de séquences opératoires du procédé PIXIS-A	78
2. Le chauffage du film pixellisé	81
2.1. Simulation numérique des transferts thermiques rencontrés lors du thermoformage de films sur PIXIS	81
2.1.1. Présentation des différents modes de transfert de chaleur	82

2.1.2.	Détermination du coefficient d'échange par convection h du film de PET	84
2.1.3.	Influence de chaque mode de transfert sur la cinétique de refroidissement d'un film de PET	85
2.1.4.	Influence de l'épaisseur du film de PET sur la cinétique de transfert thermique	89
2.1.5.	Simulation des transferts thermiques à l'intérieur du film pixellisé.....	92
2.2.	La sélection du mode de chauffage.....	94
2.2.1.	Présentation des éléments chauffants étudiés.....	96
2.2.2.	Étude de l'homogénéité du chauffage obtenue avec les éléments chauffants.....	98
3.	Les moyens de caractérisation du report du film.....	102
3.1.	Le suivi du gonflement pendant la phase de thermoformage.....	102
3.1.1.	La mesure du rayon de courbure avec un sphéromètre.....	102
3.1.2.	Le contrôle de la courbure pendant le gonflement par réflexion laser	102
3.2.	La caractérisation des déformations après report par la technique d'auto-corrélation d'images	104
3.3.	le contrôle cosmétique des reports.....	106
4.	Conclusion.....	108

CHAPITRE IV

<u>PROPRIETES ET CARACTERISATIONS DU FILM OPTIQUE</u>	109
1. Présentation du film optique.....	111
1.1. Le choix du Polyéthylène de Téréphtalate.	112
1.2. Le choix du Melinex 506 pour le projet optique digitale.....	114
2. Caractérisation du film optique.....	115
2.1. L'absorption UV-VISIBLE du Melinex 506 et du Arclear 8796.....	116
2.2. La diffraction du Melinex 506 aux rayons X	117
2.3. L'analyse enthalpique différentielle – DSC	119
2.4. La thermogravimétrie.....	120
2.5. La caractérisation thermomécanique du film de PET	121
2.5.1. Présentation de l'Analyse Thermomécanique Dynamique.....	123
2.5.2. Comportement du film de PET sur une large gamme de température	125
2.5.3. Influence du bi-étirage du film de PET sur son comportement	127
2.5.4. Influence des recuits sur le comportement du film de PET	128
2.5.5. Comportement du film de PET sur une large gamme de fréquence.....	129

2.5.6.	Principe d'équivalence « temps-température »	131
3.	Caractérisation comparée de la lentille "Stylis 1.67"	136
4.	Conclusion.....	139

CHAPITRE V

<u>LE REPORT DE PREMIERE GENERATION DIT DE « GRANDE SURFACE »</u>		141
1.	Influence des paramètres de mise en œuvre sur la courbure du film de PET	143
1.1.	Influence de la température et de la pression sur le rayon de courbure du film.....	144
1.2.	Influence du diamètre de la bague sur le rayon de courbure du film	145
2.	Simulation numérique du report « grande surface »	146
2.1.	La méthode de simulation par éléments finis mise en œuvre	147
2.2.	Quelques résultats de simulation du formage par gonflement	150
3.	Détermination des paramètres de report sur deux géométries de verre ophtalmiques	160
3.1.	Mode opératoire.....	160
3.2.	Les défauts de collage observés.....	161
3.3.	Évolution dans le temps des reports effectués.....	162
3.4.	Analyse des reports.....	166
3.5.	Mesure des déformations par la méthode des mouchetis, comparaison des procédés MARS et PIXIS	167
4.	Conclusion.....	171

CHAPITRE VI

<u>LE REPORT DE DEUXIEME GENERATION DIT DE « PETITE SURFACE »</u>		175
1.	Le film pixellisé prédécoupé sous forme de patch.....	177
1.1.	Adaptations nécessaires du prototype PIXIS au report petite surface	178
1.2.	Propositions de nouveaux procédés de mise en œuvre.....	179
1.2.1.	Une membrane auxiliaire complémentaire.....	180
1.2.2.	Une membrane auxiliaire composée de deux films	182
1.2.3.	La membrane auxiliaire de maintien	183
1.3.	Préparation du patch avec recours à une interface.....	184

1.3.1.	L'interface liquide	184
1.3.2.	L'interface solide.....	185
1.4.	Récapitulatif des différentes étapes du procédé retenu	186
1.5.	Le phénomène de glissement entre la membrane auxiliaire et le patch.....	188
1.6.	Les défauts observés des reports « petites surfaces »	189
2.	Simulation numérique du report « petite surface ».....	191
3.	Mesures des déformations du patch et de film support.....	201
3.1.	Mesure des déformations de la membrane auxiliaire	201
3.2.	Mesure des déformations du patch	203
4.	Comportement de films fonctionnalisés au report.....	204
4.1.	Le report de films antireflets	205
4.2.	Le report de film conducteur	209
5.	Conclusion.....	211
 <u>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES</u>		213
1.	Conclusion.....	215
2.	Evolutions et perspectives	217
 <u>ANNEXES</u>		221
<u>TABLE DES ILLUSTRATIONS</u>		229
<u>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</u>		2411

Introduction générale

Historiquement, les lunettes ont d'abord et longtemps eu comme unique fonction la correction ophtalmique apportée par le surfaçage du verre. Les nombreux efforts de développement ont ensuite porté essentiellement sur l'amélioration du confort visuel du porteur et la diversification des fonctions du verre. Le verre progressif et la fonction d'obscurcissement intermittent permettant d'éviter l'éblouissement en sont deux éléments marquants. Plus récemment, dans une dynamique proche de celle de la microélectronique qui a permis l'avènement des systèmes dits « intelligents », un nouvel axe d'innovation s'est porté vers l'optique ophtalmique active. L'introduction de nouvelles fonctions actives dans cette application apparaît en effet assez naturelle puisque l'on peut imaginer pouvoir contrôler la puissance optique et donc la correction de la lentille, modifier la transparence nécessaire pour l'adaptation à la luminosité ambiante ou encore présenter des informations dans le champ de vision.

Dans ce contexte, *ESSILOR* a été à l'origine de deux innovations majeures en matière de correction ophtalmique avec d'une part l'invention du verre progressif *VARILUX*[®] et d'autre part le remplacement des verres minéraux par les verres organiques qui sont plus résistants et en même temps beaucoup plus légers. Cette entreprise s'apprête aujourd'hui à proposer un nouveau concept de lentilles actives qui repose sur le principe d'une pixellisation de leur surface. Cette fonctionnalisation par le biais d'une matrice d'éléments discrétisés et actifs est donc le fondement même du concept d'optique digitale et correspond à une

innovation qui est en totale rupture technologique pour le domaine de l'optique ophtalmique.

Ces nouveaux dispositifs optiques pixellisés dédiés aux applications de l'ophtalmologie seront donc constitués d'une matrice d'éléments discrets permettant de moduler localement la phase et l'amplitude de l'onde incidente. Ils peuvent être brièvement décrits en quatre points comme suit :

- la surface du verre sera constituée d'une mosaïque de micro-cuvettes indépendantes obtenues à partir des procédés de microfabrication développés pour les dispositifs de la microélectronique et des microsystèmes ;
- chaque cellule élémentaire contiendra un ou plusieurs matériaux actifs dont on pourra faire varier une propriété optique – l'absorption, l'indice de réfraction ou encore l'épaisseur – de manière définitive ou réversible ; ces matériaux pourront être liquides ou sous forme de gels ;
- la variation spatiale de la propriété optique sera obtenue de manière externe par écriture optique préalable à l'aide d'un laser ou par un adressage interne de la stimulation électrique des propriétés au moyen d'électrodes transparentes ;
- dans le second cas où le système actif nécessite de disposer en autonomie d'une source d'énergie en termes de production et de stockage, c'est vraisemblablement le choix d'une cellule photovoltaïque transparente et intégrée qui sera fait.

Les technologies qui s'imposent pour réaliser les fonctions actives que nous venons de décrire dans les principes sont évidemment celles issues de la microélectronique. Dans ces conditions, et pour continuer à bénéficier grâce à ces techniques de l'avantage majeur d'une fabrication collective, il est impératif de rester en mode de fabrication de films préfonctionnalisés sur substrat plan et de reporter ensuite ces films sur les lentilles ophtalmiques hôtes à surfaces courbes. C'est précisément l'ensemble des travaux attachés à cette dernière étape dans la réalisation du projet, la phase délicate de report de films fonctionnalisés, fragiles et à forte valeur ajoutée, qui a fait l'objet de notre travail de thèse. Il s'agissait pour nous d'étudier, et d'optimiser l'étape de thermoformage et de collage de ces films sur substrat courbe pour satisfaire au mieux les exigences inhérentes d'une part à la compatibilité de l'ensemble des procédés technologiques et d'autre part aux propriétés fonctionnelles visées. Outre la mise en œuvre et le développement des outils correspondants,

ce travail a bien évidemment impliqué la mise en place de moyens de caractérisations optiques et mécaniques des principaux éléments constitutifs.

Pour préciser le contexte de nos travaux un premier chapitre introductif présentera l'état de l'art de l'optique ophtalmique active ainsi que les principes et fondements technologiques du projet d'optique digitale qui a été élaboré et proposé par *ESSILOR*. Nous procéderons, dans un deuxième chapitre, à l'analyse préliminaire des différentes possibilités envisageables pour le report du film fonctionnalisé sur les lentilles ophtalmiques courbes, et proposerons un mode opératoire spécifique apparaissant comme le mieux adapté pour résoudre notre problématique. La description de la conception et de la réalisation du prototype d'un appareillage entièrement nouveau, spécifique au procédé séquentiel de thermoformage et de report que nous avons retenu, fera l'objet du troisième chapitre. Le chapitre IV sera ensuite consacré aux propriétés et caractérisations du film optique utilisé comme support principal de la matrice discrétisée. Enfin, les chapitres V et VI présenteront respectivement deux types de reports dits de « grande surface » et de « petite surface » que nous avons effectués dans le cadre de cette première étude exploratoire où il s'agissait d'établir les conditions opératoires optimales pour parvenir à un procédé réellement efficient et fiable.

Chapitre I

*Le projet de lentille ophtalmique digitale : contexte et
objectifs*

L'objectif de ce premier chapitre est de replacer l'objet de notre travail dans son contexte. Ainsi, il montrera comment la mise au point de procédés spécifiques de report de films pixellisés sur des lentilles à surface courbe s'inscrit dans un projet général et ambitieux de verre actif « intelligent » qui constitue une véritable rupture technologique dans l'histoire de l'optique ophtalmique.

1. L'optique ophtalmique active

Au lancement de notre étude, la volonté d'intégrer des fonctions actives dans les verres ophtalmiques n'avait abouti qu'à de nombreuses idées, quelques essais mais peu de résultats concluants. Poursuivre dans cette voie nécessitait de s'appuyer sur de nouveaux concepts.

1.1. Bref état de l'art de l'optique ophtalmique active

L'idée d'intégrer des composants optiques actifs aux lentilles ophtalmiques n'est pas nouvelle. De multiples approches ont été explorées, tant dans la fonction à apporter que dans les manières de la concrétiser. Nous présentons ici deux exemples d'innovations fonctionnelles.

Le premier exemple porte sur la correction, qui est la fonction première d'un verre ophtalmique. Cette fonction est actuellement apportée par le surfaçage du verre et n'est plus ajustable par la suite, à moins d'un nouvel usinage. La lentille à focale variable permettrait, par exemple, de faire évoluer facilement la correction selon la vue du porteur, sans changer de verre ni de lunettes. La société japonaise *OLYMPUS OPTICAL* a réalisé en 1985 des lunettes à cristaux liquides [1] capables d'ajuster la focale de leurs verres. L'indice de réfraction des cristaux liquides peut être modifié selon la température qui leur est appliquée. Ce procédé est extrêmement énergivore et n'est pas viable tant que la modification de l'indice est apportée par le chauffage. Plus récemment, la start-up française *VARIOPTIC* a commercialisé une lentille liquide à focale variable [2], mais ses applications se limitent pour le moment au domaine des appareils photographiques des téléphones portables. Le système est composé de deux liquides non miscibles : un isolant et un conducteur. L'application d'une différence de potentiel à la surface de ce dernier provoque une variation de pression dans la goutte, modifiant son rayon de courbure et faisant par conséquent varier la distance focale de ce que l'on peut alors appeler « lentille optique à focale ajustable ».

Le second exemple porte sur le verre atténuateur d'intensité. L'adaptation de la teinte du verre en fonction de la luminosité ambiante est un axe de recherche récurrent chez l'opticien. Aujourd'hui, le verre atténuateur d'intensité le plus adapté au porteur pour remplir cette fonction est le verre photochromique. Il est composé d'une couche incorporée au verre de 20 µm de molécules photosensibles au rayonnement ultraviolet. Le temps de réponse pour passer d'un état clair à un état foncé est de l'ordre de 30 secondes, le retour à l'état clair prend plusieurs minutes. Les performances du verre définies, d'une part, par la vitesse nécessaire pour passer d'un état à l'autre et, d'autre part, par le rapport de transmission de l'état clair à l'état foncé sont un critère essentiel pour le porteur et des systèmes plus performants existent. Comissoni [3] brevète en 1961 le premier dispositif atténuateur de l'intensité d'un flux lumineux qui se fixe sur la monture de lunettes. Son invention est composée de plusieurs éléments tournants opaques, en forme d'ailettes, espacés entre eux et aptes à intercepter de façon intermittente le flux lumineux. L'intensité lumineuse reçue est modulée par la vitesse de passage des éléments opaques. Cet accessoire, assez imposant, qui se fixe sur la monture de lunette, ressemble davantage à des ventilateurs qu'à des lunettes Figure I-1-a). Une vingtaine d'années plus tard, deux technologies ont abouti à des prototypes assez performants mais que l'on ne peut pas aisément transposer à la lunetterie. Des lunettes électrochromiques sont

brevetées par la société *AMERICAN CYANAMID COMPANY* [4] en 1976. Ce dispositif électro-optique est constitué d'un verre ophtalmique dans lequel une couche électrochromique permanent et une couche conductrice des ions sont montées en sandwich. La coloration est obtenue en portant la couche électrochromique à un potentiel négatif par rapport à celui de la contre-électrode, à l'aide d'une source extérieure située dans la monture. La coloration visible peut être effacée en inversant la polarité d'origine du champ ou en appliquant un nouveau champ électrique. Les propriétés d'absorption de la lentille sont ajustées par un capteur d'intensité lumineuse placé à l'avant de la monture. BELGOROD [5] conçoit en 1981 des lunettes à densité optique variable en fonction de la luminosité ambiante, équipées pour cela de verres à cristaux liquides. Chaque verre est constitué d'une couche de cristaux liquides confinée entre deux surfaces transparentes parallèles. Des moyens de polarisation, agencés dans les verres et dans la monture, sont pilotés par une cellule photosensible apte à délivrer un signal représentatif de la lumière ambiante. Une pile, placée dans la monture, alimente un circuit électronique susceptible de fournir des signaux de polarisation aux cristaux liquides. Sur le même principe, *SEIKO* réalise en 1991 son propre modèle de lunettes à intensité variable [6] (Figure I-1-b). Ces dispositifs à cristaux liquides ou électrochromes offrent des temps de réponse très intéressants, inférieurs à la seconde, mais les capteurs solaires ou les batteries intégrés à la monture rendent les lunettes lourdes et encombrantes. De plus, l'opticien ne peut pas détourner ou percer le verre sans faire fuir le liquide, ce qui limite fortement l'emploi de tels dispositifs en lunetterie. En 2004, *ESSILOR* dépose le brevet d'un verre ophtalmique à fonction électro-optique [7]. Pour la première fois, le verre intègre à la fois un système électro-optique et la source d'énergie nécessaire à son fonctionnement (Figure I-1-c). L'assemblage est simplifié pour l'opticien car il n'y a pas de raccords électriques à réaliser entre le verre et la monture. En revanche, il ne peut là encore toujours pas usiner le verre comme il l'entend sans endommager le système.

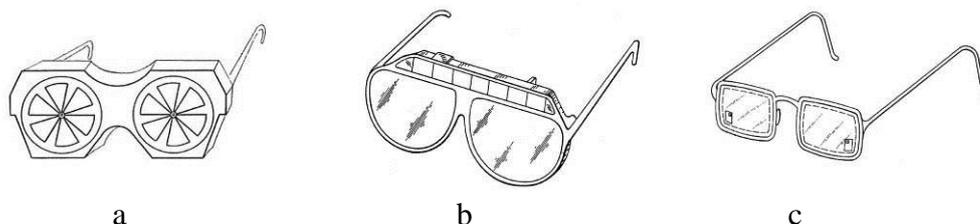


Figure I-1 : L'évolution du verre atténuateur d'intensité électro-optique de 1960 à nos jours.

En conclusion, ces évolutions sont généralement incompatibles avec la lunetterie classique. La taille et le poids des sources d'alimentation en font un système encombrant pour le porteur. L'intégration de liquides fonctionnels, confinés entre les parois du verre, semble une voie prometteuse mais empêche l'usinage de ce dernier.

1.2. Le concept de lentille digitale et les briques technologiques

L'émergence de nouvelles technologies va permettre de remédier à ces inconvénients, notamment par les avancées de la microélectronique ou des MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*). Il sera alors possible d'imaginer de nouveaux produits à partir d'un seul concept : la lentille digitale.

Tout d'abord, les nouveaux procédés de microfabrication tels que la photolithographie, la polymérisation laser, permettent la réalisation d'objets de taille micrométrique. Il devient alors possible de fabriquer une microstructure à l'aspect de mosaïque, constituée de microcuves indépendantes les unes des autres, permettant de confiner le liquide dans des réservoirs et ouvrant ainsi la voie à l'utilisation de liquide dans le verre de lunettes. Le fait de disposer de microcuves permet en effet de découper le verre pour l'usiner. Cela permet également d'imaginer le remplissage des microcuves d'un même verre par différents liquides ou gels, comme par exemple des électrolytes, des cristaux liquides, ou encore des monomères polymérisables. Ces matériaux offrent des possibilités inédites dans le domaine de l'optique : il devient possible, par exemple, d'imaginer la lentille de FRESNEL [8] liquide grâce au remplissage des cuves par des liquides d'indice de réfraction adaptés. De la même façon, il devient possible de fabriquer une lentille progressive en utilisant des liquides. Un verre progressif est un verre dont la puissance augmente de manière continue entre le haut et le bas, entre une zone supérieure destinée à la vision de loin et une zone inférieure destinée à une vision de près. Cette progression est obtenue par une variation continue de la courbure du verre offrant une vision nette à toutes les distances intermédiaires. Cette progression peut aussi être obtenue par une variation continue de l'indice du verre lors du remplissage des cuves.

Le remplissage des cuves, à l'échelle du micron, fait également partie des défis à relever. Le développement de techniques comme le jet d'encre, qui permet de déposer avec précision des gouttes de quelques picolitres, laisse penser qu'un bon contrôle d'un tel

remplissage est maintenant possible. Cependant, les liquides à injecter, comme les cristaux liquides, sont des matériaux exotiques pour cette technologie et peu d'études ont été publiées sur ce sujet.

Par ailleurs, les matériaux fonctionnels, comme par exemple les semi-conducteurs organiques utilisés dans les écrans OLED, sont souvent très sensibles à l'oxygène et/ou à la vapeur d'eau qui peuvent être présents dans l'environnement. La mise en œuvre et l'intégration de couches imperméables à ces gaz est inévitable. Une façon de procéder à de tels dépôts formant une couche barrière est réalisable par plasma.

Le scellement de cuves remplies de liquides constitue une autre étape indispensable au projet. Des études, réalisées par la société *SIPIX* avec le scellement de microcuves par démixtion de liquides, ou par l'école d'ingénieurs ARC avec la croissance de parylène sur des liquides, montrent qu'il est possible d'encapsuler des liquides pour des dispositifs optiques.

La source d'énergie nécessaire aux systèmes actifs doit également être intégrée au verre et être invisible pour le porteur. Les cellules GRAETZEL [9] sont des cellules solaires nanocristallines à colorants qui ont l'avantage d'être transparentes. La surface disponible sur un verre de lunettes n'est pas négligeable, une cellule solaire transparente de cette surface suffirait à apporter l'énergie nécessaire à l'optique active. Le projet de lentille digitale, c'est-à-dire de microstructures remplies de liquides fonctionnels puis scellées est donc réalisable. Le dispositif n'est plus continu mais discrétisé en pixels sur lesquels on peut agir afin de moduler la phase et l'amplitude de l'onde incidente.

S'agissant de la pixellisation du verre ophtalmique, deux approches sont possibles. La première approche consiste à fabriquer des microstructures directement à la surface de la lentille lors de sa fabrication ou ultérieurement par le moulage d'une résine à sa surface. Cette approche n'a pas été retenue, notamment en raison de la difficulté de travailler sur des surfaces courbes lors des étapes de remplissage et de scellement. Il paraît également difficile d'intégrer des électrodes et des circuits conducteurs électriques par cette méthode. La seconde approche consiste à fabriquer l'ensemble du dispositif à la surface d'un film optique plan et de le reporter sur la surface de la lentille. Cette approche offre un avantage certain par rapport à la fabrication des cuves sur la surface des verres : celui de fabriquer l'intégralité du film pixellisé sur une surface plane. Ainsi, l'utilisation d'un film plan comme substrat permet l'élaboration de la microstructure sur de grandes surfaces à de moindre coûts car les

techniques comme l'enduction grandes surfaces, la lithographie, la gravure laser, le jet d'encre sont des techniques maîtrisée et transposables au projet. Le schéma ci-dessous représente les quatre étapes nécessaires à la fabrication du verre pixellisé.

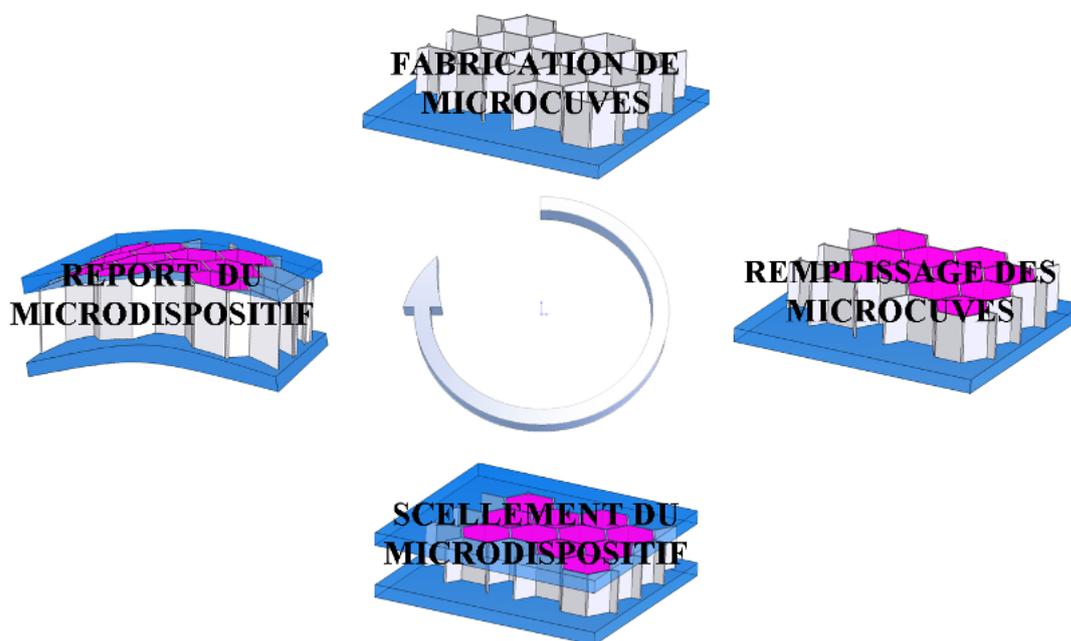


Figure I-2 : Les grandes étapes de la fabrication du film pixellisé

2. Le film pixellisé : la fonction active de la lentille digitale

Le film pixellisé est un film multicouches comportant un substrat, une microstructure, un ou plusieurs liquides fonctionnels et un film de scellement. À cette étape du projet il est dit passif car il ne nécessite pas de source d'énergie pour fonctionner.

S'agissant de la première étape de fabrication du film à savoir la structuration en microcuves, nous serons amenés à justifier le choix de leur forme géométrique et de leur réalisation par photolithographie. Nous présenterons ensuite différentes méthodes de remplissage des microcuves par le ou les liquides apportant une fonction au film. Enfin, nous étudierons trois méthodes de scellement du microdispositif, censé assurer l'étanchéité et la rigidité de l'ensemble. C'est après cette dernière étape de fabrication que nous pourrons parler de film pixellisé.

2.1. La fabrication des microcuves

Ce paragraphe reprend les travaux et résultats de thèse de Laëtitia PONT [10], effectués dans le cadre de la démonstration de faisabilité et de la réalisation des premiers prototypes de microstructures.

2.1.1. La géométrie des microstructures

Le rôle de la microstructure est multiple. Elle a pour fonction :

- de contenir le ou les liquides fonctionnels et d'assurer une étanchéité avec le milieu extérieur,
- de séparer les liquides fonctionnels les uns des autres,
- de permettre la découpe du film microstructuré contenant des liquides.
- d'assurer une épaisseur uniforme du système fonctionnel

Une microstructure constituée d'une mosaïque de microcuves permet de remplir ces fonctions et a donc été retenue. Dans un premier temps, le choix de la géométrie des cuves s'est orienté vers des structures hexagonales, la forme dite en « nids d'abeilles » étant réputée pour sa bonne tenue mécanique. Mais pour des raisons optiques de diffraction, représentées en Figure I-3, une géométrie pseudo-aléatoire [11] a été préférée. L'énergie diffractée est ainsi répartie dans tout l'espace et n'est plus perceptible par l'œil.



Figure I-3 : La diffraction d'une structure hexagonale à gauche et pseudo aléatoire à droite

Le brevet « Optically transparent component with two sets of cells » [12] décrit quant à lui un nouveau procédé bi-couches, qui vise la minimisation des problèmes de diffraction, est en cours d'étude.

Il a ensuite été nécessaire de déterminer les dimensions des microcuves et de leurs

parois. La hauteur des murs a été fixée à $20\ \mu\text{m}$ car c'est l'épaisseur d'une couche de matériau photochromique utilisée pour la fabrication des verres photochromiques classiques (voir Figure I-4 de ce chapitre). L'épaisseur des murs est déterminée par le rapport de forme, c'est à dire le rapport hauteur de mur / épaisseur de mur. Ce rapport est limité à 20 [13] par les propriétés mécaniques du matériau utilisé pour la fabrication des microstructures. L'épaisseur des murs est de $2\ \mu\text{m}$ et la largeur des cuves est choisie à $100\ \mu\text{m}$, ce qui permet d'obtenir un facteur de remplissage (compromis entre l'épaisseur des murs et la largeur des cuves) de 96%.

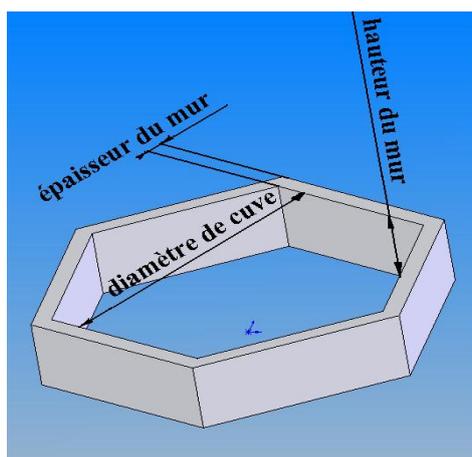


Figure I-4 : La géométrie hexagonale

2.1.2. Le substrat des microcuves et sa mise en place

Le substrat du film pixellisé, qui doit servir de support à la microstructure, est un film polymère de PET de $75\ \mu\text{m}$ d'épaisseur et transparent optiquement. Pour permettre les différentes opérations intervenant dans la microstructuration en microcuves disposées à sa surface, ce substrat doit être fixé sur une base-support solide qui doit elle-même être plane. La centrale technologique du LAAS dédiée à la fabrication de composants électroniques et de microsystèmes est équipée de machines compatibles au standard wafer silicium de 10 cm de diamètre. Nous avons donc réalisé le film pixellisé en utilisant ce type de wafer comme un support plan durant la fabrication. À cet effet, le film PET est préalablement collé de façon temporaire sur le wafer au cours d'une étape de laminage à l'aide d'un film adhésif acrylique, dit PSA *Pressure Sensitive Adhesive*, de $25\ \mu\text{m}$ d'épaisseur.

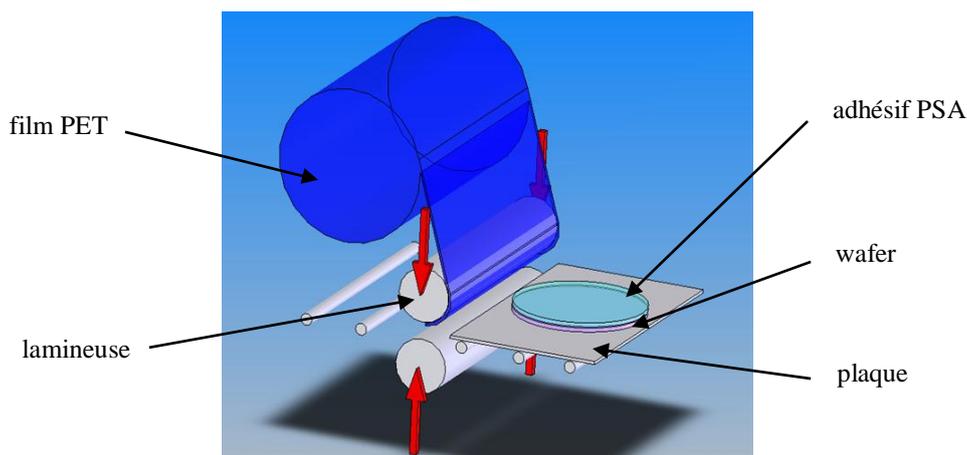


Figure I-5 : L'étape de laminage du film optique sur le wafer

Dans un deuxième temps, il faudra pouvoir décoller le film pixellisé de ce wafer. Pour cela nous avons développé deux procédés de collage du film transparent, substrat des microcuves, sur le wafer :

- *le collage du film optique directement sur le wafer*

Cette méthode consiste à coller le film optique de façon provisoire sur le wafer. Pour cela nous utilisons un film de transfert et le film optique. Le film de transfert est composé d'un film adhésif optique et de deux films protecteurs. Lors de leur fabrication, ces derniers sont traités de façon à avoir leur face interne peu adhésive alors que la face verte foncé n'est pas traitée. Nous ne l'avons pas représenté sur la Figure I-6, mais les deux films protecteurs ne sont pas traités de la même façon, un des deux films à une surface moins adhésive que l'autre film pour permettre le pelage d'un seul film protecteur à la fois.

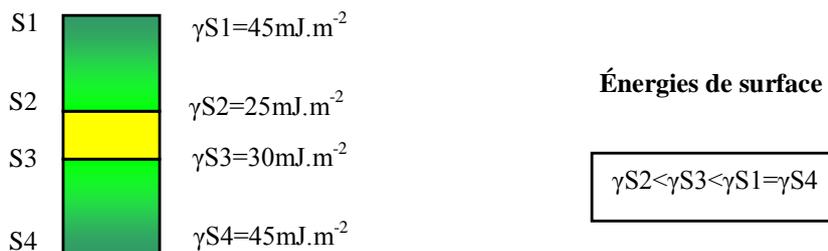


Figure I-6 : Retrait des films protecteurs par pelage

Cette préparation au report de la fabrication du film pixellisé comporte plusieurs étapes : le premier film protecteur est soustrait du film de transfert (1). Le film optique est laminé sur l'adhésif optique (2) pour obtenir un sandwich constitué du film optique, de l'adhésif optique et du film protecteur restant. Un traitement à base de fluor est réalisé sur le wafer de silicium pour le rendre hydrophobe. Le second film protecteur est enlevé (3) puis le film optique et l'adhésif sont laminés sur le wafer (4) L'adhésion du film pixellisé sur le wafer est assez bonne en cisaillement, en revanche le film se décolle facilement en traction (5). Le film pixellisé à reporter sur le verre de lunettes dispose ainsi d'un adhésif optique.

Cette méthode de préparation du film au report a l'avantage de permettre au wafer d'être réutilisable sans nettoyage. Elle comporte cependant des inconvénients dont l'origine est l'adhésif. En effet, l'adhésif utilisé pour maintenir le film pixellisé pendant sa fabrication est en contact avec des composants fluorés, ce sera le même qui devra assurer le collage entre le film pixellisé et la lentille. Le second inconvénient est lié au stockage éventuel des films pixellisés, en effet dans le temps, l'adhésion de la colle sur le wafer est de plus en plus forte et après une semaine le décollement du film pixellisé provoque des saccades qui laissent des traces visibles à la surface de l'adhésif.

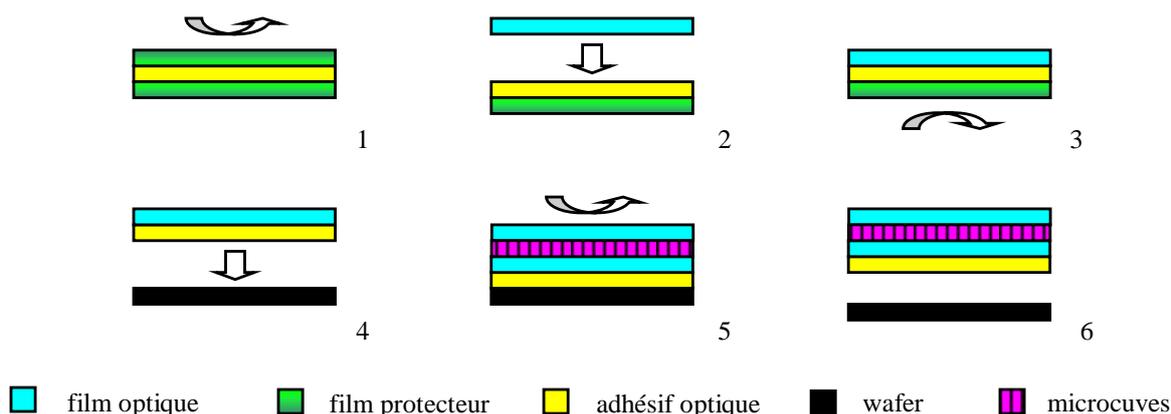


Figure I-7 : Préparation au transfert du film pixelisé à l'aide d'un traitement de surface

- *l'utilisation d'un film adhésif intermédiaire*

Avec cette méthode, nous utilisons deux films de transferts (1) et (1'). Le premier film de transfert est laminé sur un wafer non traité (2'), alors qu'un film optique est laminé sur le second (2) après le pelage du premier film protecteur. Le second film protecteur de l'adhésif laminé sur le wafer est retiré (3) pour permettre le laminage du sandwich contenant le film

optique à sa surface (4). L'étape de microfabrication est réalisée de façon classique à la surface du film optique (5). À cette étape le film pixellisé muni de son adhésif peut être pelé facilement car le film protecteur va rester collé sur le film adhésif du wafer.

L'avantage de cette méthode est de proposer un système qui reste décollable dans le temps. L'inconvénient est que le wafer est souillé par la couche d'adhésif et le film de protection. Une étape de nettoyage est indispensable mais elle est peu pratique car le film de protection est présent et pour une fois il joue son rôle.

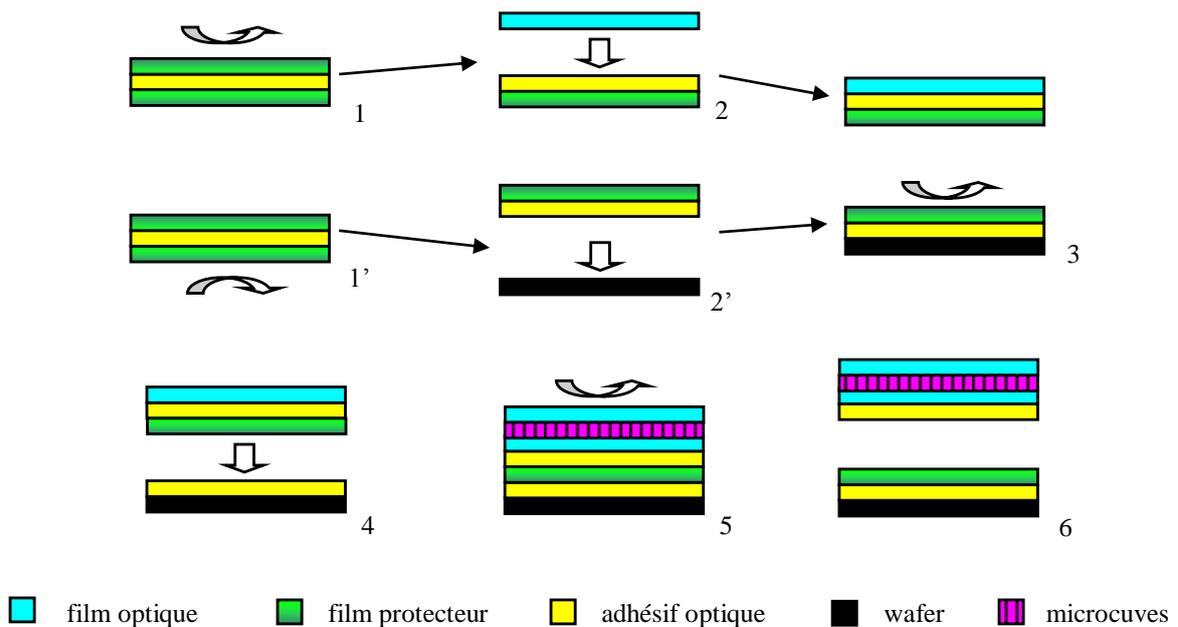


Figure I- 8 : Préparation au transfert du film pixellisé à l'aide d'un film sacrificiel

Cette technique utilisée en microélectronique permet de fabriquer rapidement, à partir d'une résine photosensible, des motifs de très petite taille sur une grande surface. La résine que nous avons utilisée dans cette première phase de démonstration de faisabilité correspondant à notre travail de thèse est la SU-8 [14] 2025 flex, commercialisée par la société *MICROCHEM CORP*. Il s'agit d'une résine époxy négative qui réticule sous l'effet d'une exposition aux UV. Les parties irradiées vont être insolubles dans les solvants utilisés pendant le développement, tandis que les zones non irradiées seront dissoutes. Le procédé de photolithographie de la résine SU-8, comprend trois grandes étapes :

- ***Le dépôt de résine***

Cette étape consiste à étaler la SU-8 sur le film optique. A cette fin, nous avons recouru à la technique du « *spin-coating* » ou tournette (voir Photo I-1-a), qui permet l'étalement par force centrifuge de la résine. Les paramètres de quantité de résine déposée, de vitesse, d'accélération, de temps de rotation donneront au dépôt son épaisseur et son homogénéité. L'épaisseur de résine étalée constituera, dans la suite du process, la hauteur des murs des microcuves. La résine subit un traitement thermique dit « *soft bake* » qui lui permet de durcir sans pour autant réticuler : une partie des solvants est évaporée, fixant ainsi les photoinitiateurs dans la SU-8.

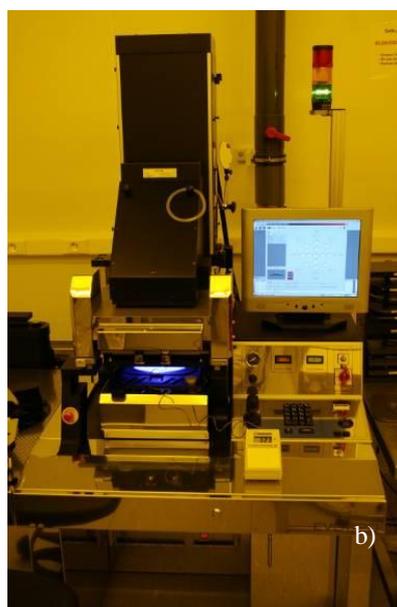


Photo I-1 : a) Le dépôt de résine par "spin coating" ; b) L'insolation UV de la résine

- ***L'exposition UV***

La SU-8 contient des photoinitiateurs qui, sous une exposition aux UV (à 365 nm), vont permettre d'amorcer la polymérisation de la résine. Un masque correspondant au motif de la microstructure est placé entre la résine et la source UV. La dose d'irradiation (proportionnelle au temps d'exposition) est ajustée à l'épaisseur de résine afin d'obtenir des microstructures avec les résolutions recherchées. La Photo I-1-b, ci-dessus, illustre l'exposition aux UV de la résine SU-8 avec un aligneur EVG 620.

- **Le développement**

Après un deuxième recuit thermique qui permet d'accélérer la cinétique de polymérisation de la résine, l'étape de développement a lieu. La SU-8 qui n'a pas réticulé est encore présente sur le film optique. Pour révéler la microstructure, il faut dissoudre cette résine en plongeant le wafer pendant quelques secondes dans un bain PGMEA (Propylène Glycol Méthyl Ether Acétate). Cette opération peut éventuellement être suivie d'un dernier recuit de densification et de relaxation des contraintes de la SU-8 microstructurée. La Photo I-2 représente deux clichés de microscope électronique d'une microstructure de géométrie hexagonale et d'une microstructure de géométrie aléatoire réalisées en SU-8 par photolithographie.

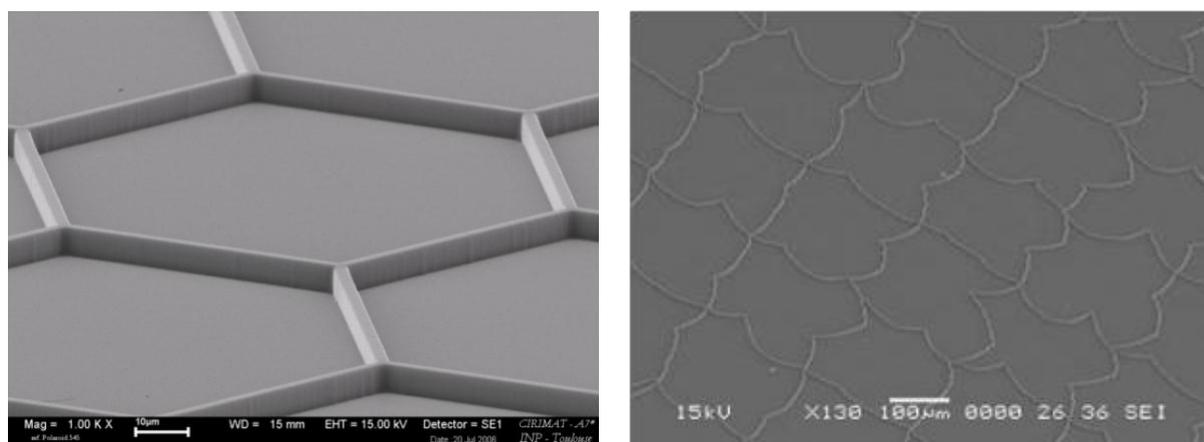


Photo I-2 : Les microcuves de géométrie hexagonale et aléatoire observées au MEB

2.1.3. Les couches barrière des parois et du substrat

Les matériaux fonctionnels utilisés dans la lentille digitale, comme les cristaux liquides, les électrochromes ou les photochromes, sont rarement stables dans le temps. Ils nécessitent d'être encapsulés afin d'être isolés de l'oxygène et de la vapeur d'eau présents dans l'environnement des lunettes. Les couches barrières permettent d'empêcher la diffusion d'un gaz ou d'un liquide dans ou à travers un solide. Pour notre application, deux types de couches barrières peuvent être envisagées : les couches barrières des parois et du substrat que nous présentons ici et les couches barrières du liquide que nous présenterons dans le paragraphe consacré au scellement des microcuves.

Ici les couches barrière ont surtout pour objectif de protéger les microstructures et le substrat des solvants contenus dans les liquides fonctionnels. Dans sa thèse, consacrée à la

réalisation de couches barrière [15], Isabelle SAVIN DE LARCLAUZE montre qu'il est possible de réaliser des dépôts conformes (Figure I-9-a) à partir d'hexaméthylsiloxane (HMDSO) sur les microstructures (Figure I-9-b) et sur le substrat PET (Figure I-9-c) par des plasmas froids.

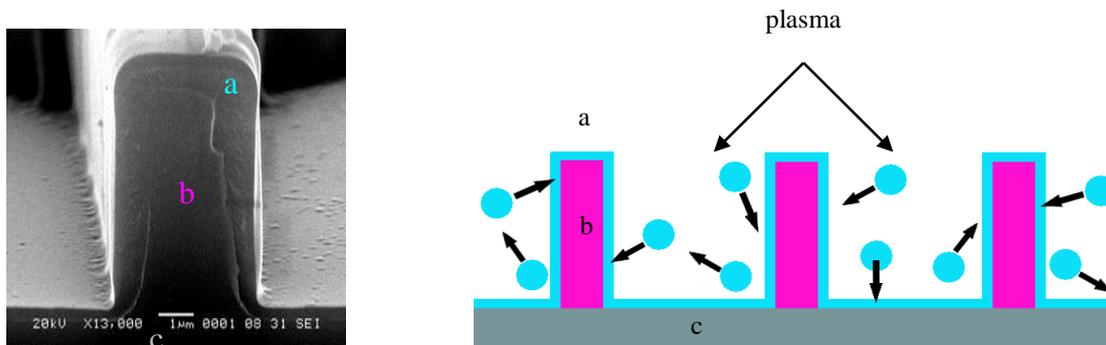


Figure I-9 : Le dépôt de la couche barrière sur les microcuves et le film substrat par plasma froid

La couche barrière offrant le meilleur compromis entre la perméabilité et les propriétés optiques et mécaniques est constituée d'un empilement de 400 nm de couches minérales SiO_x et de couches organiques SiOC_yH_z :

- Les tests de perméabilité à l'oxygène (OTR) des couches barrières sont concluants, la perméabilité d'un film PET de $12 \mu\text{m}$ est ainsi diminuée d'un rapport de 50.
- Les spectres de transmission dans le visible d'un film de PET et d'un film de PET recouvert de la couche barrière sont similaires.

Les tests de traction montrent que ces couches barrières résistent à une elongation de 6%.

2.2. Le remplissage des microcuves

L'étape de remplissage des microcuves a été initiée par Feng SHI [16] par l'étude du mouillage et des propriétés physico-chimiques de surfaces polymères microstructurées.

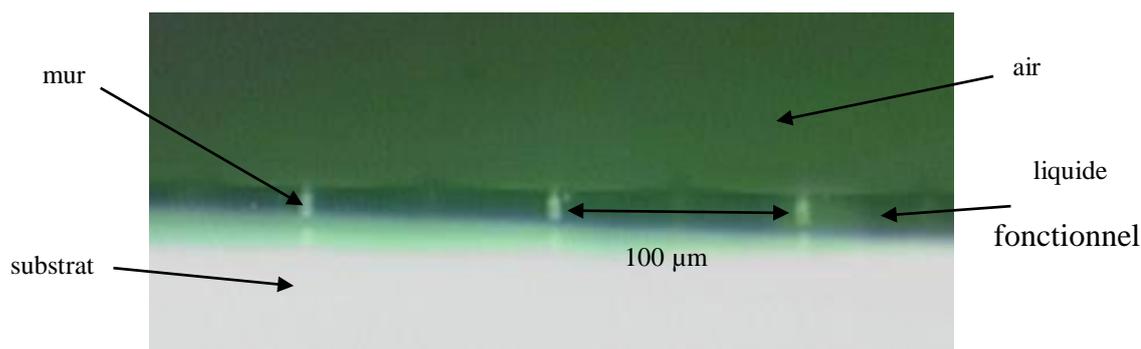


Photo I-3 : Une vue en coupe de microcuves remplies

Le mouillage des surfaces texturées a déjà fait l’objet de nombreuses recherches durant ces dernières années [17]. Il est désormais établi que la mouillabilité/non mouillabilité dépend de la rugosité de la surface et que la variation de l’angle de contact liquide - solide peut être décrite soit d’après le modèle de WENTZEL pour des surfaces physiquement texturées, soit d’après le modèle de CASSIE-BAXTER pour des surfaces chimiquement texturées. S’agissant des surfaces composites les modèles sont hybrides.

2.2.1. Le remplissage global

Dans le cas où les cuves doivent être remplies d’un seul et même liquide, le remplissage par « *doctor blade* », schématisé ci-dessous, est la méthode la plus appropriée.

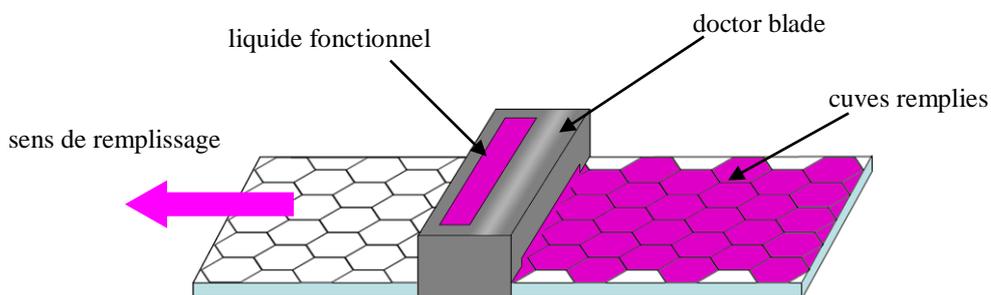


Figure I-10 : Le remplissage global par « *doctor blade* »

Cette technique consiste à venir déposer un film de liquide, d’épaisseur contrôlée, sur les microcuves. Le liquide se répartit de lui-même de façon homogène grâce aux traitements surfaciques mis en œuvre. La finalité de l’étude du remplissage est de réaliser un remplissage global des cuves par un liquide fonctionnel sans recouvrir le haut des parois des microstructures, cette zone étant réservée au scellement du dispositif. À cette fin, des

traitements de surfaces sont mis au point afin de modifier l'énergie de surface des matériaux. Pour augmenter la mouillabilité du liquide fonctionnel sur le substrat, la surface du polymère peut être traitée par un plasma O_2 . En revanche, nous voulons que le haut des murs « brise » le film de liquide déposé par un phénomène de démouillage de surface. Le haut des murs des microcuves possède un caractère hydrophobe grâce aux surfactants fluorés présents dans la formulation de la SU-8 qui ont migré à la surface de la résine. Cela favorise le démouillage spontané du liquide fonctionnel du haut des parois

2.2.2. Le remplissage par jet d'encre

La technologie du jet d'encre s'est considérablement améliorée et commence à intéresser le milieu de la microélectronique pour la précision et la vitesse des dépôts qu'elle procure. Il devient possible d'imprimer des solutions conductrices, pour réaliser des circuits électroniques ou des transistors [18]. La thèse de Stéphanie POIRIER [19] s'intègre dans la logique du projet optique digitale : le remplissage discontinu et sans contact par jet d'encre doit permettre de remplir individuellement les cuves d'un ou plusieurs liquides.

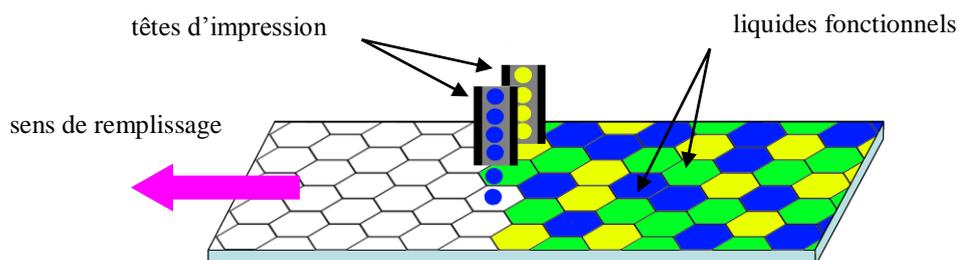


Figure I-11 : Le remplissage discontinu par jet d'encre

L'étude du remplissage par jet d'encre doit répondre à plusieurs questions portant sur :

- les familles de liquides déposables par jet d'encre, l'influence de leur rhéologie sur les paramètres à imposer aux têtes d'impression,
- la maîtrise du volume des gouttes formées et la précision du dépôt réalisé,
- la création d'un programme informatique capable de répondre à de nouvelles exigences comme le remplissage à un gradient d'indice ;

2.3. Le scellement des microcuves

Le scellement est la dernière étape de la fabrication du film pixellisé. Il doit assurer la solidité et l'étanchéité du système. Nous allons décrire successivement les trois modes de scellement qui ont été développés.

2.3.1. Le scellement sur les cuves remplies de liquide fonctionnel

Le principe consiste à recouvrir les cuves remplies d'un liquide fonctionnel avec un film adhésif optique par laminage (Figure I-12). L'adhésif apporte la fonction de scellement et le film la fonction de rigidité. Une adhésion de type structurale est réalisée entre la colle et le haut des murs de la microstructure. La colle, en contact avec le liquide de remplissage, doit être choisie de façon à ne pas interagir avec celui-ci, afin d'éviter les phénomènes de migration de colorants du liquide à l'intérieur de l'adhésif ou de dilution de l'adhésif par un solvant du liquide.

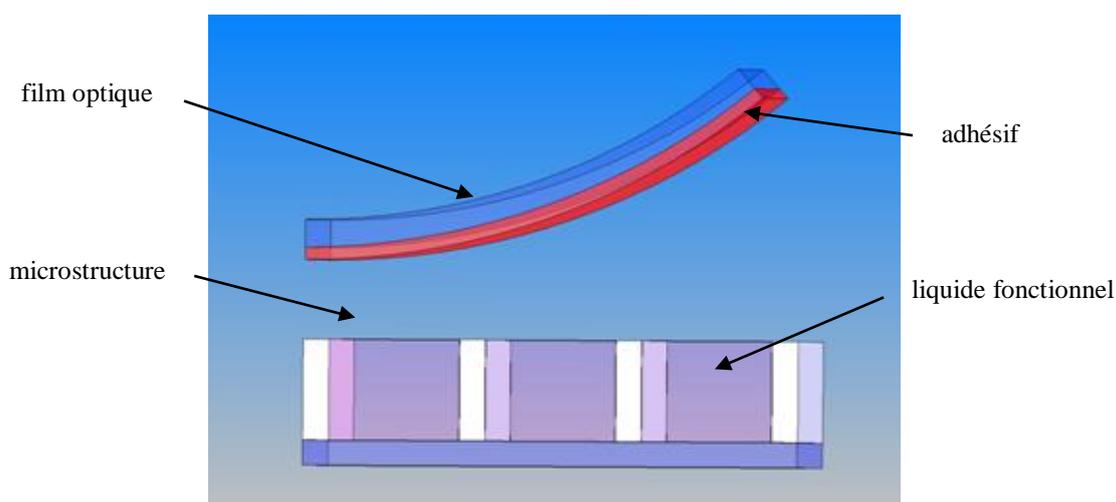


Figure I-12 : Le scellement des cuves par un film optique

2.3.2. L'encapsulation du liquide fonctionnel

L'encapsulation du liquide fonctionnel a un double objectif. Elle doit protéger le liquide fonctionnel des gaz extérieurs polluants tels que l'eau ou l'oxygène. Elle doit également protéger l'adhésif de scellement des solvants qui peuvent être présents dans le liquide. Nous décrivons ici deux méthodes d'encapsulation :

- ***L'encapsulation par le dépôt de polymère par évaporation***

Le parylène (di-para-xylylène) est un polymère utilisé dans de nombreux domaines pour réaliser des dépôts conformes, à température ambiante et sous vide, d'une épaisseur de quelques dizaines de nanomètres à plusieurs microns. Ses propriétés barrières [20], son caractère inerte à la plupart des solvants, sa biocompatibilité et sa transparence intéressent la médecine, la micromécanique ou encore l'aérospatiale. L'école suisse de l'ARC a montré qu'il est possible de déposer un film de parylène sur un liquide pour fabriquer des lentilles optiques ou des films minces [21]. Dans sa thèse [22], Virginie SANTUCCI démontre la faisabilité d'un scellement du film pixellisé contenant des liquides selon le principe schématisé ci-dessous.

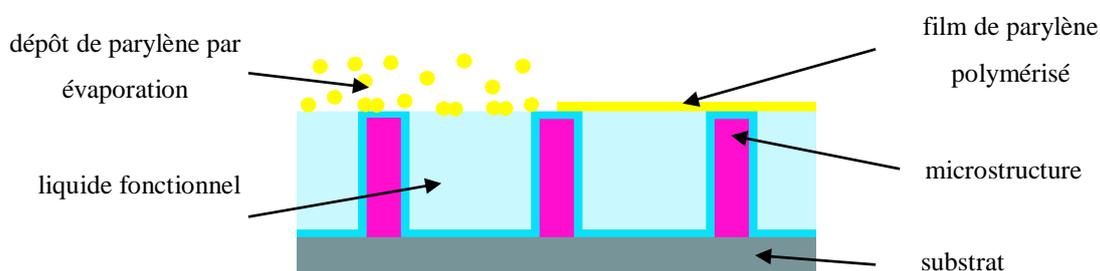


Figure I-13 : Le scellement par dépôt de parylène

- le parylène scelle le dispositif lors de sa polymérisation à la surface des murs des cuves,
- le parylène forme une membrane transparente à la surface du liquide fonctionnel.

L'étude devra permettre l'obtention d'un film possédant de bonnes propriétés barrières et optiques. Elle devra également permettre d'étendre le choix des liquides fonctionnels utilisables, aujourd'hui trop limité par le dépôt réalisé sous vide. Le projet européen Multipol [23] propose une voie intéressante par l'ajout de surfactant dans les liquides à recouvrir pour modifier leur pression de vaporisation. D'autres études proposent de déposer le parylène à des pressions plus élevées proches de la pression atmosphérique.

- ***L'encapsulation par démixtion de phase***

Il est aussi possible d'encapsuler les cuves par démixtion de phases [24] : les cuves sont remplies par une émulsion composée de monomères et du liquide fonctionnel. Après le remplissage des cuves, les deux phases se séparent, les monomères, choisis pour avoir une densité inférieure à celle du liquide fonctionnel, migrent à la surface des cuves pour être ensuite polymérisés. Le schéma du scellement par démixtion est présenté en Figure I-14.

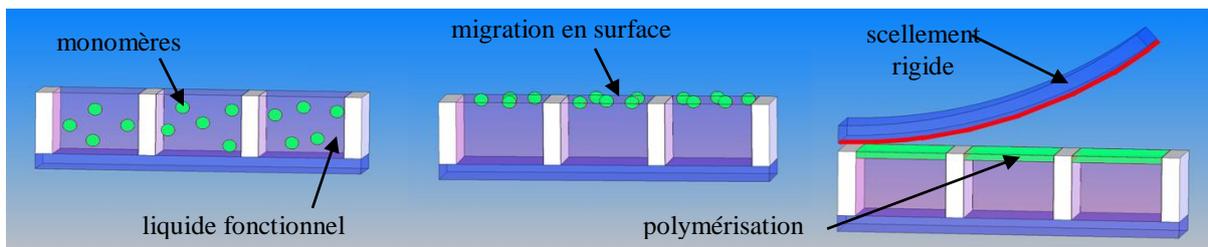


Figure I-14 : L'encapsulation par démixtion

La couche formée est très fine, à peine quelques microns d'épaisseur. Elle est également très fragile, elle doit donc être renforcée. Pour cela, un film adhésif rigide et transparent, idéalement le même que le substrat, est laminé à la surface de la couche d'encapsulation et renforce ainsi la structure.

2.4. Le remplissage par scellement

Le brevet « Réalisation d'un élément optique transparent comprenant une substance contenue dans des cellules » [25] décrit un procédé permettant de remplir les cuves d'un liquide fonctionnel et de les sceller par une même opération. Le liquide fonctionnel est déposé en excès sur l'un des bords du film microstructuré. Un film de PET transparent enduit d'un adhésif est laminé sur les microstructures.

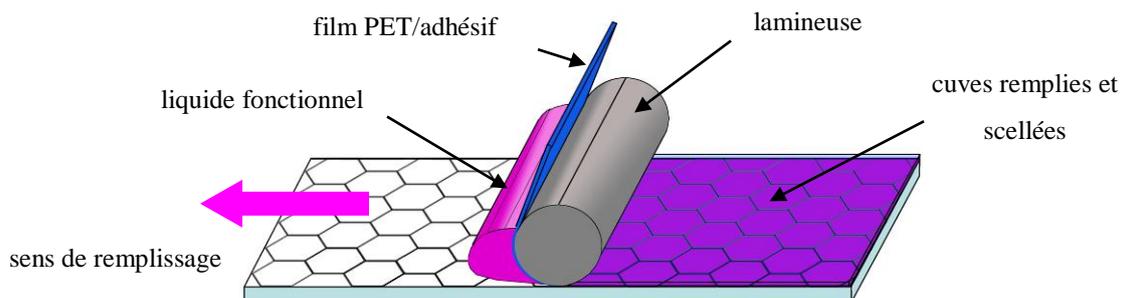


Figure I-15 : Le remplissage des cuves lors du scellement

La pression exercée par la lamineuse chasse l'excès de liquide vers les cuves suivantes. En vertu de la propriété newtonienne d'incompressibilité des liquides utilisés, on ne peut pas mettre plus de liquide dans une cuve qu'elle ne peut en contenir. L'adhésif du film colle le haut des murs et assure l'étanchéité de la cuve. Dans le cas du remplissage par scellement, la surface qui assure l'adhésion entre le film et les cuves est limitée à la surface de murs car le film ne peut pas coller les liquides.

2.5. Vers la conception et la réalisation de dispositifs actifs

Comme cela a été déjà mentionné, l'objectif affiché dans le projet d'optique ophtalmique pixellisée est la mise au point de nouvelles technologies qui apportent des fonctionnalités actives autorisant des interactions avec l'environnement et/ou le porteur. Il s'agit essentiellement dans un premier temps du contrôle des propriétés d'absorption et de teinte des verres de lunettes par effet d'électrochromisme, et de la maîtrise des réponses de chacun des pixels pour définir les profils de phase spécifiques aux corrections optiques souhaitées. Dès lors, la commande et le contrôle de ces modulations exigent d'une part des ressources énergétiques en termes de courant et/ou de champ électriques, et d'autre part, de manière implicite, la mise en œuvre d'électrodes conductrices.

Dès le démarrage du projet d'optique ophtalmique pixellisée, l'étude du volet énergétique a été initiée par le travail de thèse de José NAVARRO [26] qui a porté sur le développement de cellules photovoltaïques organiques transparentes dans le domaine spectral du visible. Des démonstrateurs mettant en œuvre des sources photovoltaïques pour moduler la réponse de films microstructurés en cuves remplies de matériaux électrochromiques ont déjà aussi fait l'objet de différents travaux au sein d'ESSILOR.

3. La problématique du report du film pixellisé sur la lentille ophtalmique

Afin de mieux appréhender le système que nous avons à reporter sur un verre de lunettes, nous venons de décrire les techniques de fabrication du dispositif optique constitué d'un substrat transparent, de microcuves remplies d'un liquide fonctionnel et d'un film de scellement. Il conviendra maintenant de broser un cahier des charges aussi complet que possible pour définir et poser le problème du report, dont l'objectif de résolution constitue notre contribution dans le projet global d'optique ophtalmique pixellisée.

3.1. Les objectifs de l'étude

La phase initiale de ce projet correspond à une réelle rupture technologique. Les choix des matériaux et des techniques permettant de les mettre en œuvre ne sont donc pas arrêtés. Par conséquent, il nous sera parfois difficile de préciser quantitativement les exigences à satisfaire pour établir ce cahier des charges.

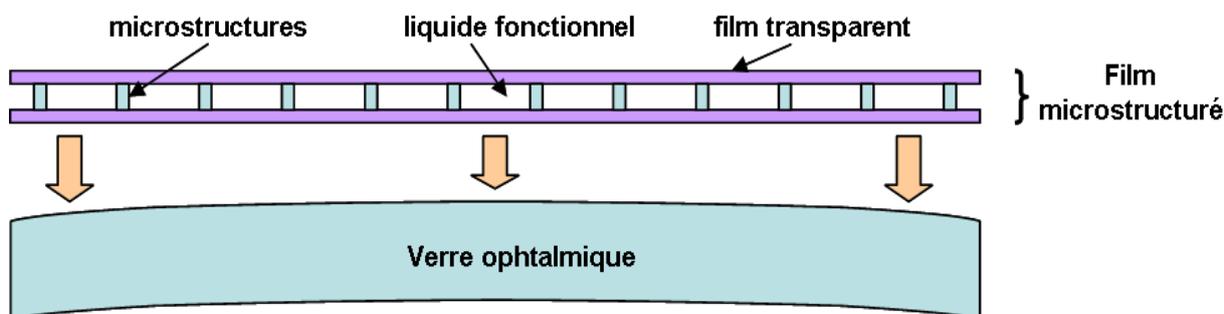


Figure I-16 : Le report « du plan à la sphère »

La problématique du passage d'une surface plane à une surface sphérique est assez simple à visualiser. Il suffit d'imaginer dans un premier temps de recouvrir une demi-sphère avec un film élastique, comme un ballon de baudruche par exemple : s'il n'est pas dans le même temps collé sur son support, le film reprend sa forme d'origine lorsqu'on le relâche. Les choses se passent différemment si l'on recouvre maintenant cette surface avec un film non étirable, une feuille d'aluminium par exemple : dans ce cas, des plis se forment lors du report. En revanche, si l'on reporte une feuille plastique, comme un film alimentaire, sur une cette même surface, le film épouse la forme sphérique et conserve cette géométrie.

La mise en forme d'un matériau sur une surface non-plane dépend donc d'abord de sa nature. Toutefois, une assistance thermique éventuelle, avant et pendant la phase de formage, constitue également un élément essentiel. En effet, généralement, pour déformer un matériau (verre, plastique,...) initialement présenté sous forme de plaque, on le chauffe pour le ramollir et l'on profite de sa ductilité pour le déformer. C'est ce que l'on appelle le principe du thermoformage dont il en existe plusieurs variantes [27]. Ce procédé industriel, très largement utilisé, permet de déformer une feuille thermoplastique plane contre un moule, dont elle épouse la forme, pour donner une pièce en volume. L'utilisation de cette technique est possible grâce au comportement des matières thermoplastiques qui prennent une consistance caoutchouteuse lorsqu'elles sont portées au dessus de leur température de transition vitreuse et

qui peuvent alors être facilement transformées et figées. Nous avons schématiquement représenté le principe du thermoformage générique sur la Figure I-17 .

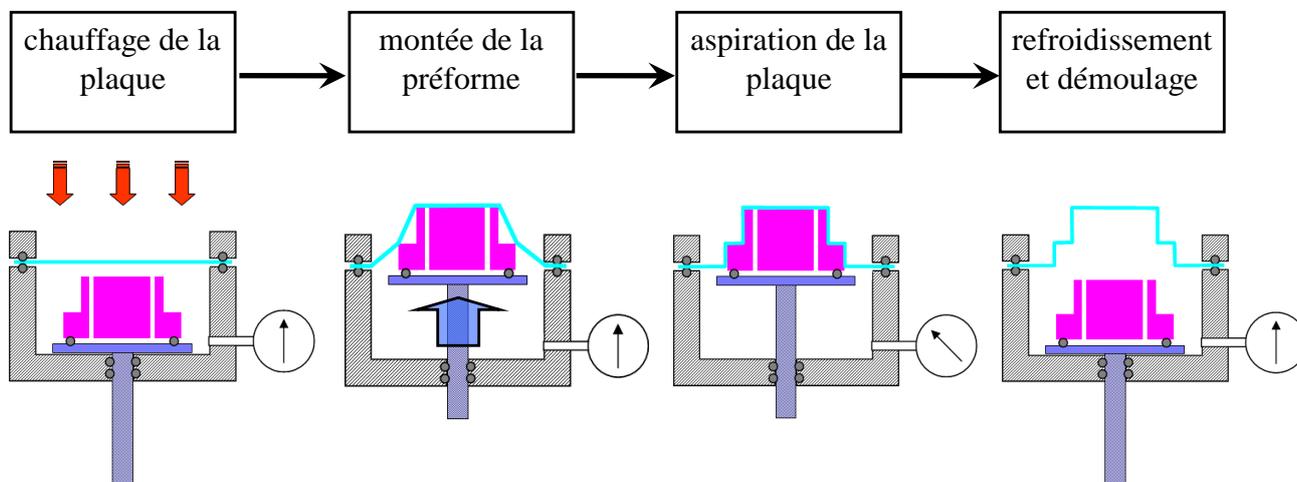


Figure I-17 : Le principe générique du thermoformage

Le cycle de ce processus générique se décompose en quatre étapes, comme suit :

- la mise en place et le chauffage d'une plaque thermoplastique,
- le formage par emboutissage et/ou aspiration du film contre la préforme,
- le refroidissement de l'objet à la température ambiante,
- le démoulage de la pièce ainsi obtenue à la forme définitive.

Des opérations de finition comme la découpe, la soudure, le collage, le scellage à chaud ou la métallisation peuvent intervenir par la suite.

3.2. Caractéristiques imposées par la nature et les géométries de la lentille ophtalmique hôte

Les caractéristiques du verre ophtalmique sur lequel le film pixellisé doit être reporté, telles que sa nature et sa géométrie, sont des données essentielles à notre approche du report.

Le projet d'optique digitale est stratégique pour *ESSILOR* car il préfigure le verre de lunettes du futur. Le film pixellisé est considéré comme un produit de haute technologie devant apporter une forte valeur ajoutée au verre ophtalmique. Aussi, le verre choisi comme support du film pixellisé est le verre organique haut de gamme *STYLIS*[®] à haut indice de

réfraction de 1,67. Il s'agit d'un verre thermodurcissable obtenu par la polymérisation de monomères liquides dont la température de transition vitreuse est comprise entre 60 et 70 °C. Pour notre problématique de report, notamment l'écriture du cahier de charges, cela implique de ne pas échauffer le verre au-dessus de cette température lors du report du film pixellisé à sa surface, car cela entraînerait sa propre déformation.

Outre la valeur de l'indice de réfraction du matériau qui compose une lentille, c'est aussi le rayon de courbure de sa surface qui fixe son degré de correction. Ici pour notre étude, nous avons retenu des verres unifocaux dont la surface consiste en une sphère de rayon approprié pour générer la correction visée. On appelle dioptre le système optique formé de deux milieux d'indices différents, n_1 et n_2 , séparés par une surface sphérique de faible ouverture. La puissance de la convergence ou de la divergence d'un dioptre est donnée par la relation :

$$D = \frac{n_2 - n_1}{R} \quad (I-1)$$

La puissance de correction du verre de lunettes est donc inversement proportionnelle à son rayon de courbure R : plus le rayon du verre R est petit et plus le verre est puissant. La formule nous indique également que plus l'indice du matériau n_2 constituant la lentille est élevé, plus le verre a un pouvoir correcteur élevé, n_1 étant l'indice de l'air. Le Tableau I-1 présente les caractéristiques de quelques verres composant la gamme dénommée "1,67" chez *ESSILOR*.

PUISSANCE NOMINALE	Épaisseur bord (mm)	DIAMÈTRE (mm)	RAYON de courbure face convexe (mm)	DIOPTRE N = 1,530 (m ⁻¹)	DIOPTRE N = 1,665 (m ⁻¹)
+6.00	0,8	65	67,8	7,82	9,81
+4.00	0,8	65	83,2	6,37	7,99
+2.00	1,0	70	105,6	5,02	6,30
0.00	2,0	75	133,4	3,97	4,99
-2.00	3,3	75	189,7	2,79	3,51
-4.00	5,5	75	262,5	2,02	2,53
-6.00	7,9	75	326,3	1,62	2,04
-10.00	9,8	65	628,2	0,84	1,06

Tableau I-1 : Caractéristiques optiques des verres ophtalmiques "1,67"

Nous observons que le verre le plus puissant, soit le plus courbé de la gamme, a un rayon de courbure de 67,8 mm. En revanche, le verre dont la puissance nominale est de -10.00 a un rayon de courbure de plus de 600 mm, ce qui correspond, par rapport au diamètre d'un verre, à une surface qui peut être considérée comme pratiquement plane. Les verres commercialisés par *ESSILOR* sont des verres finis, c'est-à-dire qu'ils possèdent des revêtements anti-rayures ainsi que les options d'antireflets et d'anti-salissures. Ils suivront une dernière étape d'usinage avant d'être montés dans les laboratoires dits de prescription. Nous considérerons pour la suite de notre étude, que les verres ne sont dotés d'aucun de ces revêtements. En effet, ces couches ne présentent plus d'utilité si elles se retrouvent intercalées entre le verre et le film pixellisé et fonctionnalisé. Pire, les couches anti-salissures sont des couches fluorées qui empêcheraient l'adhésion du film pixellisé sur le verre.

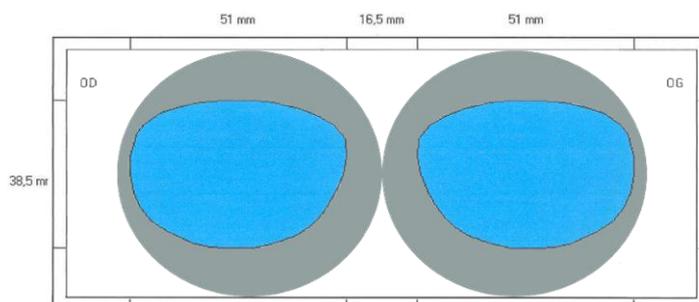


Figure I-18 : Plan de détournement au gabarit

Pour adapter le verre à la monture spécifique choisie par le porteur, il convient d'usiner la base initiale. Cette opération que l'on nomme « le détournement » ne modifie évidemment pas le rayon de courbure du verre mais uniquement son diamètre. Sur la Figure I-17 : Le principe générique du thermoformage, la forme du verre apparaît en gris et le gabarit de détournement du verre souhaité en bleu.

4. Conclusion

Le projet d'optique ophtalmique active et pixellisée que nous venons de décrire, en rapportant essentiellement sur les aspects de réalisation déclinés selon les principales étapes, est un projet très ambitieux qui correspond à une réelle rupture technologique dans le domaine. Le positionnement en quelques mots de notre objectif dans le cadre de ce projet à la fois de recherche et de développement est la mise au point d'une méthode de report d'un film souple, préfonctionnalisé selon des technologies « planes », sur un substrat hôte courbe. Ce

film souple est aussi fragile compte tenu de ce qu'il est déjà le résultat d'un assemblage complexe, très hétérogène, avec une structuration particulièrement fine puisqu'elle est susceptible de présenter des éléments solides submicroniques.

Au regard de la présentation de notre objectif dans le contexte du projet global, que nous venons de faire, il apparaît d'ores et déjà évident que pour approcher au mieux cet objectif nous devons nous poser trois questions essentielles :

- quelle est la limite admissible de déformation après report du film pour que soit conservée l'intégrité de la fonction optique visée ?
- quelle est la température maximum admissible lors du processus de report qui n'entraîne pas une dégradation des matériaux composant le film préprocessé ?
- quel est le niveau de contraintes résiduelles stockées après l'hétéro-assemblage qui reste non préjudiciable pour la fiabilité de l'objet réalisé et sa durabilité ?

À cette étape de l'étude, nous n'avons pas ou très peu abordé l'examen des exigences précises à satisfaire, en termes de valeurs seuils de chacun des paramètres pertinents que nous venons d'énumérer, pour assurer les fonctionnalités envisagées dans les applications spécifiques de l'optique ophtalmique. Ceci est bien sûr lié au fait qu'en cette phase de démarrage de l'ensemble des études tout est à concevoir et à construire pour démontrer d'abord les faisabilités, de sorte que les cahiers de charges ne sont pas encore écrits. Quoiqu'il en soit, le souci de minimiser la température de thermoformage, les déformations et les contraintes stockées dans cette étape intervenant en fin d'élaboration de l'objet visé, est et restera le guide essentiel dans notre recherche d'optimisation des techniques de report existantes ou de proposition de procédés nouveaux.

Chapitre II

Le report du film pixellisé sur la lentille ophtalmique

Ce chapitre est consacré à une analyse comparée des différents modes envisageables pour le report du film pixellisé sur la surface sphérique d'une lentille afin d'orienter notre choix vers celui qui pourrait être le plus adapté. Nous décrirons d'abord les procédés qui étaient déjà développés chez *ESSILOR* au démarrage de notre étude. Nous estimerons ensuite, sur la base d'une première évaluation s'appuyant sur des modèles géométriques simples, les taux de déformation de ces films qu'il est permis d'espérer après report sur les verres et ce, en considérant la gamme de corrections optiques usuelles. L'analyse comparée de ces résultats nous conduira à proposer un principe de mise en forme et de report nouveau pour ce type d'application. Nous décrirons enfin les différentes variantes des modes opératoires qui pourraient s'appuyer sur ce principe.

1. Les pratiques du report de films chez *ESSILOR*

ESSILOR possède un savoir-faire certain concernant le report de films à la surface des verres produits. Nous présentons ici deux différents procédés de report, le premier déjà utilisé et le second encore en phase de développement dans l'entreprise.

1.1. Le collage d'un film de protection sur le verre

Les étapes de détourage et de surfaçage des verres à correction variable nécessitent une protection de la face convexe du verre. Cette protection est constituée d'un film de PVC adhésif sans colle. Le collage de ce film est réalisé avec un applicateur de films commercial, élaboré par la société 3M [28], dans lequel le verre est positionné. Le film de protection est posé sur le module et maintenu de façon étanche par un anneau. Un vide est créé dans le module, ce qui a pour effet de faire monter le vérin par aspiration et provoquer le plaquage du film contre le verre.

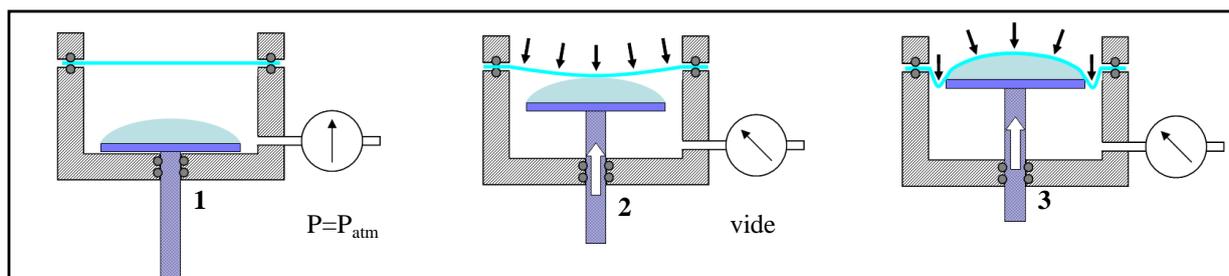


Figure II-1: Le collage du film protecteur du verre aux étapes d'usage

Ce procédé est suffisant pour coller un film protecteur en PVC à la surface des verres, mais il n'est adapté qu'aux seuls films facilement étirables à température ambiante.

1.2. Le procédé de report MARS

Le prototype MARS est une machine en développement conçue pour conformer un film plan flexible fonctionnalisé sur une lentille optique [29]. Cette machine a été réalisée à partir du module commercial de 3M mentionné précédemment. Le système a donc été complété et amélioré pour permettre le chauffage du film optique avant son report. Il a également été doté d'un tampon en silicone possédant la forme, la taille, et la dureté appropriées à la face à traiter et au rayon de courbure du verre. Dans le descriptif suivant le collage est assuré, à titre d'exemple, par une colle UV ; le procédé MARS est en mesure de réaliser le report de film adhésif sans l'utilisation de la colle UV. La Figure II-2 décrit schématiquement la séquence opératoire employée dans le procédé MARS.

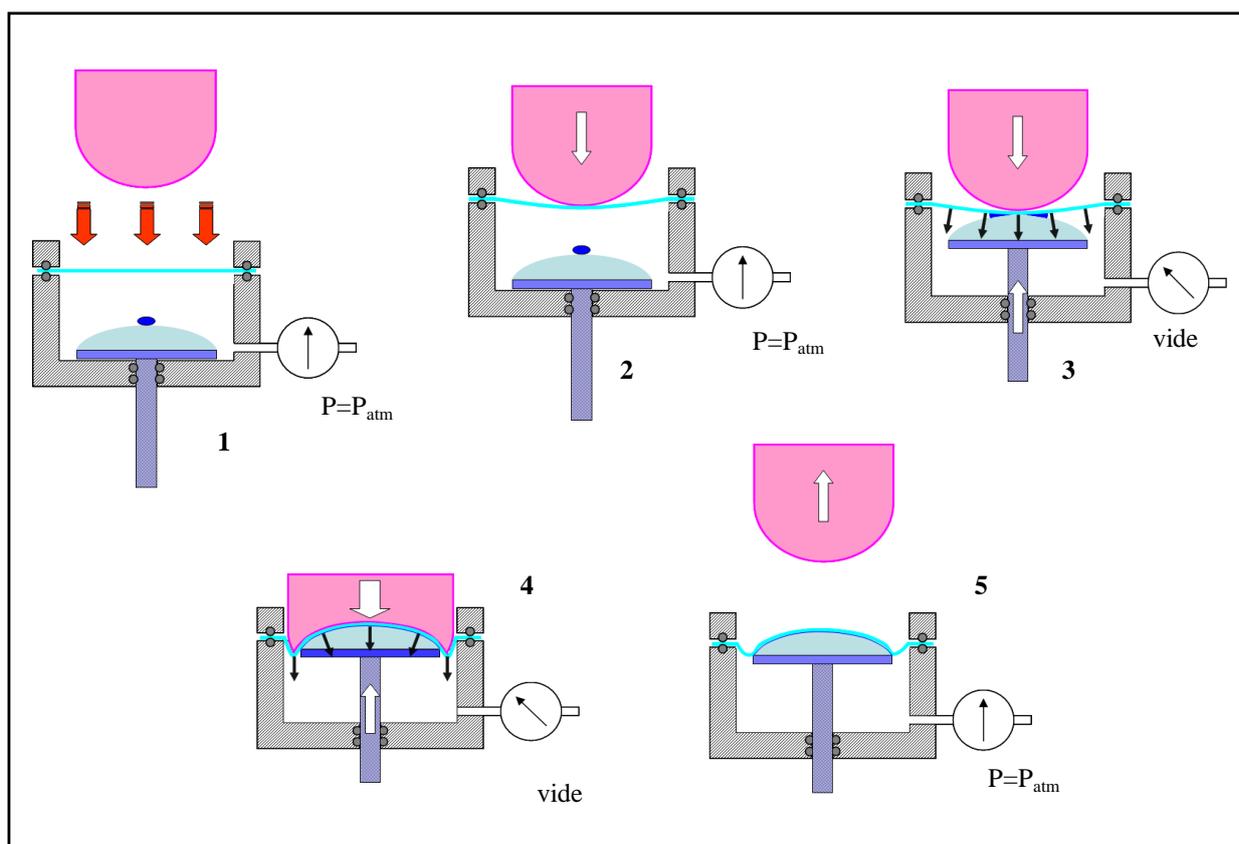


Figure II-2: Les étapes du report du procédé MARS avec une colle liquide

Le verre est déposé sur son support à l'intérieur de l'enceinte à vide et de la colle liquide est placée à sa surface. Le film fonctionnalisé est placé au-dessus et maintenu par un anneau. Le film est chauffé par convection jusqu'à sa température de formage (Figure II-2-1). Le tampon vient au contact du film et le déforme jusqu'à atteindre un seuil de pression mécanique déterminé (Figure II-2-2). Cette étape permet de préformer le film. Une dépression est ensuite créée au sein du module à vide par système Venturi et entraîne la montée par aspiration du plateau porte-lentille et de la lentille optique (Figure II-2-3). Cette étape permet l'initiation du contact conformal entre la lentille optique et le film tout en étalant la colle liquide. Le tampon est de nouveau abaissé afin de propager l'établissement du contact conformal entre la lentille et le film (Figure II-2-4). Le collage définitif du film sur le verre est réalisé par polymérisation UV de la colle dans une autre zone de la machine. Le cycle s'achève par la remontée du tampon et la coupure du vide dans l'enceinte (Figure II-2-5).

1.3. Le procédé de report BST

Un troisième procédé de report, appelé BST [30], a été développé chez *ESSILOR* afin notamment de transférer des films polarisants à la surface de lentilles optiques. Ce procédé sépare l'étape de thermoformage de l'étape de report :

- le thermoformage : Le film polarisant est chauffé avec de l'air chaud jusqu'à sa température de transition vitreuse (Figure II-3-1). Il est ensuite thermoformé par emboutissage entre deux moules métalliques complémentaires (Figure II-3-2 et 3). Le moule est retiré après refroidissement du film, il a la forme d'une coque (Figure II-3-4) qui correspond à la géométrie du moule;

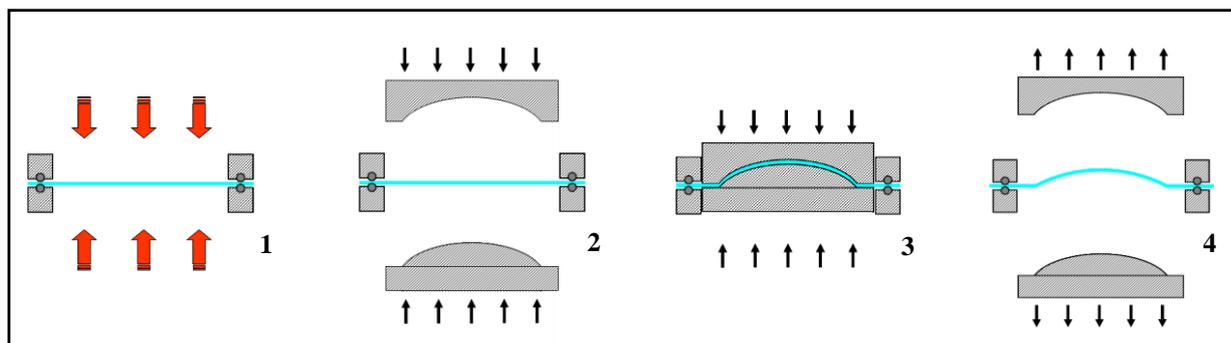


Figure II-3 : Le thermoformage selon BST

- le report : A ce stade, le film a alors la forme exacte du verre sur lequel il doit être

placé. De la colle liquide (Figure II-4-1) est déposée à la surface du verre et le retournement de la coque est réalisé à l'aide d'un tampon souple en silicone (Figure II-1-2). Le tampon est ensuite déplacé vers la lentille de façon à plaquer le film sur la surface convexe du verre (Figure II-4-3) tout en étalant la colle de façon homogène.

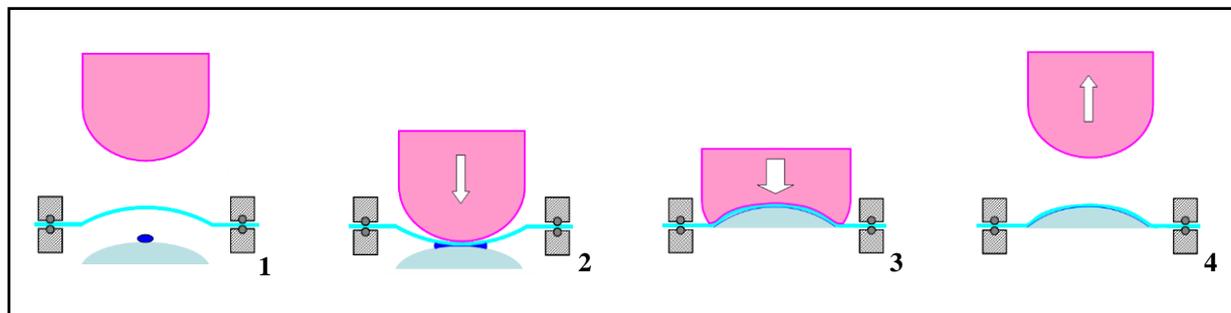


Figure II-4 : Le report selon BST

1.4. Évaluation de la compatibilité de ces procédés avec le report du film pixellisé

Les outils mis en place chez *ESSILOR* pour le report de films protecteurs ou fonctionnalisés ne nous satisfont pas pour le report du film pixellisé pour les raisons suivantes :

- l'utilisation d'un tampon dans le cas de MARS nous fait redouter l'endommagement de la microstructure du film pixellisé qui est une structure pouvant s'avérer comme fragile. En effet, nous avons vu dans le chapitre 1 que le film fonctionnalisé d'intérêt pixellisé est composé de microcuves de l'ordre de 20 μm de profondeur, de 100 μm de côté, et de parois de quelques micromètres, remplies d'un ou de plusieurs liquides fonctionnels, et insérées entre deux films polymères souples. Bien que le système complet puisse être considéré incompressible, nous avons préféré, pour éviter l'écrasement de la microstructure, ne pas avoir à utiliser le tamponnage du procédé MARS.
- le film thermoformé au moyen du procédé MARS subit au cours de l'emboutissage, lorsqu'il entre en contact avec le verre hôte, un refroidissement qui est relativement rapide et aussi, à notre sens, de manière incontrôlée. D'une part, la montée du couple vérin support est imposée par la mise sous vide de la chambre et se produit dans un temps très court. D'autre part le régime transitoire correspondant à l'échange thermique entre le film préalablement chauffé et le verre froid – essentiellement régi par le mécanisme de conduction et donc par les seules propriétés thermophysiques des

matériaux mis en jeux – est lui aussi court compte tenu de la faible masse thermique du film. Dans ces conditions, et si dans le même temps l'hétéro-assemblage film / verre est scellé au moyen d'une colle peu compliant, il peut se produire un phénomène de trempe préjudiciable induisant le piégeage de contraintes mécaniques. La Photo II-1 est un cliché infrarouge provenant de MARS qui montre le refroidissement d'un film de PET initialement chaud lorsqu'il entre en contact le substrat. Ce refroidissement est presque instantané, ici le film passe de 170 °C à 60 °C en moins d'une demi-seconde.

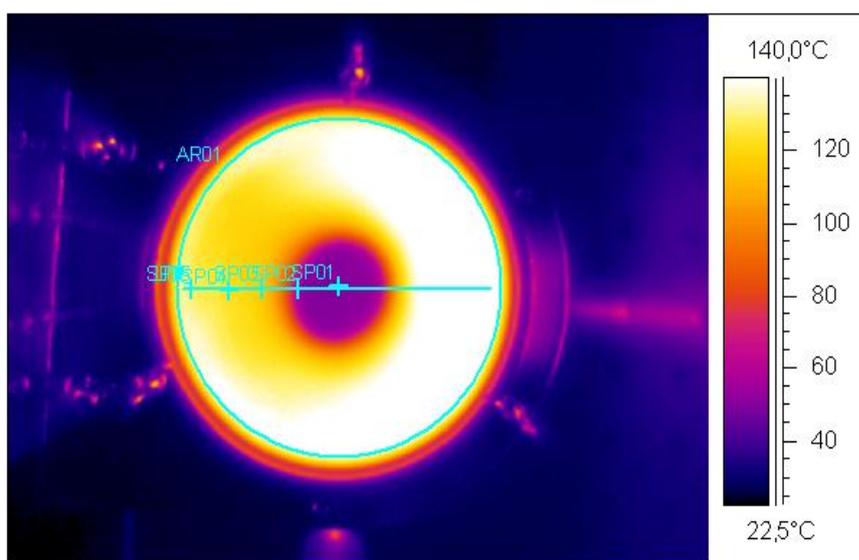


Photo II-1 : Refroidissement du film lors de sa mise en contact avec le verre

- Le phénomène de double retournement de concavité est préjudiciable pour les sollicitations auxquelles est soumis le système et notamment lorsqu'on aura à traiter des couches minérales fragiles comme les antireflets, les couches barrière ou les électrodes conductrices.
- L'enduction et l'étalement de la colle liquide au moment du thermoformage ne permet pas de maîtriser parfaitement son épaisseur entre le film et le verre de sorte que le risque de rajouter un niveau de puissance correctrice non souhaitée est à prendre en considération.

2. Considérations préliminaires sur la déformation du film au cours du report

Dès le démarrage de notre travail sur cet objectif de report très spécifique, il nous a paru nécessaire d'appréhender la problématique de la conformation du disque initial plan à la surface sphérique de la lentille par une première approche d'évaluation des déformations simplifiée. Il nous apparaissait clairement que quelques considérations préliminaires sur les modes ou principes mêmes de conformation que nous pouvions entrevoir, complétées par les résultats de calculs basiques que nous pouvons y associer, pouvaient nous aider à choisir le mode de report le plus approprié à notre problématique. C'était par ailleurs la voie pour apprécier l'ordre de grandeur des niveaux de déformations à attendre.

Nous avons donc cherché à obtenir une estimation des déformations imposées à un disque plan (représentant le film pixellisé) supposé infiniment mince et de rayon r lors de son report sur une calotte sphérique (représentant le verre ophtalmique) de rayon R , de hauteur h_c , d'angle α et de longueur d'arc de méridienne l . Les données géométriques du problème posé sont illustrées sur la Figure II-5,

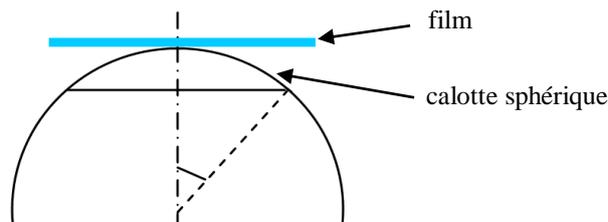


Figure II-5 : Schéma du film à reporter sur une calotte sphérique

Le rayon de la calotte correspond au rayon des verres choisis pour recevoir le film pixellisé. À partir du schéma ci-dessus nous pouvons établir les formules suivantes :

La superficie A_d du film est donnée par :

$$\boxed{A_d = \pi.r^2} \quad (\text{II.1})$$

La hauteur de la calotte h_c et la valeur de l'angle α sont reliées par les expressions suivantes :

$$\cos \alpha_c = \frac{R - h_c}{R} \quad \text{et} \quad \boxed{h_c = R(1 - \cos \alpha_c)} \quad (\text{II. 2})$$

L'aire A_c d'une calotte sphérique est donnée par la relation :

$$\boxed{A_c = 2\pi.R.h_c} \quad (\text{II. 3})$$

La longueur d'un arc l_c de la calotte est quant à elle définie par :

$$l_c = \frac{\pi}{180} \cdot \alpha_c \cdot R \quad (\text{II. 4})$$

De manière schématique, nous pouvons en première analyse décliner l'étape à la fois de conformation et de report selon trois modes opératoires caractérisés par trois conditions bien distinctes. Nous les examinerons successivement en considérant dans chaque cas le taux de déformation induit. L'analyse comparée des résultats obtenus sera ensuite mise à profit pour étayer notre proposition d'un nouveau procédé qui pourrait mieux satisfaire aux exigences spécifiques qui nous sont posées.

2.1. Report de type 1 : repliement du disque sans le contraindre dans ses diamètres

Nous définissons en tant que report dit de type 1 celui où nous replions le disque sans le contraindre dans ses diamètres, c'est-à-dire sans étirement de telle sorte que la longueur de l'arc de la calotte l_1 soit égale au rayon r :

$$l_1 = r \quad (\text{II. 5})$$

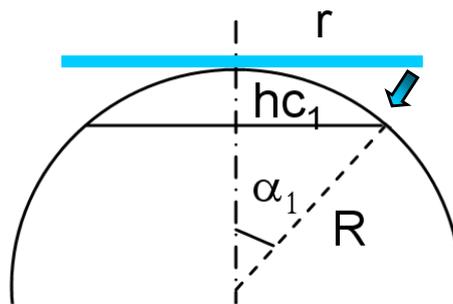


Figure II-6 : Schéma du report de type 1

Dans cette condition, nous pouvons calculer α_1 à partir de (II.4) puis h_{c1} à partir de (II.2). Cela nous permet d'évaluer les variations relatives de surface du film depuis la forme en disque plan de diamètre r jusqu'à la calotte obtenue après ce report de type 1 avec la formule :

$$\frac{\Delta A_1}{A_1} = \frac{A_{c1} - A_d}{A_d} \quad (\text{II-6})$$

La Figure II-7 reproduit ces variations en fonction du rayon de courbure R de la lentille et paramétrées par la valeur du rayon r du disque – c'est-à-dire le film – initial.

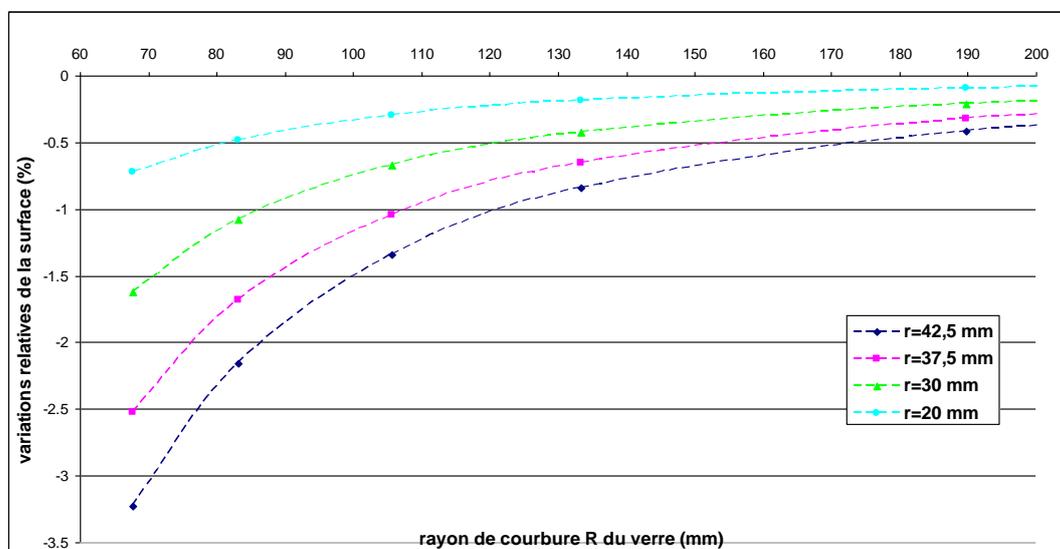


Figure II-7: Variations relatives de la surface en fonction du rayon de courbure R du verre et du rayon r du disque lors d'un report de type 1

Ce report de type 1 qui, en pratique, pourrait correspondre à une simple aspiration du film vers le support, n'est bien sûr pas satisfaisant : les déformations surfaciques relatives qui apparaissent ici en valeurs négatives, correspondent à la formation de plis lors de la conformation du film sur le support. Remarquons que plus le rayon du film à reporter est réduit, plus les recouvrements sont faibles. En nous représentant l'image de ballons enveloppés dans du papier aluminium - donc inextensibles - nous nous attendions tout de même à des variations relatives de surfaces de recouvrement supérieures à - 2,50 % pour le report d'un film de rayon 37,5 mm sur un verre +6.00.

2.2. Report de type 2 : repliement du disque juste contraint pour conserver sa surface

Dans ce cas de figure, nous supposons que l'aire du film est la même avant et après report de telle sorte que :

$$\boxed{A_{c_2} = A_d} \text{ (II. 6) soit encore}$$

$$\boxed{\pi \cdot r^2 = 2\pi \cdot R \cdot h_{c_2}}$$

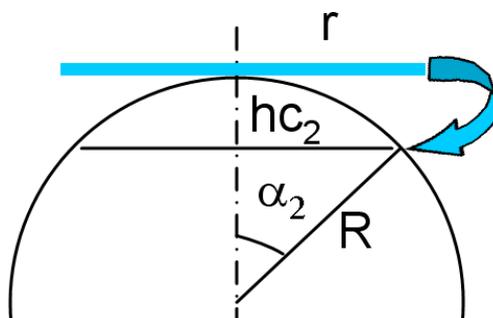


Figure II-8 : Schéma du report de type 2

Nous pouvons alors réécrire la hauteur de la calotte sous la forme

$$\boxed{h_{c_2} = \frac{r^2}{2R}} \text{ (II. 7)}$$

et le calcul de l'élongation, définie comme le rapport entre l'arc de méridien et le rayon du disque initial du film lors de son report, conduit à l'expression suivante :

$$\boxed{\frac{\Delta l_2}{r} = \frac{\frac{\pi}{180} \cdot \alpha_2 \cdot R - r}{r}} \text{ (II. 8)}$$

Pour simplifier, nous nommerons cette élongation qui se développe le long du méridien de la calotte sphérique, « taux d'élongation radiale » en nous référant aux rayons du disque initial. La Figure II-9 ci-après montre l'influence du rayon de courbure du verre et du rayon du film sur l'étirement radial engendré par ce type de report.

Dans le cas le plus défavorable, c'est-à-dire un verre +6.00 de faible rayon de courbure – 67,8 mm – et un film en forme de disque ayant un rayon 42,5 mm, cette hypothèse qui suppose la conservation de la surface du film après report conduit à une déformation "radiale" modérée de seulement 1,7 %.

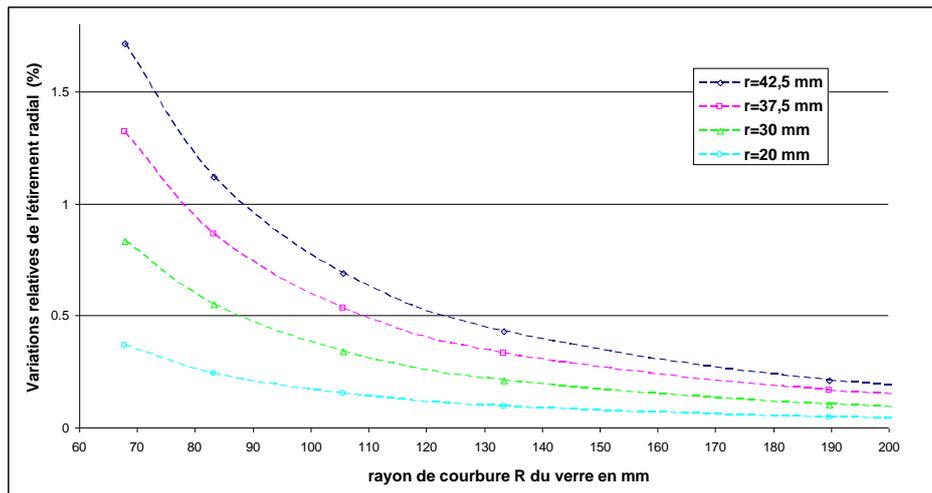


Figure II-9: Variations en valeurs relatives de l'éirement radial en fonction du rayon de courbure R du verre et du rayon r du disque lors d'un report de type 2

2.3 Report de type 3 : repliement du disque contraint avec projection des bords

Dans ce dernier cas de figure, nous réalisons une projection du film de telle sorte que le rayon r soit égal à la moitié du diamètre de la base de la calotte sphérique, autrement dit que le film à reporter possède la même surface que la surface sur laquelle le verre est posé.

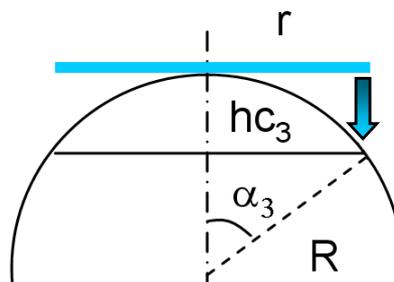


Figure II-10 : Schéma du report de type 3

Avec cette projection, la longueur d'arc l_{c3} devient :

$$l_{c3} = \frac{\arcsin\left(\frac{r}{R}\right) \times \pi R}{180}$$

ce qui nous permet d'établir les déformations relatives en termes d'éirement radial et de modification de surface :

$$\frac{\Delta l_3}{r} = \frac{l_{c3} - r}{r} \quad \text{et} \quad \frac{\Delta A_3}{A_3} = \frac{A_{c3} - A_d}{A_d}$$

Les Figure II-11 et II-12, ci-après, montrent l'influence du rayon de courbure du verre ainsi que du rayon du film sur l'étirement d'une part radial et sur l'expansion surfacique engendrés par ce report de type 3 d'autre part. En se plaçant comme précédemment dans le cas le plus défavorable, c'est-à-dire pour une lentille à +6.00 de correction et pour un film à reporter ayant un diamètre de 85 mm, ce type de report génère quant à lui une déformation "radiale" de l'ordre de 8 %.

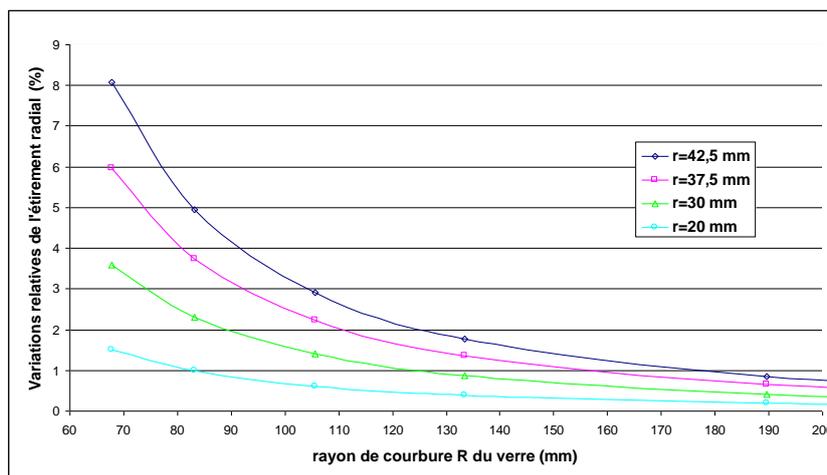


Figure II-11 : Variations en valeurs relatives de l'étirement radial en fonction du rayon de courbure R du verre et du rayon r du disque lors d'un report de type 3

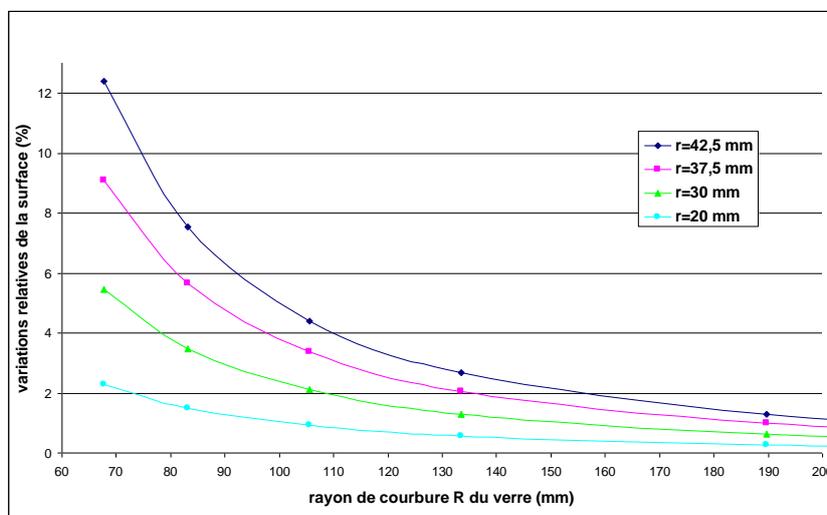


Figure II-12 : Variations relatives de la surface en fonction du rayon de courbure R du verre et du rayon r du disque lors d'un report de type 3

3. Synthèse et propositions de reports les plus appropriés

3.1. Analyse comparée des 3 types de reports

Afin de synthétiser les résultats précédents et tout en confrontant les caractéristiques des trois principes de report, nous avons indiqué sur les Figure II-13 et Figure II-14 chacune des évolutions de l'étirement radial et de la modification surfacique engendrés par les 3 types de reports, et ce pour les valeurs extrêmes de 20 et 42,5 mm du rayon du disque avant report.

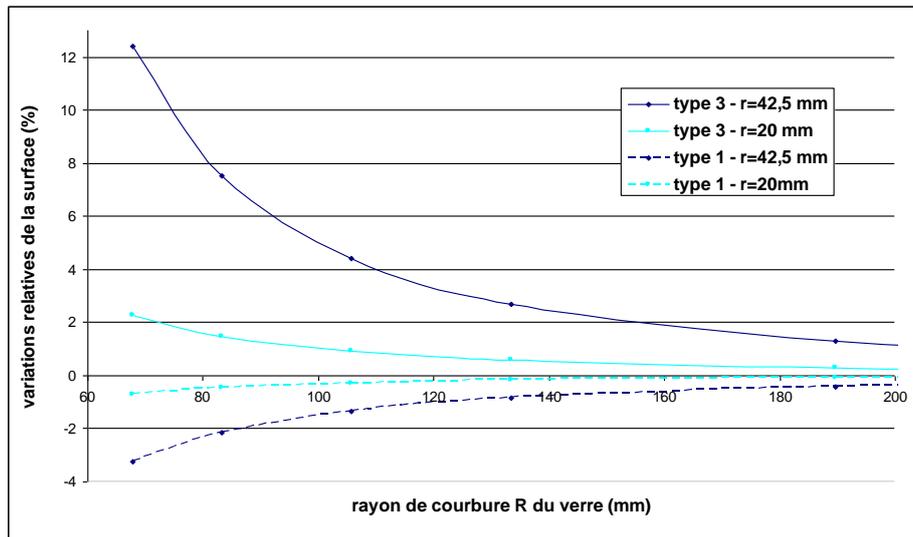


Figure II-13: Variations de l'expansion ou de la contraction surfacique en fonction de r, de R et du type de report

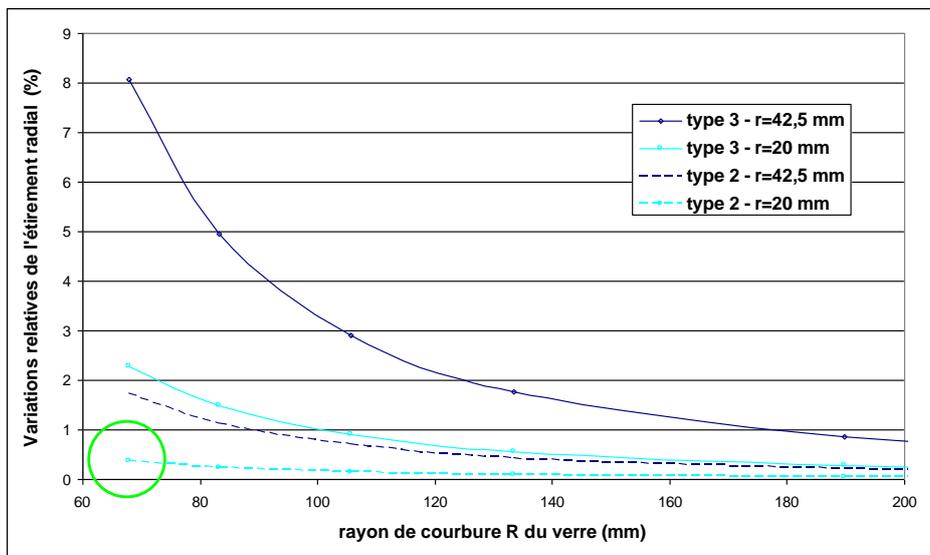


Figure II-14 : Variations de l'étirement radial en fonction de r, de R et du type de report

En résumé, l'ensemble de ces résultats comparés nous amène aux observations et conclusions suivantes :

- quel que soit le type de report mis en œuvre, plus le rayon de courbure du verre est réduit – autrement dit plus la courbure du verre est importante – plus le taux de déformation est élevé ;
- toujours indépendamment du type de report, plus le diamètre du film à reporter est réduit et plus les déformations engendrées pendant le report sont faibles. Il est donc favorable de travailler avec des films de dimensions les plus proches du verre sur lequel il doit être reporté. Ce résultat est intéressant pour les coûts de fabrication du verre pixellisé dans la mesure où minimiser la consommation du film fonctionnalisé, à très haute valeur ajoutée, va dans le sens de l'optimisation de l'étape de report qui est cruciale ;
- au global, pour le domaine géométrique exploré, délimité d'une part par les faibles rayons de courbure $R = 67,8$ mm – ce qui correspond à une correction de +6.00 – et d'autre part par les plus grands diamètres de disques retenus 85 mm – ce qui correspond au diamètre utile du wafer – les déformations moyennes, ainsi calculées à partir de notre approche simplifiée, devraient être au maximum de l'ordre de 12 %. De l'autre côté, toujours pour une correction maximale de +6.00, pour un report du disque de 40 mm de diamètre grâce au mode optimisé dit de type 2, on devrait pouvoir réduire la déformation moyenne à une valeur qui ne dépasse pas 0.5 %. Cette valeur, que nous avons mis en exergue dans la Figure II-14 par un point vert, correspond pour nous à un jalon important que nous posons doré et déjà et qui sera largement discuté ultérieurement ;
- enfin, si l'on compare avec la plupart des dispositifs à base de matières dites « plastiques » qui sont réalisés à partir de ces méthodes de thermoformage – dans le domaine de l'emballage ou de l'embouteillage [31] – , nous pouvons considérer que les taux de déformations que nous venons d'annoncer – inférieurs à 10% – sont relativement limités. Nous verrons dans les chapitres suivants que pour les matériaux susceptibles de constituer l'armature principale de nos films fonctionnalisés, la valeur butée de 10 % ne dépasse le plus souvent que de très peu le seuil d'intervention du régime de déformation plastique. La littérature sur le comportement des matériaux PET, initialement amorphes ou semi-cristallins, notamment les études portant sur les mécanismes relativement complexes de cristallisation sous sollicitations dynamiques

de nature mécanique et/ou thermique fait état de seuils se situant dans la gamme de valeurs de déformations allant de 5 à 10 % [32, 33]

De cette première estimation des niveaux de déformations auxquels on doit s'attendre, au moyen des calculs préliminaires que nous venons de présenter, une autre évaluation intéressante est reportée sur la Figure II-15. Celle-ci représente les déformations estimées pour chacun des deux types de reports 2 et 3, pour deux verres d'indices différents et maintenant directement retranscrites en fonction du degré de correction.

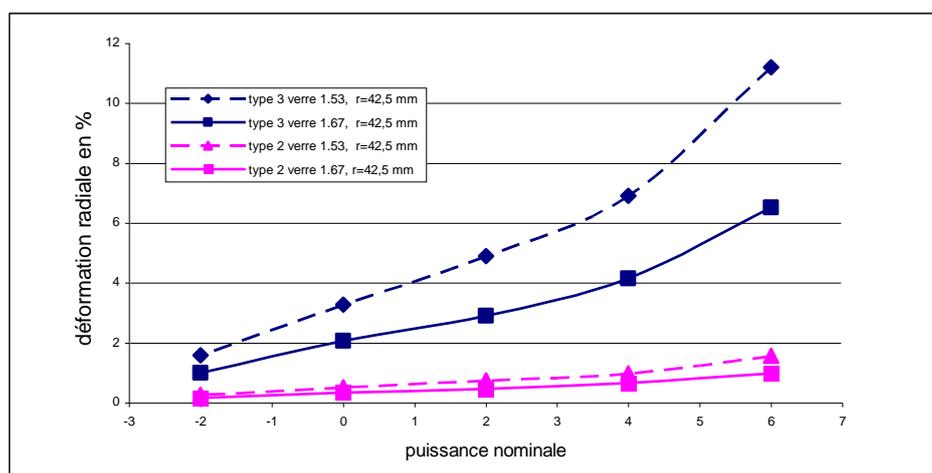


Figure II-15 : Déformations radiales en fonction du verre utilisé pour une même correction optique

Ces résultats nous indiquent que l'utilisation de verres à plus fort indice 1,67 contre 1,53, est évidemment bénéfique au report en terme de déformations : pour une même correction, le verre d'indice 1.67 a une courbure plus faible que le verre d'indice 1.53, ainsi les elongations engendrées par les reports sont moindres. Cet avantage apporté par un indice élevé apparaît néanmoins plus marqué en terme de minimisation de la déformation dans le cas du report de type 3 pour lequel ce taux de déformations est toujours plus élevé.

En nous référant à la fois au rappel du principe de base du thermoformage (chapitre 1 - paragraphe 3.1), aux descriptions des méthodes de report qui étaient en cours de développement chez *ESSILOR* lors du démarrage de notre étude (paragraphe 1 de ce chapitre), et enfin aux développements précédents, nous pouvons apporter les éléments de réflexion suivants :

- la classe de report de type 3 qui consiste à projeter le disque sur la calotte en imposant la coïncidence des bords est celle qui, à notre sens, qualifie au plus près le mode

opératoire du thermoformage générique et le procédé MARS : après qu'il ait été chauffé, le film est formé et reporté au cours de la même opération. On peut dire en quelque sorte, qu'au cours de cette phase de formage et d'assemblage, la matrice d'emboutissage reste le support hôte de la structure. Nous avons vu que ce type de report doit conduire à des taux de déformations importants. Par ailleurs, avec les conditions du formage proprement dit, pendant l'établissement et la propagation du contact conformal entre le film souple et la lentille, si le contact est d'emblée figé par la présence de la couche de colle sensible à la pression ou bien si la possibilité de glissement de l'un par rapport est fortement réduite par le frottement, alors la déformation du film ne peut évidemment pas être uniforme, l'étirement radial augmente au fur et à mesure du processus de mise en forme et donc lorsque l'on va vers le bord du film (Figure II-16).

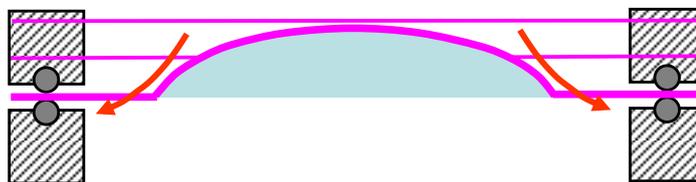


Figure II-16: Étirement radial lors du processus de mise en forme

Ce mode de mise en œuvre par emboutissage suppose une mise en contact rapide entre le film chauffé et la lentille qui ne doit pas, quant à elle, accéder à des températures élevées. Nous pouvons donc nous attendre à des conséquences liées aux effets de cette trempe thermique et plus précisément au piégeage de contraintes d'origine thermomécanique – différentiel du coefficient de dilatation des constituants de l'hétéro-assemblage – ;

- bien que le jeu de conditions définissant le report dit de type 2 – un étirement radial juste nécessaire et suffisant pour garantir la conservation de la surface du disque – ne soit posé qu'à titre d'hypothèse de base pour une première approche d'évaluation, ce mode intermédiaire devrait être proche du processus optimal sur le critère du taux de déformation induit. En effet, même si cette exigence n'est pas formellement démontrée ici, nous pouvons concevoir qu'elle doit permettre de s'approcher de l'optimum en observant qu'elle va en pratique dans le sens de la minimisation de l'énergie stockée

dans le film au cours du formage pour réaliser l'objectif de mise en forme visé. En d'autres termes, cette condition de conservation de surface globale est bien corrélée à la minimisation à la fois des déformations et des contraintes – l'énergie emmagasinée dans le film minimale – ;

- la courbure sphérique ou quasi-sphérique de la lentille hôte est une opportunité qui peut être saisie. En gonflant le film par pression pneumatique uniforme sur la face inférieure, nous devrions obtenir une déformation plus uniforme et surtout, dans notre domaine des relativement faibles déformations, sphérique pour approcher la forme de la lentille requise, et ce, avant tout contact avec cette dernière.

L'analyse préliminaire entreprise dès le démarrage de notre travail et que nous venons de présenter ici avec ses conclusions, nous a convaincu de retenir comme principe de base de « l'emboutissage pneumatique » en vue de mettre au point un processus de report qui réponde au mieux aux exigences du cahier des charges de notre projet. En effet, dans le cas de la conformation, à la surface d'un support sphérique ou quasi sphérique, d'un film polymère plan et fragile – car pixellisé – notre principe de report présente certains avantages potentiels par rapport à la méthode de thermoformage classique. Ces avantages résultent essentiellement de la séparation des phases de déformation et de report :

- l'emboutissage par compression pneumatique, autrement dit le gonflement, du film avant tout contact avec la surface devrait garantir une déformation à la fois plus homogène et moindre dans son amplitude que ne le permet la méthode de thermoformage classique : dans ce dernier cas, en effet, la mise en contact progressive avec un développement depuis le centre du film vers les bords du film, engendre, après conformation, une déformation plus forte en bord de calotte sphérique,
- la possibilité du gonflement progressif et concomitant avec le chauffage du film doit autoriser, pendant la déformation et, cela est primordial, avant tout contact avec son support-hôte, un contrôle minutieux de l'assistance thermique nécessaire à la mise en forme. C'est un atout très important que de pouvoir doser l'énergie thermique à apporter en jouant à la fois sur le temps et la température pour assurer, à déformation imposée, le meilleur compromis entre la minimisation des contraintes résiduelles piégées – relaxation préalable par fluage – et la mise en œuvre de températures aussi faibles que possible; pour des raisons de compatibilité et d'intégrité de l'ensemble des

processus technologiques, on s'attend en effet à devoir satisfaire des exigences relativement sévères en terme de tenue en température. A contrario, selon la technique de thermoformage plus classique avec formage à partir du support, la déformation imposée est réalisée dans des temps relativement courts et, nous semble-t-il, bien moins aisés à contrôler.

3.2. Proposition des modes opératoires de procédés de mise en œuvre

Partant du principe de base d'emboutissage pneumatique que nous venons de décrire, nous avons établi quatre procédés de mise en œuvre qui se distinguent selon les techniques de contrôle employées et les objectifs visés. Nous avons nommé PIXIS cette famille de procédés. Nous allons décrire maintenant les spécificités de chacun de ces procédés.

- ***Procédé PIXIS-A1***

Le procédé PIXIS-A1 est le procédé de base. Il se décompose en quatre étapes principales, comme suit et schématisé en Figure II-17 :

Étape 1 – La lentille est positionnée sur son support tandis que le film est placé sur l'enceinte et maintenu de façon étanche, à l'aide des joints toriques, par la bague de maintien. Tandis que la chambre de compression reste à la pression atmosphérique, le chauffage du film permettant de modifier ses propriétés rhéologiques est initié; la température de chauffage peut être constante ou progressive – avec une rampe de température à pente constante ou plusieurs rampes de température avec un ou plusieurs paliers – ;

Étape 2 – la mise en compression progressive $P_{\text{déf}}$ de la chambre entraîne une déformation du film. La déflexion du film est contrôlée en continu au moyen d'un dispositif optique par exemple; dans le même temps la programmation de la phase de chauffage qui peut éventuellement s'étendre jusqu'à la fin de la phase 3 est optimisée et bien sûr corrélée à la dynamique de la mise en pression et/ou dépression ;

Étape 3 – tout en contrôlant la courbure du film, la pression est réduite ou bien ramenée à la pression atmosphérique après fluage du film. Cette phase permet de relaxer la composante élastique résiduelle de la contrainte. À cette étape le rayon de courbure du film est légèrement

plus grand que celui de la lentille à l'atteinte – et/ou léger dépassement – du seuil de pression P_{seuil} permettant d'établir la mise en contact conformal film/matrice poreuse et maintien de la pression P_{seuil} ;

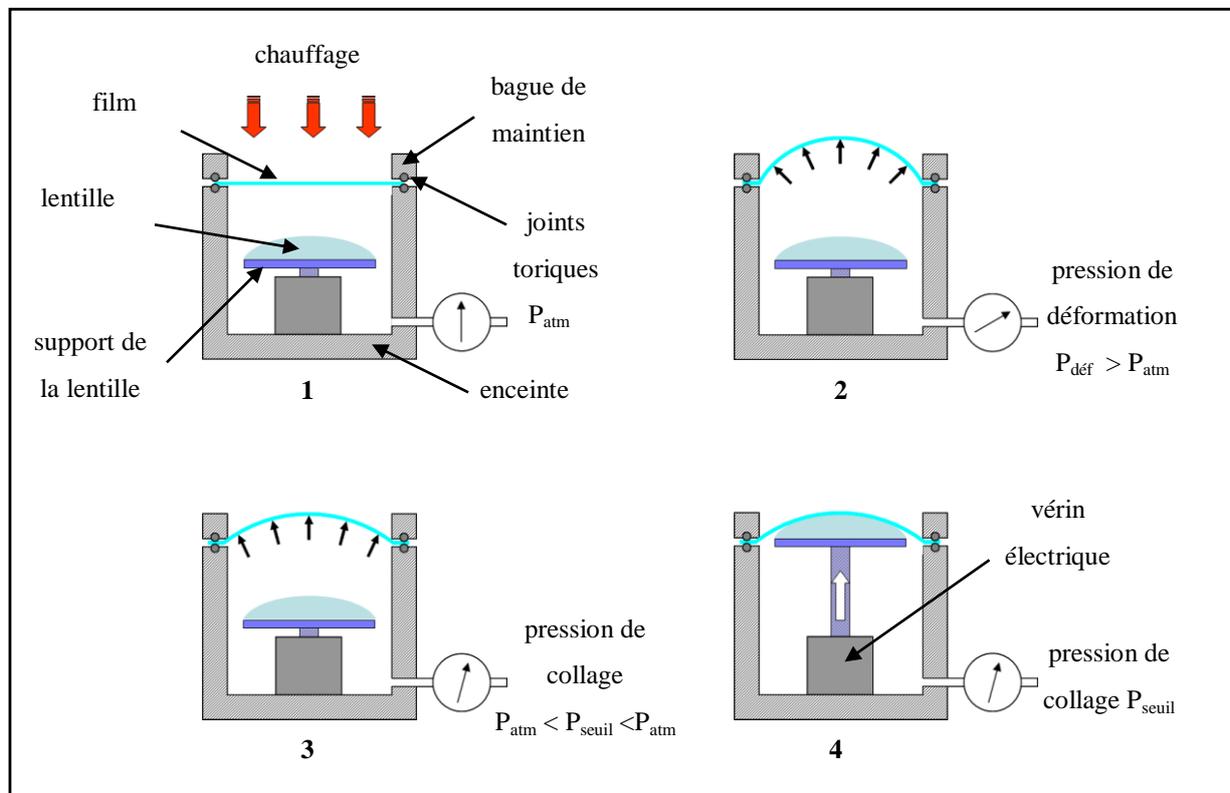


Figure II-17: Procédé PIXIS-A1

Étape 4 – la lentille est élevée jusqu'au contact conformal film/lentille et la pression est ensuite maintenue d'une pression par action du vérin pendant le temps nécessaire à la consolidation du collage. Enfin le verre muni du film reporté est démonté puis récupéré. Le film qui dépasse de l'assemblage est découpé à l'aide d'un cutter s'appuyant sur le contour du verre ; c'est l'étape de détourage.

- **Procédé PIXIS-A2**

Le procédé PIXIS-A2 – présenté en Figure II-18 – est une variante de PIXIS-A1. Le rayon de courbure du film après déformation et à pression atmosphérique est exactement le rayon du verre. La mise en contact des deux surfaces est réalisée sous vide avec le

retournement du film pour un collage plus progressif. Notons que ce mode opératoire peut s'appliquer à tous les procédés présentés ci-après.

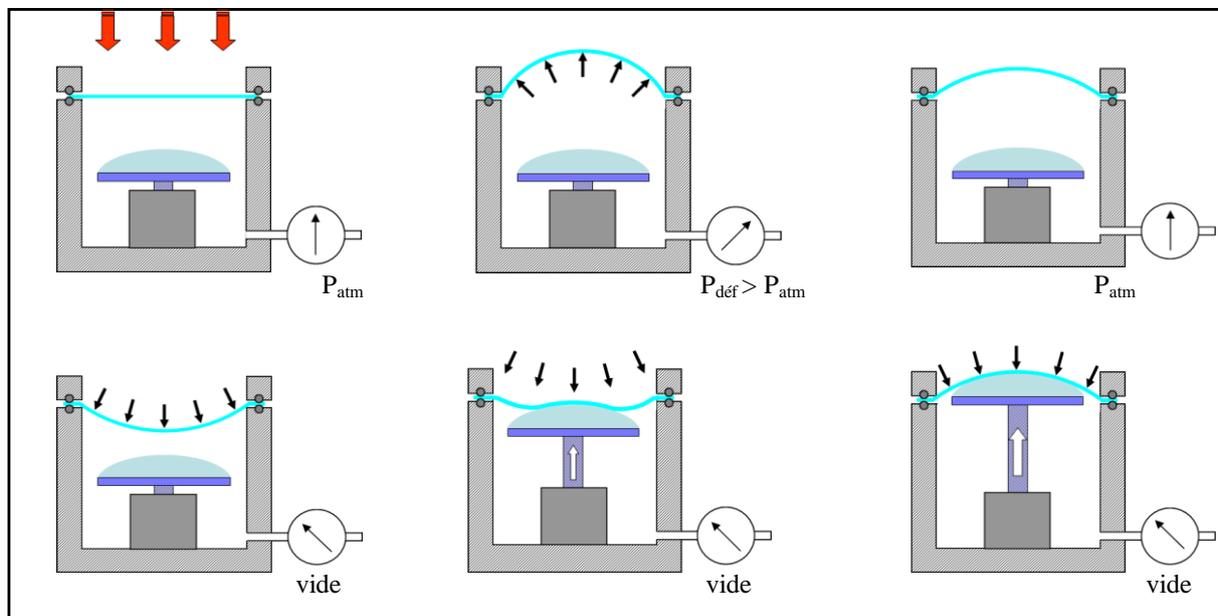


Figure II-18: Les étapes du procédé PIXIS-A2

- **Procédé PIXIS-B**

Ce second procédé se distingue du précédent par le moyen de contrôle de la déflexion : ici, la butée optique est remplacée par une butée « matérielle ». Le film est projeté contre cette butée qui joue en quelque sorte le rôle de matrice. Si le contact film/matrice est glissant et que dans le même temps la matrice est maintenue à une température adéquate, le film, même sous pression, flue et se relaxe. Ici encore le contact conformat film/verre se fait après refroidissement, de façon à éviter tout effet qui pourrait résulter du différentiel entre coefficients de dilatation des matériaux.

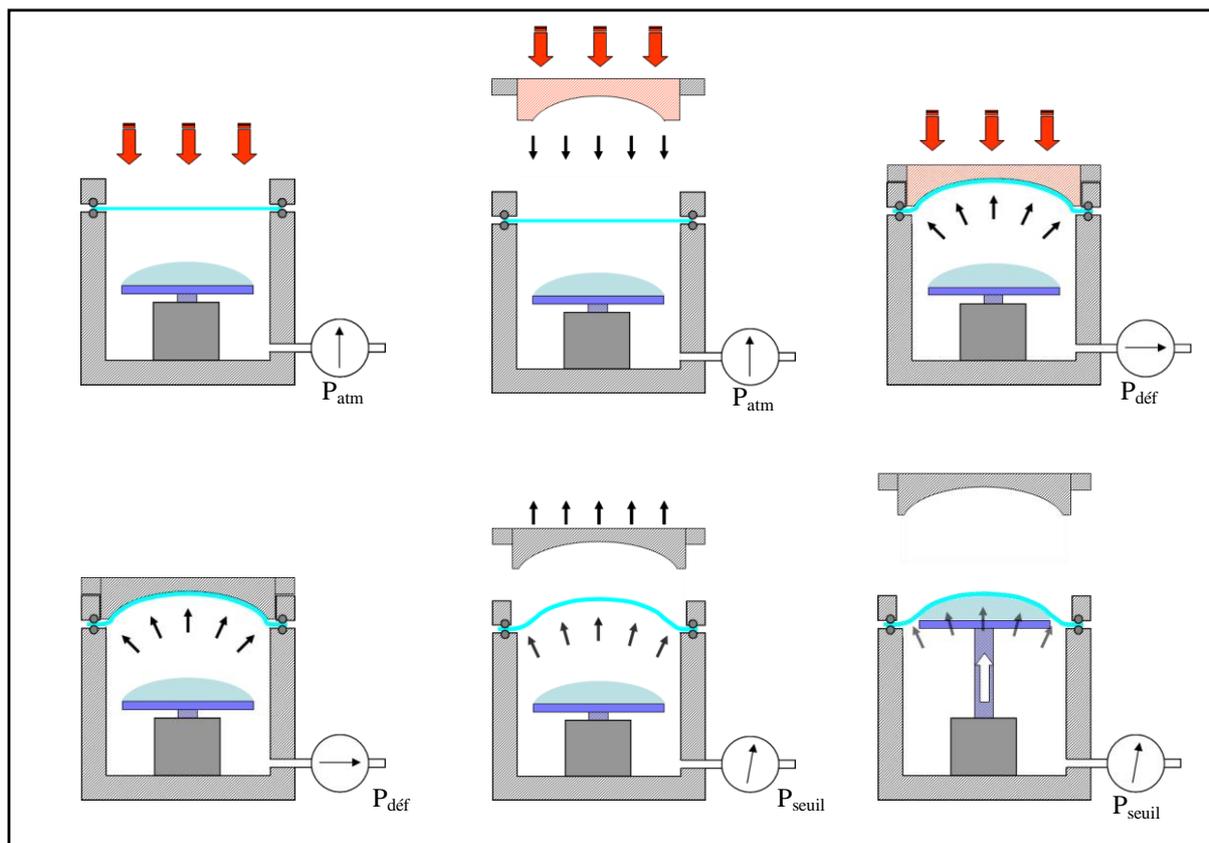


Figure II-19: Les étapes du procédé PIXIS-B

Ce mode de report présente l'avantage considérable d'offrir la possibilité d'approcher au mieux, pendant la phase de préformage et donc avant report, une surface de lentille qui n'est plus sphérique comme avec un verre bifocal ou progressif.

- **Procédé PIXIS-C**

Cette troisième variante reprend le principe précédent avec un raffinement supplémentaire visant, toutes choses égales par ailleurs, la réduction de la déformation : en contrôlant de manière relativement précise le décrochage latéral du film au niveau du serrage sur la bague de maintien, on réduit la tension du film qui est à l'origine d'une « surdéformation ». Ainsi, en se rapprochant du principe du report de type 2 décrit dans notre analyse préliminaire, nous devrions pouvoir optimiser le report tant sur le plan du taux de déformation que du stockage de contraintes résiduelles. Dans cette procédure la tension radiale résiduelle du film sera, après le décrochement, imposée par la force de frottement qui devra être suffisante pour éviter tout froissement du film avant sa projection sur la matrice.

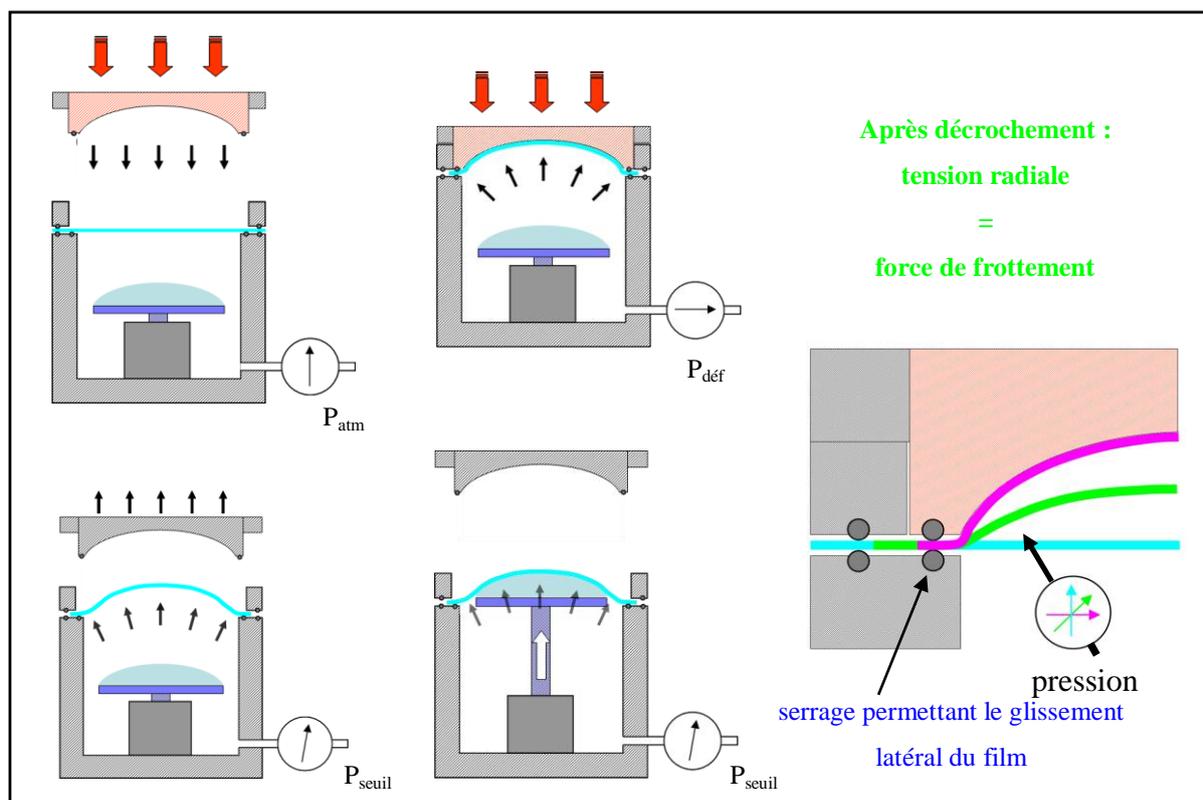


Figure II-20: Les étapes du procédé PIXIS-C

Il est cependant clair que le contrôle de cette technique pourrait se révéler délicat; sa viabilité dépendra de la capacité ou non à bien maîtriser la dynamique de la projection du film vers la matrice, qui elle-même sera essentiellement fixée par la reproductibilité du seuil de décrochage. Ce dernier dépend du niveau du serrage, de l'état de surface des joints, de l'uniformité sur l'ensemble du bord entre autres.

- **Procédé PIXIS-D**

Ce quatrième mode d'emboutissage pneumatique rassemble à notre sens les spécificités des modes décrits précédemment et permet par ailleurs le report de films prédécoupés avec des contours autres que celui du disque pouvant donc correspondre par exemple au gabarit imposé par les montures de lunettes. Il reprend des modes précédents :

- le contrôle de la déflexion du film en direct par dispositif optique ;
- le principe d'un emboutissage contre une matrice ;
- et enfin le principe de la suppression de la tension par les bords du film qui permet de

minimiser la déformation.

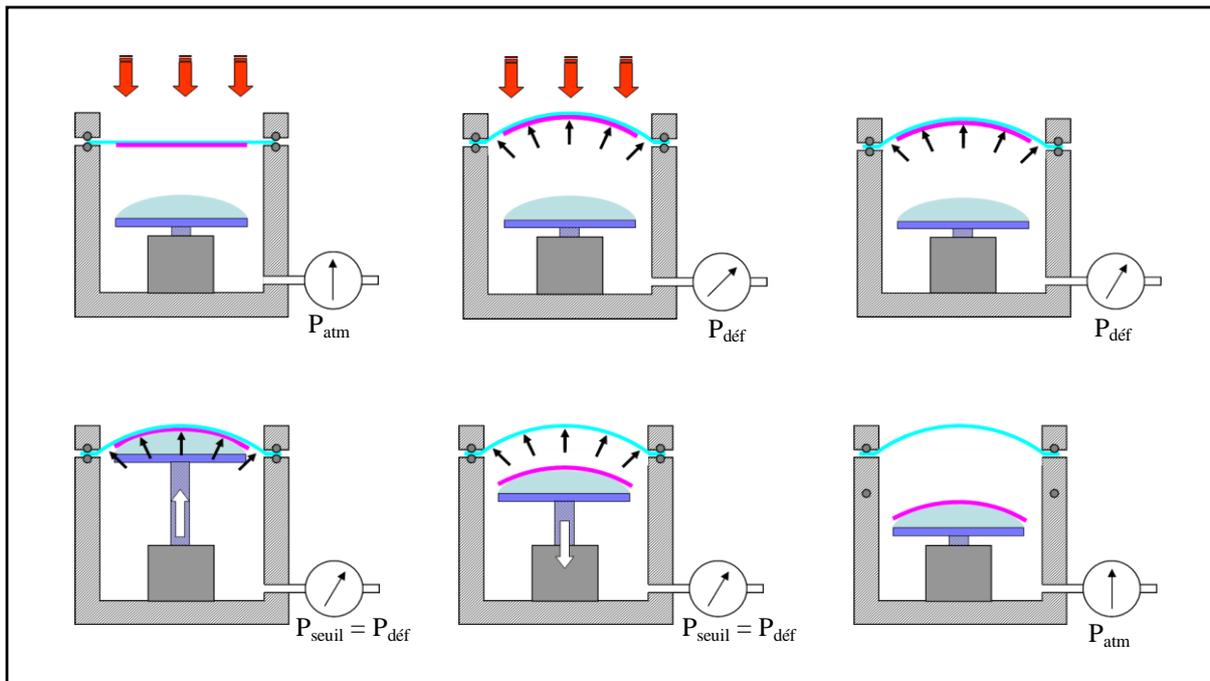


Figure II-21: Les étapes du procédé PIXIS-D

La matrice est à présent réalisée au moyen d'un film membrane lui-même soumis au gonflement. Le film pixellisé est maintenu à cette matrice, soit au moyen des seules forces de capillarité générées par la présence d'un film liquide de type huile, par exemple, soit d'un film colle à faible résistance au cisaillement et donc très compliant. Pendant la progression du gonflement, le patch est plaqué contre la membrane auxiliaire et ne subit pratiquement aucune tension si l'on utilise une colle bien choisie ou une huile qui assure un glissement parfait. L'avantage de ce procédé réside dans le fait que le rayon de courbure peut être modifié et contrôlé en continu.

Si nous revenons à notre analyse préalable où nous avons discuté et classé trois types de report sur la base de conditions précises, nous constatons que ce mode nommé PIXIS-D est celui qui devrait donner les meilleurs reports quant aux taux de déformation et au niveau des contraintes piégées.

Nous nous sommes limités ici dans notre proposition précédente à quatre variantes de procédés de thermoformage basés sur le principe de ce que nous appelons « emboutissage pneumatique ». Il est clair que toute combinaison de processus élémentaires supplémentaires, tels que par exemple une option de chauffage par convection à la place du chauffage par

rayonnement IR, une option d'usage de colle polymérisable par UV au lieu d'un adhésif sensible à la pression, et/ou toute association avec d'autres fonctionnalités déjà citées sont à priori possibles. Nous avons rapporté en annexe 1, et à titre d'exemple, la description d'un procédé qui concerne le cas d'un report de film sur une face concave.

Rappelons que les objectifs visés dans tous les cas sont de minimiser et d'homogénéiser les déformations, de minimiser les contraintes résiduelles après report, et de préserver l'intégrité de la fonctionnalité du film notamment en mettant en œuvre des températures aussi faibles que possible. Pour chaque report de film spécifique, c'est l'optimisation du triplet « pression – température – temps » dans chaque phase du procédé qui doit permettre de répondre à ces exigences.

Enfin, ce principe de report met en jeu des séquences qui, tout en nécessitant une optimisation fine spécifique à chaque réalisation, se prêteront aisément à l'automatisation indispensable pour la reproductibilité de tout procédé technologique. Pour chacune des variantes du procédé, il pourra être envisagé que les transitions entre les différents seuils de pression d'une part et les différents niveaux d'échauffement d'autre part soient effectuées avec des rampes et/ou des paliers programmables satisfaisant les meilleurs compromis. Ces divers paramètres de pression, de température et de temps seront bien évidemment établis et optimisés en fonction des exigences inhérentes aux principales caractéristiques suivantes :

- la nature chimique du film et des propriétés thermomécaniques du film (élasticité, viscoélasticité, ...),
- la fonctionnalité portée par le film,
- la substance adhésive utilisée,
- et bien sûr le profil de la lentille et son rayon de courbure.

Tous ces paramètres opératoires sont contrôlables par des capteurs – jauges de pression, de force, thermocouples, mesureur de vitesse par exemple – et l'exigence de reproductibilité impliquera bien sûr que, après la phase de mise au point, la séquence complète du processus soit pilotée par un automate.

3.3. Nos choix des modes opératoires de report mis en œuvre

A l'issue de notre première phase de réflexion sur la problématique du report de films

minces, souples et fragiles parce que fonctionnalisés, il nous a paru opportun d'explorer cette voie reposant sur le principe du préformage préalable par emboutissage pneumatique suivi du report proprement dit. Ce choix présentait à ce moment-là aussi l'avantage de nous démarquer des travaux menés en interne au sein d'ESSILOR, travaux que nous ne connaissons pas précisément.

Pour être d'ores et déjà plus précis dans les choix que nous avons retenus, par rapport aux modes que nous avons envisagés et décrits précédemment, nous n'avons exploré que les solutions qui mettent en œuvre le contrôle continu de la déflexion par dispositif optique ; ceci exclut la solution de la matrice « matérielle » spécifique des modes dit PIXIS-B et PIXIS-C. Bien que dans cette première phase de démonstration de faisabilité de dispositifs pixellisés nous n'ayons donc pas expérimenté le mode PIXIS-B, il nous semble cependant que celui-ci pourrait présenter un avantage intéressant dans le cas de productions en grandes séries et/ou dans les cas de verres fortement asphériques : d'une part le calage de la déflexion par butée mécanique jouant donc le rôle de matrice pourrait être plus aisé et moins coûteux dans un objectif d'industrialisation ; d'autre part l'application au cas de verres correcteurs sophistiqués par exemple du type « progressif » serait aussi un élément favorable. Il est cependant évident qu'une exigence supplémentaire serait de disposer d'une matrice spécifique par référence de produit. A notre niveau et à ce jour, il nous est impossible de nous prononcer sur cette question, d'autant que nous savons que l'ordonnancement et la distribution et les étapes de fabrication sont très spécifiques à ce domaine industriel.

En ce qui concerne le cas du mode PIXIS-C, il est clair que la maîtrise d'un "échappement" du film de la "bague-pince" de maintien, parfaitement contrôlé comme nous l'avons préconisé précédemment, exigera la mise au point de dispositifs mécaniques particulièrement bien adaptés. Cette maîtrise est-elle techniquement possible ? La question mérite peut être d'être posée car, ici encore et pour les mêmes raisons, ce mode spécifique de transfert pourrait être intéressant dans son application industrielle.

Dans le déroulement de notre travail de thèse nous avons donc successivement expérimenté les modes PIXIS-A et PIXIS-D. Le premier dès le début de l'étude, et le second un peu plus tard, lorsqu'une fois le prototype de la machine conçu et réalisé, les premiers résultats encourageants nous incitaient d'une part à améliorer encore nos reports, et d'autre part à répondre à la demande nouvelle qui nous a été faite de reporter des films maintenant prédécoupés aux gabarits de verres de lunettes détourés.

3.4. Premières évaluations par simulations numériques

Pour conclure ici ce chapitre consacré à notre réflexion préliminaire sur la problématique du report, il nous paraît utile de rapporter les premiers résultats de simulations numériques que nous avons réalisées. Ces simulations concernent les deux modes PIXIS-A et PIXIS-D que nous avons, comme indiqué précédemment, explorés aussi ensuite au plan expérimental. L'objectif de ces premières simulations visait l'estimation des taux de déformation qu'il était permis d'espérer. Dès lors, nous nous sommes limités dans un premier temps au calcul de la déformation du film pendant le gonflement en ne considérant que le mode de déformation élastique et en faisant abstraction de l'assistance thermique. Par ailleurs pour le cas du procédé PIXIS-D nous ne rapportons ici brièvement que les résultats relatifs au cas le plus favorable qui considère le contact glissant parfait entre film à reporter et film auxiliaire qui joue le rôle de matrice. Ces simulations ont été réalisées avec la méthode des éléments finis, au moyen de l'outil commercial ABAQUS [34] distribué par la société DASSAULT Systèmes. Nous décrirons l'ensemble des procédures de mises en œuvre, et notamment les techniques de maillage, dans les chapitres 5 et 6 consacrés plus précisément à l'étude de ces deux types de reports.

- *Cas du procédé PIXIS-A*

Nous avons considéré la déformation en régime élastique d'un film de 100 μm d'épaisseur maintenu par un jeu de bagues ouvrant une fenêtre de 80 mm de diamètre. En fixant au film des valeurs de 1 GPa au module élastique de YOUNG et de 0,35 au coefficient de POISSON et en lui imposant une pression de 1,5 bar, nous obtenons une déflexion égale à 10,57 mm. Cela correspond à un rayon de courbure sphérique de 81 mm soit pratiquement la courbure d'un verre de correction + 4.00 pour un indice supposé de 1,67.

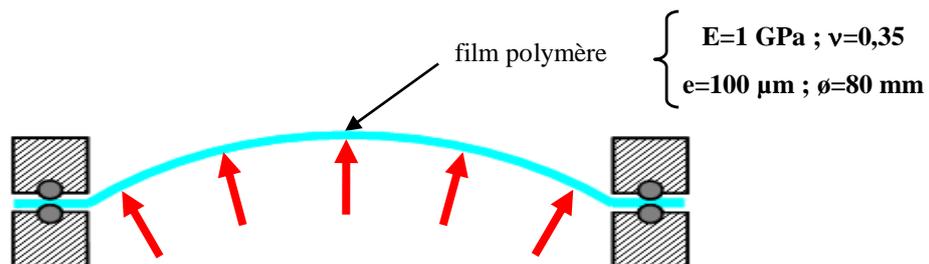
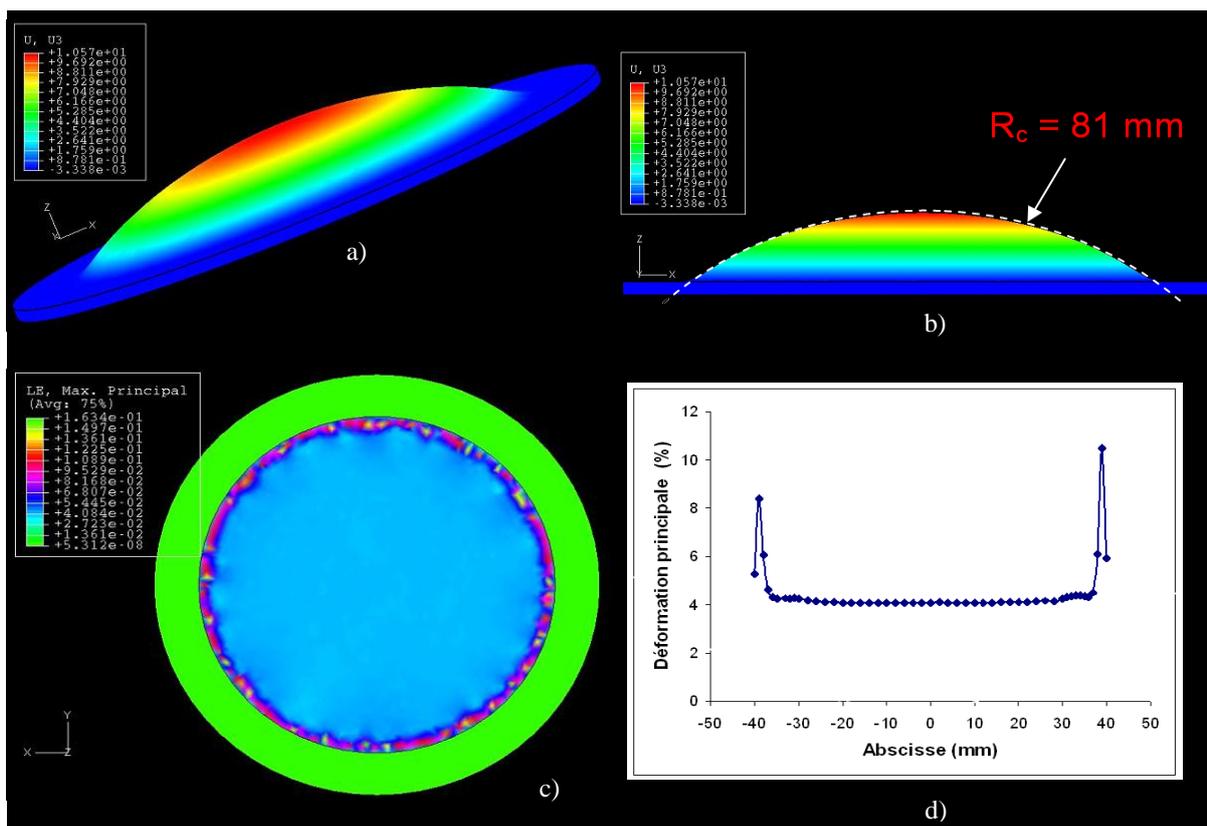


Figure II-22 : Données physiques du film polymère intégrées au modèle numérique du gonflement grande surface

Les résultats préliminaires reportés sur la Figure II-23 montrent que lors du gonflement dans le régime de faibles déformations du film, on conserve bien la forme sphérique qui nous intéresse pour approcher la surface des lentilles ophtalmiques. La déformation principale ϵ_1 qui se développe le long des méridiens de cette calotte sphérique (c'est-à-dire la déformation radiale) est pratiquement uniforme, de l'ordre de 4 %, sur l'essentiel de la surface ; seule la périphérie enregistre un accroissement notable vers 8 à 10 %. Notons enfin cette valeur de 4 % correspond, comme attendu, à l'estimation que nous avons proposée dans l'examen du report dit de type 3.



- *Cas du procédé PIXIS-D*

Nous avons ici considéré un film auxiliaire qui est monté sur une bague de maintien de diamètre égal à 90 mm et un film à reporter prédécoupé au gabarit d'un verre inscrit dans un diamètre de 50 mm. L'épaisseur de l'un et l'autre des deux films est de 75 μm . Un module de YOUNG, pour cette simulation, égal à 2 GPa et une pression de 5 bars déterminent une

déflexion et un rayon de courbure du gonflement respectivement de 16,52 mm et de 69,55 mm ce qui correspond en pratique à une correction du verre hôte très proche de + 6 d'indice 1,67.

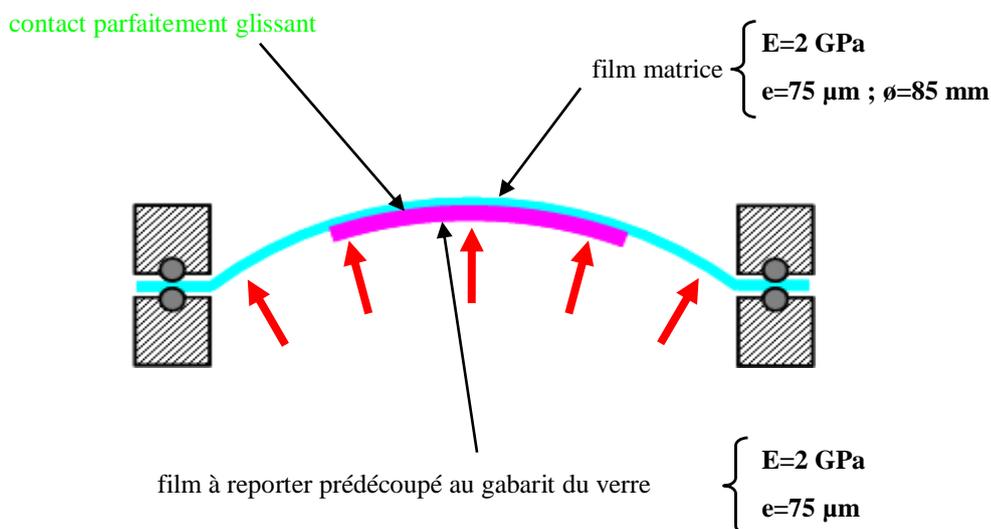


Figure II-24 : Données physiques du film matrice et du film à reporter intégrées au modèle numérique du gonflement «petite surface»

Les illustrations reproduites sur les Figure II-25-b et d et les relevés de la Figure II-26 permettent de comparer les déformations observées sur le film auxiliaire, de l'ordre de 10 %, et celles bien moindres qui sont relevées sur deux méridiens du film d'intérêt, à savoir de l'ordre de ou inférieures à 0,4 %. Nous pouvons remarquer que cette dernière valeur est en bon accord avec notre estimation de la valeur moyenne obtenue à partir du modèle analytique extrêmement simple report de type 2 qui suppose la conservation de la surface au cours du report. C'est que, comme nous l'avons mentionné précédemment, on vérifie bien que ce type de report où l'on évite complètement la tension par les bords – avantage apporté par le glissement parfait – doit permettre de s'approcher du procédé optimum aboutissant aux taux de déformation les plus faibles. Nous avons en effet observé que ce bénéfice résulte de ce que, au cours du formage, le patch à reporter est autorisé à rester sous contrainte minimale, autrement dit à stocker une énergie minimale.

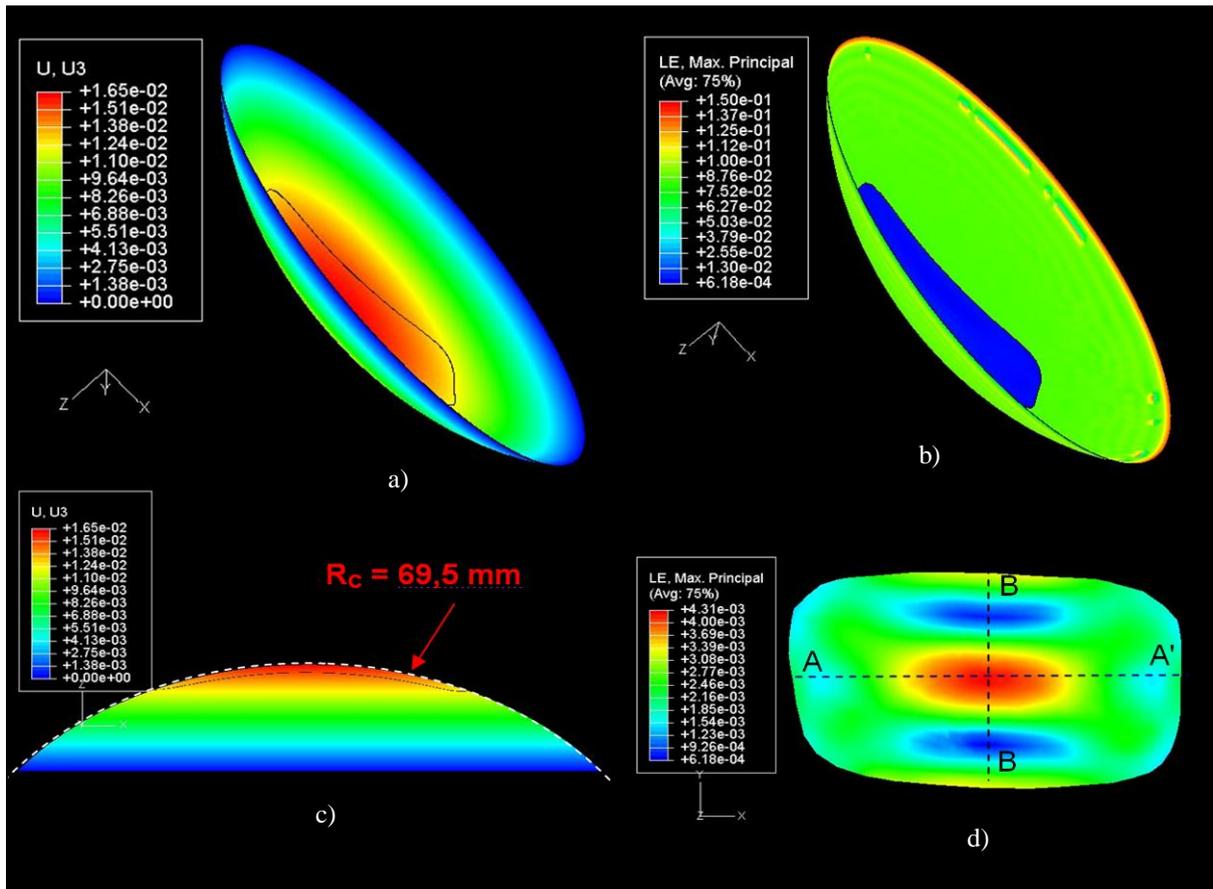


Figure II-25 : Simulation du gonflement dans le procédé PIXIS-D par la méthode des éléments finis : a) et c) déflexion en z des films, b) et d) vues globales de la déformation principale de la matrice et du film prédécoupé à reporter

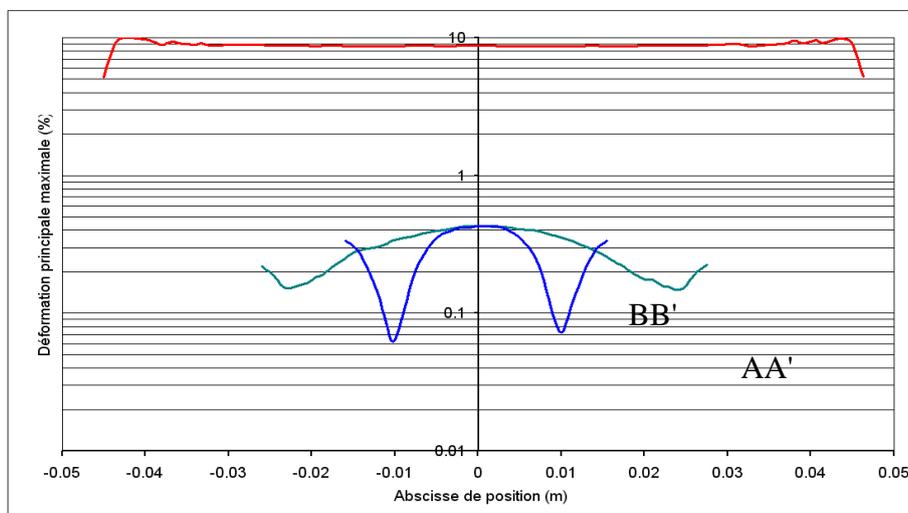


Figure II-26 : Relevés de la déformation principale du film à reporter le long de deux transversales orthogonales.

4. Conclusion

Dans notre recherche d'un procédé optimal pour le report de films fonctionnalisés sur des lentilles, l'analyse que nous venons de présenter nous oriente vers le principe de « l'emboutissage pneumatique ». En effet, ici dans notre cas particulier où il s'agit de conformer un film souple et fragile, à l'origine plan, à la surface d'un support sphérique ou quasi sphérique, ce principe offre des avantages potentiels par rapport à la méthode de thermoformage classique. Ces avantages résultent de la séparation des phases de déformation et de report proprement dit :

- l'emboutissage par compression pneumatique, autrement dit par gonflement, du film avant tout contact avec la surface devrait garantir une déformation plus homogène et vraisemblablement moindre dans son amplitude que ne le permet la méthode de thermoformage classique ;
- la possibilité du gonflement progressif et concomitant avec le chauffage du film doit autoriser, pendant la déformation et avant tout contact avec son support hôte, un contrôle minutieux de l'assistance thermique nécessaire à la mise en forme. C'est un atout très important que de pouvoir doser pendant cette phase de préformage l'énergie thermique à apporter en jouant à la fois sur le temps et la température pour assurer, à déformation imposée, le meilleur compromis entre la minimisation des contraintes résiduelles piégées – relaxation de la contrainte préalable au report – et la mise en œuvre de températures aussi faibles que possible.

Parmi les différentes variantes des modes opératoires qui pourraient s'appuyer sur ce principe de report, dissociant le thermoformage du collage proprement dit grâce au gonflement préalable, et que nous venons de proposer, nos choix ont porté sur les procédés PIXIS-A et PIXIS-D pour réaliser d'abord des reports de films sur lentilles semi-finies – reports de « grande surface » – et ensuite des reports de films prédécoupés au gabarit des verres de lunettes spécifiques et souhaitées par les porteurs – reports de « petite surface ».

Chapitre III

Le prototype PIXIS pour le report de films pixellisés

Ce chapitre est consacré à la conception et à la mise en œuvre du prototype d'une machine de thermoformage et de report que nous avons développé dans le cadre de notre implication sur le projet d'optique ophthalmique digitale. Ce prototype, nommé PIXIS, est spécifiquement conçu pour mettre au point les processus que nous venons de décrire et qui sont basés sur le principe de gonflement autorisant la séparation des phases de mise en forme du film et de report proprement dit.

Nous décrivons l'ensemble des solutions techniques mises en place pour réaliser à la fois le corps principal de l'appareillage et les outils de commande et de contrôle associés. Nous serons ensuite amenés à étudier les transferts thermiques du film pixellisé en place sur le prototype lors des phases de chauffage et de refroidissement afin de sélectionner le mode de chauffage le plus adapté. Enfin, nous aborderons les méthodes et moyens mis en œuvre pour caractériser les taux de déformations induites ainsi que la qualité cosmétique des reports.

1. Conception et réalisation du prototype de report PIXIS

La conception d'un prototype est l'unique moyen d'obtenir la machine la plus adaptée au report que nous voulions développer, c'est-à-dire autorisant la séparation des étapes de thermoformage par gonflement et de collage. Nous souhaitons obtenir un système robuste et précis pour des raisons de reproductibilité dans les expériences de reports que nous projetions. À cette fin, nous avons cherché à réaliser un prototype ergonomique et évolutif, autorisant de bonnes perspectives d'évolution nécessaires à l'intégration de fonctions ultérieures et de dispositifs complémentaires de caractérisation. Le développement du prototype de thermoformage a été confié au bureau d'étude *SUD PROJET*, basé à Montauban, reconnu pour ses compétences dans les domaines de la mécanique et de l'usinage de précision. Nous présentons ici les différents éléments du prototype, les plans détaillés des circuits électriques et pneumatiques sont disponibles en annexes 2.

1.1. L'architecture générale du prototype

Le prototype PIXIS doit permettre de reproduire les quatre étapes principales du procédé de report décrit précédemment, à savoir le chauffage du film pixellisé, la déflexion du film par gonflement, la relaxation des contraintes élastiques et la mise en contact conformal du film et de la lentille. Ces étapes sont réalisées au sein d'une enceinte, ou module de thermoformage, qui compose l'élément centrale de la machine. Le prototype prévoit en outre un système de déplacement de l'enceinte, ainsi qu'un panneau de contrôle des déplacements et des pressions appliquées. La base de la machine, constituée d'un châssis en aluminium, contient la commande électronique d'un vérin élevant le verre au contact du film à l'intérieur du module, ainsi que divers éléments pneumatiques permettant, d'une part, de déplacer le module de mise en forme et, d'autre part, d'imposer différentes pressions au sein de celui-ci. La pression est fournie à la machine par un réseau d'air comprimé tandis que le vide est obtenu par un système venturi couplé à l'air comprimé. Au centre de la machine, une plaque usinée maintient le film à reporter au moyen d'une bague.

Nous avons choisi de pouvoir déplacer le module en trois endroits différents de la machine, de façon à faciliter les différentes étapes de travail – chargement du verre, mise en place du film, thermoformage ou collage du film. Sur la gauche, le module est accessible pour permettre la mise en place du verre sur son support et le positionnement du film au-

dessus. L'emplacement de report proprement dit est situé au centre. À cet endroit, le module peut s'élever contre la plaque usinée grâce à un vérin pneumatique placé dans le châssis de la machine. Une rotule placée entre le module et ce vérin permet une bonne répartition des forces de maintien entre le module, le film et la plaque usinée, garantissant ainsi une parfaite étanchéité. Une troisième position est prévue sur la droite et pourra éventuellement servir à d'autres opérations telles qu'une insolation UV ou une étape de détournage, entre autres.

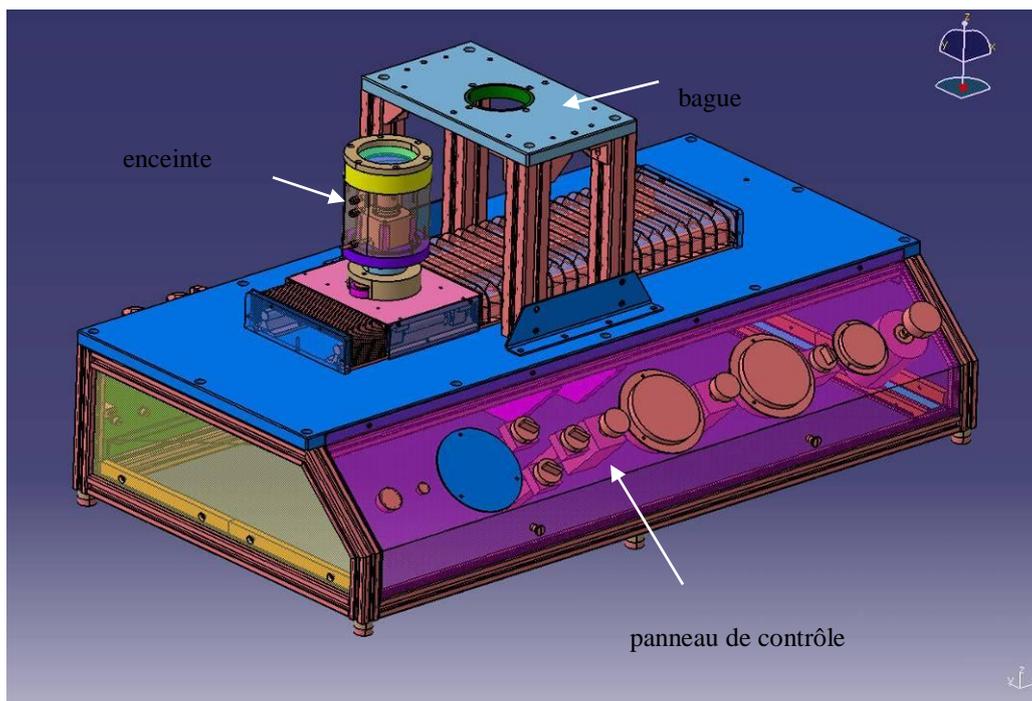


Figure III- 1: Schéma CATIA du prototype de thermoformage PIXIS

Le prototype intègre une source de chaleur qui consiste en un émetteur infrarouge. Nous justifierons ultérieurement ce choix dans un paragraphe consacré au chauffage du film pixellisé.

1.2. L'enceinte de thermoformage

L'enceinte est l'élément central du prototype car elle permet le gonflement du film et son collage sur le verre ophtalmique. Le gonflement contrôlé du film nécessite une enceinte étanche suffisamment grande pour contenir le verre ophtalmique, son support et un vérin. L'enceinte se compose d'un cylindre en aluminium de 85 mm de diamètre interne pour

120 mm de diamètre externe. Sur le côté du cylindre, sont placés des passages étanches pour l'alimentation de l'enceinte en air, en vide et en électricité. Le bloc inférieur sert de support au cylindre et au vérin. Au-dessus du cylindre, l'enceinte dispose d'une bague de mêmes diamètres. Elle est réalisée en téflon pour permettre la répétition des thermoformages sans laisser d'adhésif à sa surface. Le verre doit être maintenu sur un support pour être déplacé pendant l'étape de collage. Ce support étant ajusté au verre pour ne pas entraver cette étape. Nous avons prévu un support de verres disponible en trois tailles pour accueillir les verres de 75 mm, 70 mm et 65 mm de diamètre. Le support se visse sur un adaptateur qui lui-même est fixé sur le vérin. Contrairement aux procédés cités précédemment, nous ne voulions pas que la pression ou le vide créés dans la chambre puissent déplacer le verre. Nous avons par conséquent choisi d'utiliser un vérin ou actionneur linéaire électrique que nous avons placé à l'intérieur de l'enceinte et dont le fonctionnement demeure indépendant des variations de pression. L'actionneur linéaire est constitué d'un moteur pas à pas et autorise des déplacements, sans rotation, du verre à des vitesses variables. Nous avons donc prévu des passages étanches de câbles électriques pour le contrôle du vérin. La pression de déformation du film est fournie par une source d'air comprimée contrôlée à l'aide de régulateurs de pression et de débit.

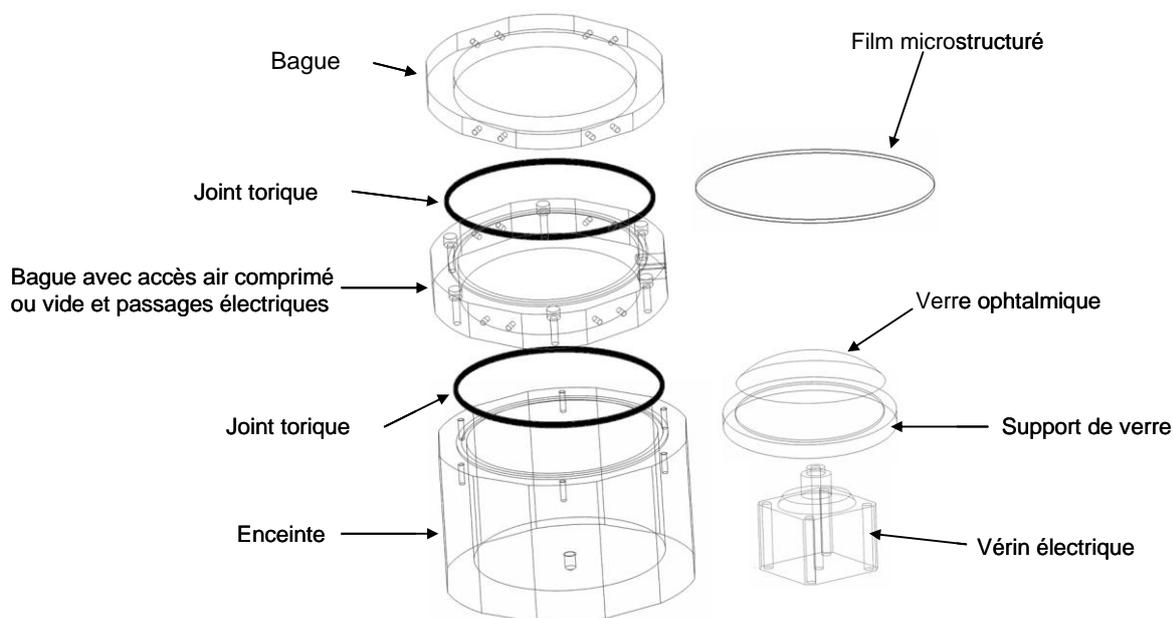


Figure III-2 : Schéma éclaté de l'enceinte de thermoformage

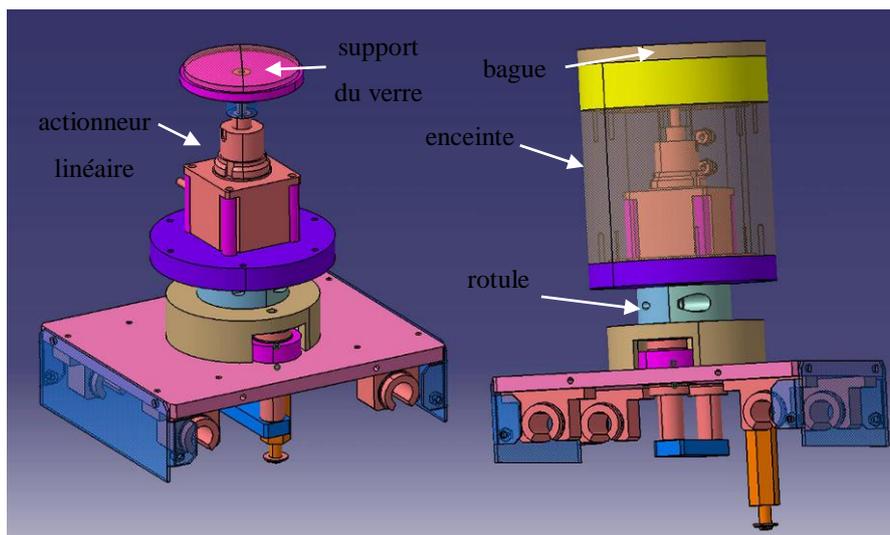


Figure III-3: Schémas CATIA de l'enceinte de thermoformage

1.3. Les contrôles du prototype

La lecture et les réglages de la pression et du vide doivent être précis et instantanés pour une bonne reproductibilité des manipulations. Ainsi dans la première phase du prototype, les commandes du panneau de contrôle sont toutes pneumatiques. Sur la gauche du panneau nous avons placé les commandes de positionnement du module de mise en forme.

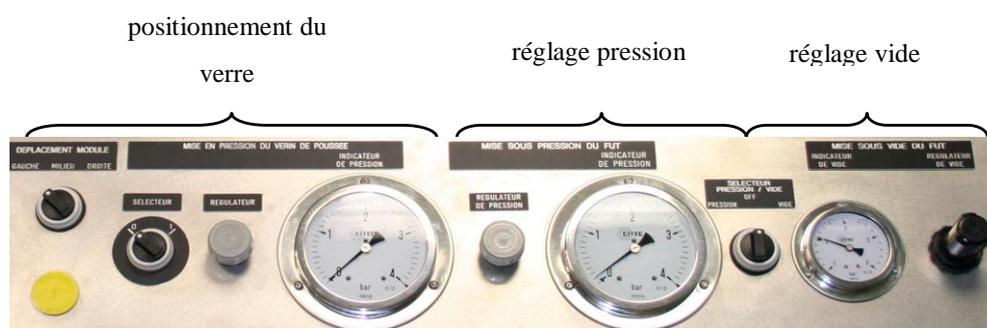


Photo III-1 : Le pupitre de commandes de PIXIS

Le premier bouton est le sélectionneur de position du module qui permet de le placer à gauche, au centre et sur la droite. Le second sélectionneur est couplé à un régulateur et à un manomètre. Il permet de faire monter le module contre la plaque usinée et de le maintenir plaqué malgré la pression de gonflement appliquée dans l'enceinte. La pression est réglable de 0 à 4 bars par rapport à la pression atmosphérique. La droite du panneau est réservée au

réglage de la pression au sein du module. Le sélectionneur permet de choisir entre la pression atmosphérique, une pression quelconque et un vide primaire. La pression est réglable à l'aide d'un régulateur manuel situé à gauche du sélectionneur. Un manomètre de précision placé à droite de l'enceinte permet de lire la pression exercée à l'intérieur. La plage de pression disponible va de la pression atmosphérique à 4 bars. Un dispositif similaire pour le vide est placé à droite du sélectionneur. Le circuit pneumatique est conçu pour assurer la sécurité de l'utilisateur et de la machine. Ainsi, il est impossible, par exemple, de déplacer le module lorsqu'il est en position haute. L'actionneur linéaire est branché à un contrôleur de commande lui-même relié à un ordinateur de bureau. Nous avons développé une interface informatique pour améliorer l'ergonomie du prototype. Les principaux réglages disponibles pour l'utilisateur sont la course de l'actionneur linéaire qui peut être déplacé de 10 μm à 19 mm et la vitesse de translation que l'utilisateur peut faire varier de 50 μm par seconde à plusieurs millimètres par seconde.

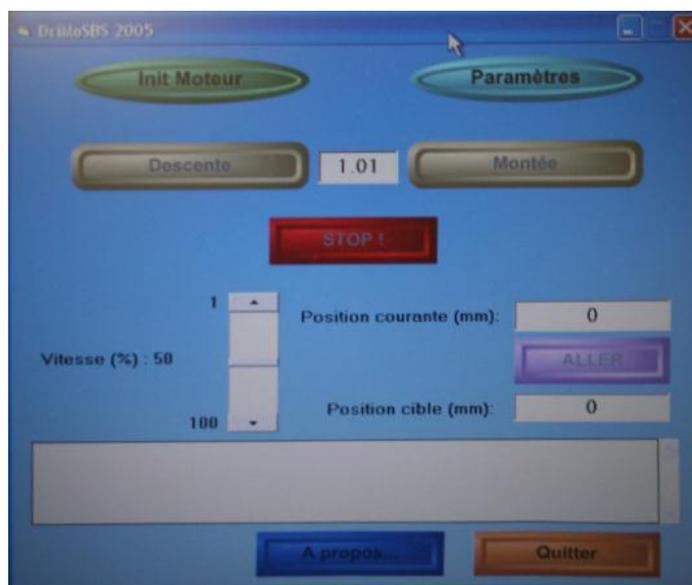


Photo III-2 : Interface de contrôle de déplacement du verre

Le système de chauffage infrarouge est fixé sur le prototype au moyen d'une potence. La mise en chauffe du film est réalisée de façon manuelle en faisant pivoter la céramique au-dessus du film, la distance entre le film et la céramique étant fixé. La lecture de la température du film est obtenue grâce à un pyromètre KT 15.24 de chez *HEITRONICS*, dont la fenêtre spectrale centrée à 7.93 μm est compatible avec l'émission du film pixellisé

1.4. Automatisation du prototype

Pour assurer la reproductibilité des procédés, l'enchaînement séquentiel du report proprement dit a été automatisé, les étapes de déplacement du module restent quant à elles manuelles. L'automatisation de PIXIS permet ainsi de réaliser le cycle du report sans intervention humaine, à partir de « recettes » prédéfinies.

- ***La régulation du chauffage***

Nous verrons dans les paragraphes suivants que le mode de chauffage du film à reporter pour assister sa déformation que nous avons choisi est le chauffage par rayonnement infrarouge. Une évolution de notre prototype a consisté à réguler la température de la céramique infrarouge mise en œuvre à l'aide d'une sonde thermique, sous la forme d'un thermocouple, fixée sur l'émetteur. Un boîtier fournit la puissance nécessaire à la céramique pour atteindre la température de consigne. Le boîtier intègre dans la boucle d'asservissement un dispositif PID qui permet de réguler la température de manière efficace. La relation entre la consigne en température et le niveau de puissance correspondant exigé est établie préalablement lors d'une phase d'étalonnage.

- ***L'automate***

L'automate VISION OPLC (modèle V570-57-T40B) de la société *AUTOCON* permet la réalisation, sans intervention humaine, du cycle de report. Afin de l'intégrer, le prototype a dû être modifié par l'ajout de capteurs et d'actionneurs électriques :

- un second circuit électropneumatique a été conçu et disposé en parallèle du circuit manuel pneumatique que nous avons voulu conserver pour la mise au point des reports ;
- le chauffage a été motorisé et couplé à des capteurs de position. L'automate impose une consigne de chauffage au régulateur thermique ;
- une sonde de pression a été fixée directement à l'intérieur du module pour renvoyer l'information à l'automate ;
- le pyromètre infrarouge KT 15.24 intégré au prototype provient d'une première version où il n'était utilisé que comme indicateur de température. Dans cette nouvelle

configuration le boîtier d'interface MS30 couplé au pyromètre est capable de délivrer une information analogique de température à l'automate.

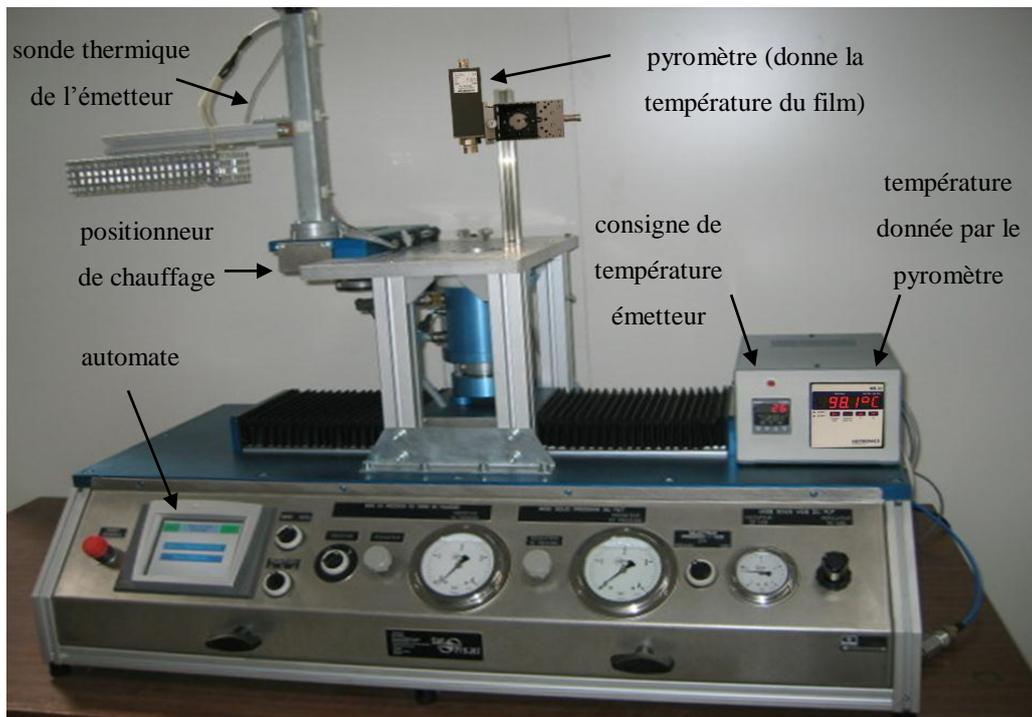


Photo III-3 : Évolution du prototype par automate

- *l'interface de l'automate*

Au démarrage de l'automate le programme laisse à l'opérateur le choix de travailler en mode manuel ou automatique.

Si le mode manuel est choisi la fenêtre, représentée en Figure III-4-a, s'ouvre. Les commandes disponibles par ce menu concernent le chauffage et l'actionneur linéaire. Le réglage de la température de l'émetteur infrarouge est prévu dans la case « Réglage temp. », la lecture de la température du film se fait dans la fenêtre adjacente nommée « Valeur pyromètre ». L'avancée ou le recul de la céramique sont motorisés, ces actions sont réalisables en appuyant sur les touches tactiles « Reculer chauffage » et « Avancer chauffage ». La pression peut se lire sur l'automate dans la fenêtre verte « pression », ou sur le pupitre en face avant avec le manomètre. La touche «TARER pression ATM » permet d'étalonner la sonde avant une série d'expériences. L'étape de collage par la montée du verre sur le film est aussi intégrée à l'automate. La mise sous pression se fait manuellement par le régulateur de pression du pupitre.

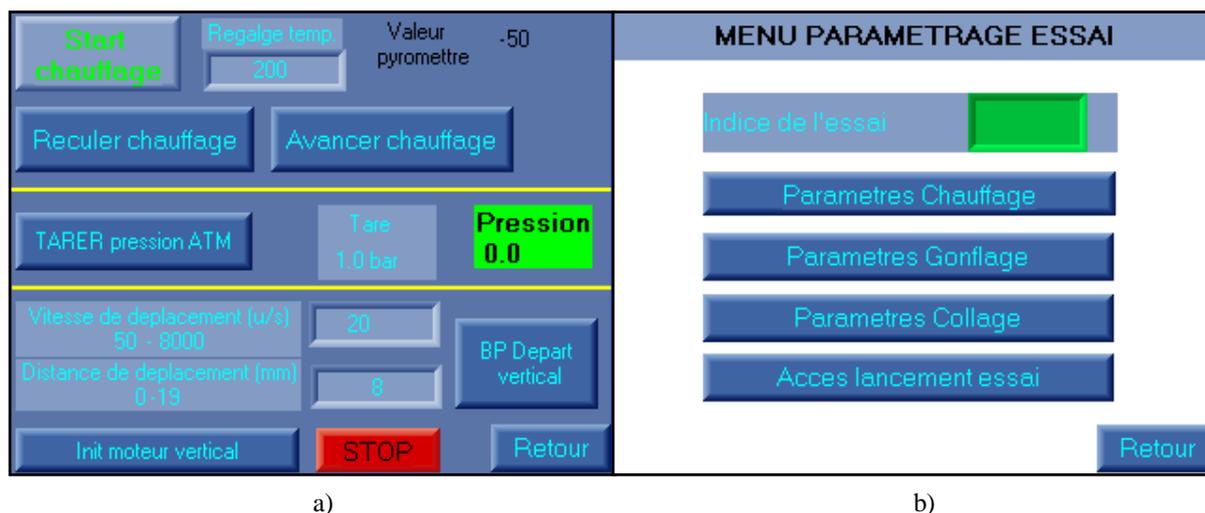


Figure III-4 : a) Menu de l'automate en mode manuel et b) Menu des paramètres en mode automatique

Si c'est le mode automatique qui est sélectionné, la fenêtre « menu paramètres essai » s'affiche. Dans ce menu, il est possible de paramétrer les étapes de chauffage, de gonflage et de collage avant d'accéder au lancement des essais. Dans le menu « paramètres chauffage » le programme propose de travailler avec ou sans chauffage. Si le chauffage est sélectionné, il faut entrer la température de chauffage souhaitée (consigne du régulateur thermique) puis renseigner la valeur de la température, qui sera mesurée par le pyromètre, à partir de laquelle nous souhaitons démarrer le gonflement. Dans le menu « paramètres gonflements » l'automate demande la pression avec laquelle le film doit être formé, la vitesse de mise en pression et les temps de maintien du chauffage. Le troisième menu « paramètres collage » renseigne le programme sur les déplacements et les vitesses de l'actionneur linéaire, il propose aussi de travailler sous une pression choisie ou sous vide.

Lorsque les différents paramètres sont choisis, l'opérateur accède à l'écran « Menu lancement essai » qui est le centre de contrôle du report. Il est ici possible d'enregistrer son programme pour le réutiliser plus tard. Le bouton « DEPART CYCLE » permet de lancer le cycle programmé précédemment. Les courbes de la température du film et de la pression de l'enceinte sont affichées en temps réel sur l'écran et sont enregistrées par l'automate.

Le grafctet représentant les cycles que réalise l'automate en fonction des paramètres de mise en œuvre renseignés dans les différents menus de paramètres est disponible en annexe 3.

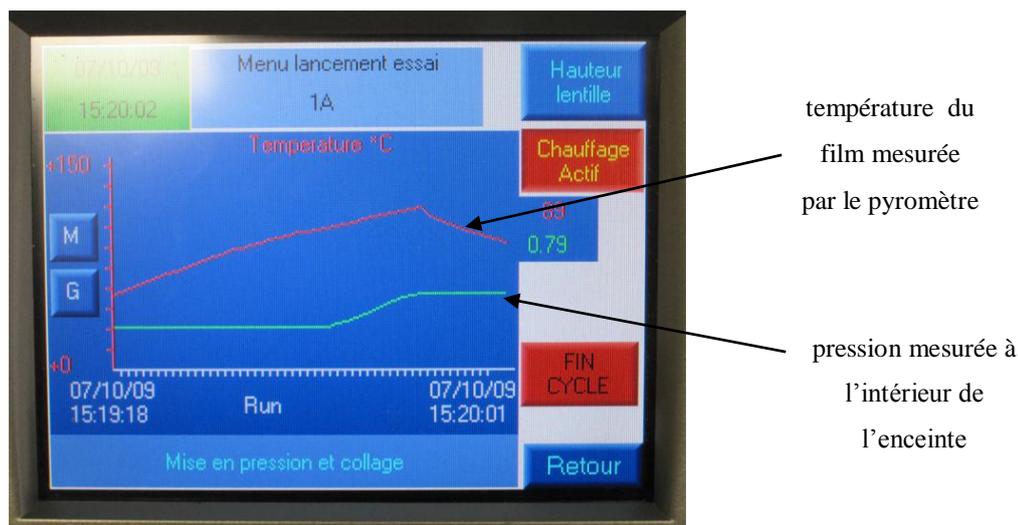


Photo III-4 : Suivi de la température et de la pression lors par l'automate lors d'un report

1.5. Exemples de séquences opératoires du procédé PIXIS-A

La première étape du report, le thermoformage du film pixellisé par gonflement à l'aide d'air comprimé, peut être contrôlé de façon à gonfler le film lentement, après ou pendant son chauffage, et à lui donner ensuite le temps de relaxer les contraintes. La seconde phase correspond à la mise en contact pour réaliser le collage. Lors de cette deuxième phase et dans le cas d'un collage par film adhésif de type PSA, ce collage sera quasi instantané et l'éventualité d'un emprisonnement de bulles d'air est à considérer. Pour éviter ce risque, nous avons la liberté d'opérer selon deux modes :

- le collage du film déformé avec un rayon de courbure à peine plus grand que celui du verre : en approchant progressivement le verre hôte du film gonflé, la mise en contact se fera du centre vers les bords et évitera ainsi tout piégeage de bulles d'air. Il s'agit du mode PIXIS-A1 ;
- une seconde possibilité, qui au plan du collage se rapproche du procédé BST, consiste à gonfler le film au même rayon de courbure que le verre, et à retourner ensuite le film par la mise en dépression de la chambre à vide. Comme précédemment, le collage initié par la montée du verre contre le film démarre au centre du verre et se propage vers le bord. C'est le mode PIXIS-A2.

Les deux séquences opératoires correspondantes sont décrites ci-dessous :

- **La séquence du report selon le mode PIXIS -A 1**

Le film est positionné et maintenu sur l'enceinte de façon étanche. Il est chauffé jusqu'à atteindre sa température de thermoformage. Tout en maintenant le chauffage, une pression $P_{déf}$ est progressivement appliquée à l'intérieur de l'enceinte. Le film est gonflé de façon sphérique jusqu'au rayon de courbure $R1$ souhaité. Le chauffage est arrêté, puis la pression ramenée à une pression de collage P_{seuil} faible et telle que le rayon de courbure $R2$ soit maintenant très légèrement supérieur au rayon de courbure du verre. La montée, grâce au vérin, du verre est alors actionnée pour qu'il soit collé sur le film. L'approche de la lentille vers le film peut être rapide, le collage doit quant à lui être progressif avec une vitesse de déplacement du verre beaucoup plus lente. Les figures ci-après illustrent les étapes et les séquences du report selon PIXIS-A1

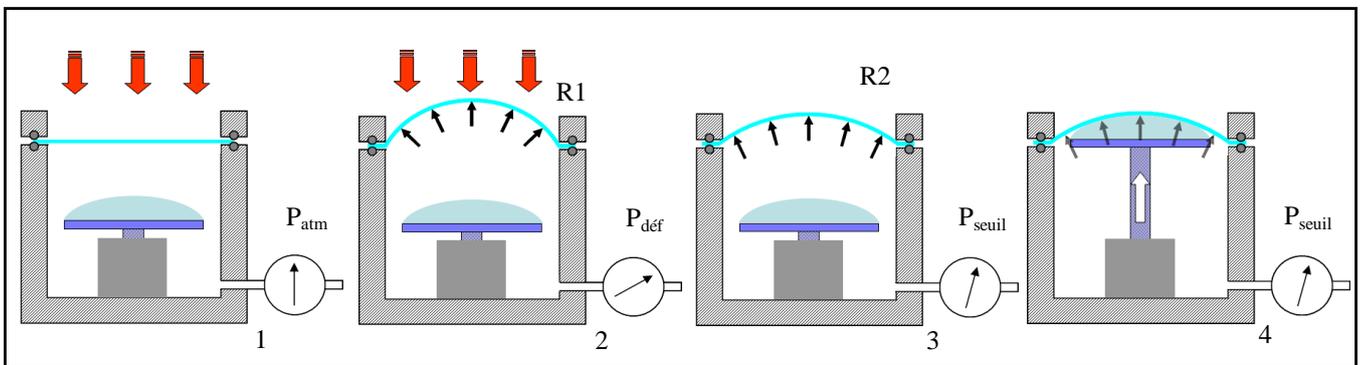


Figure III-5 : Les étapes du report de PIXIS-A1

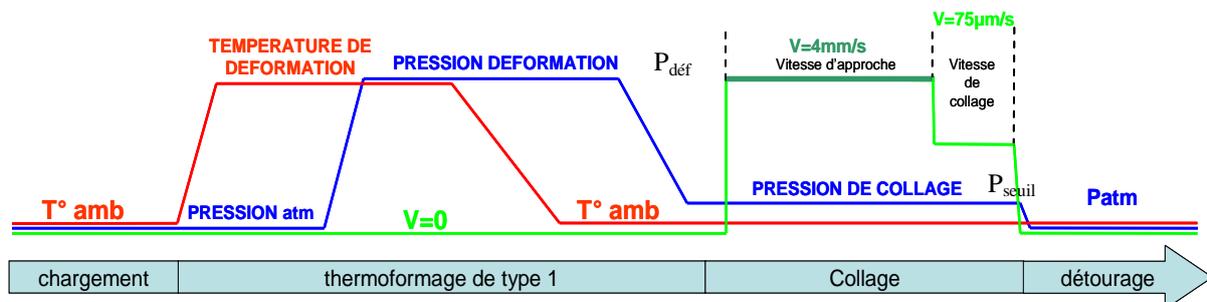


Figure III-6 : La séquence du report de PIXIS -A1

- **La séquence du report selon le mode PIXIS –A2**

Les phases de chargement et de préchauffage du film sont bien sûr identiques à celles du mode précédent. Tout en maintenant le chauffage, une pression de déformation $P_{d\acute{e}f2}$ est progressivement appliquée à l’intérieur de l’enceinte. Le film est ainsi gonflé de façon sphérique jusqu’au rayon de courbure $R3$ souhaité. Le chauffage est arrêté puis la pression ramenée à P_{atm} . Le film possède alors un rayon de courbure $R4$ identique au rayon de courbure du verre. Le film est retourné par la mise en dépression $V1$ de l’enceinte et le verre est alors progressivement collé sur le film en partant du centre vers le bord.

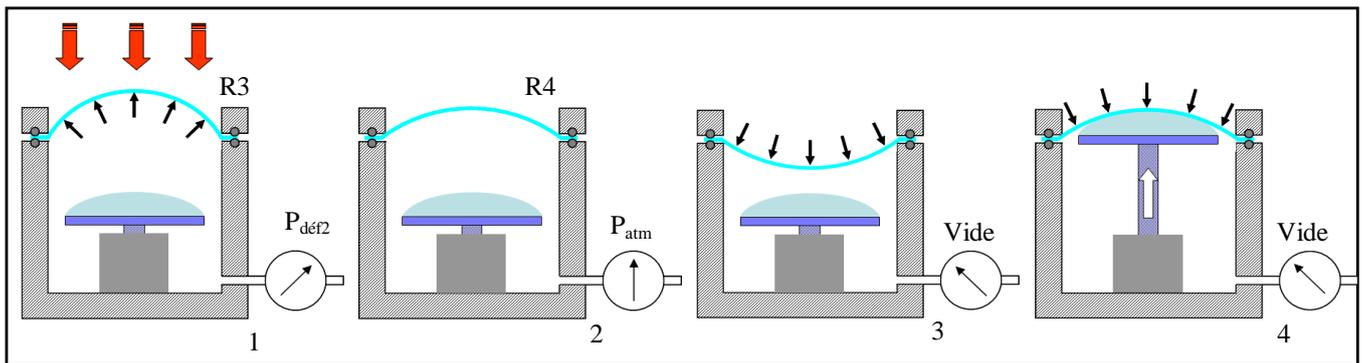


Figure III-7 : Les étapes du report de PIXIS - mode 2

Nous avons également représenté, ci-dessous, la séquence du report du mode 2. Nous constatons ici que la pression $P3$ est bien légèrement inférieure à $P1$ du mode 1 et que le report est réalisé sous vide. Le collage s’opère sur plusieurs millimètres et peut être plus rapide.

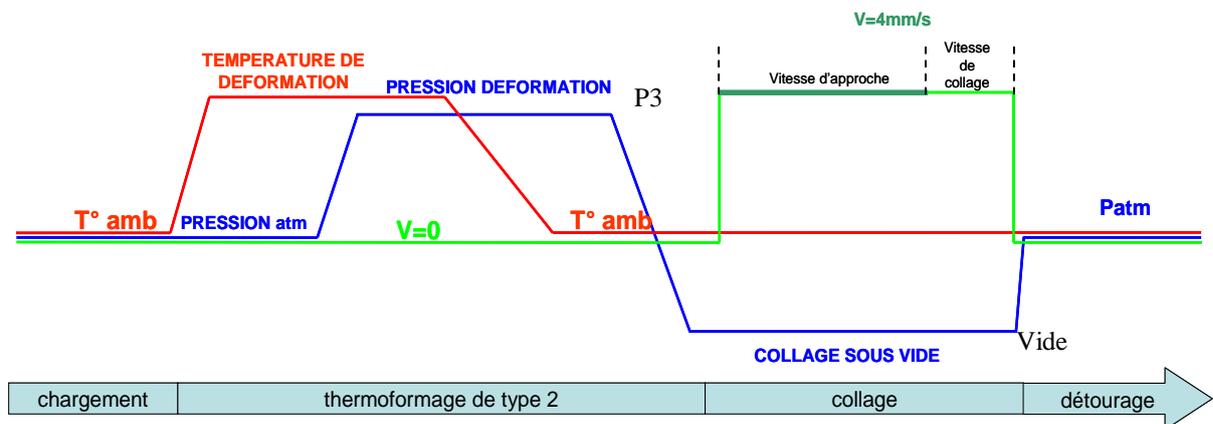


Figure III-8 : La séquence du report de PIXIS - mode 2

2. Le chauffage du film pixellisé

L'étape de chauffage du film est cruciale pour le thermoformage du film pixellisé sur la lentille et mérite à ce titre une étude approfondie. Le chauffage d'un film à la fois mince et transparent optiquement n'étant pas courant, nous avons dû nous poser un certain nombre de questions, telles que le comportement en fonction de l'épaisseur du film, l'interaction avec les autres éléments du prototype, l'influence des liquides fonctionnels sur le bilan de transferts thermiques, etc. Nous avons donc procédé à des simulations numériques afin d'avoir un aperçu des cinétiques de chauffage et de refroidissement de films PET de différentes épaisseurs, en vue de déterminer les meilleurs temps et modes de chauffage. Il existe en effet différents modes de chauffage des matières plastiques. Le choix en est déterminant pour la qualité du chauffage, l'homogénéité de la température du film et donc des déformations.

2.1. Simulation numérique des transferts thermiques rencontrés lors du thermoformage de films sur PIXIS

Pour simuler les transferts thermiques, nous avons recours à la méthode des éléments finis avec le logiciel *COMSOL Multiphysics* [35]. Le modèle est constitué de deux groupes : le film de PET et la bague d'aluminium qui maintient le film sur sa périphérie. Les propriétés physiques de ces matériaux qui nous intéressent pour les simulations de transfert de chaleur, à savoir la conductivité thermique k , la chaleur spécifique C_p , l'émissivité ε et la densité ρ , figurent dans le tableau ci-dessous :

	ρ (kg/m ³)	k (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	C_p (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	ε
PET [30]	1430	0.18	1300	0.9
ALUMINIUM [36]	2702	236	896	0,04

Tableau III-1 : Propriétés thermiques du PET et de l'aluminium

Le maillage est réalisé à l'échelle, il est constitué du film de PET de 75 μm d'épaisseur ayant la forme d'un disque de 10cm de diamètre et imbriqué dans la plaque.

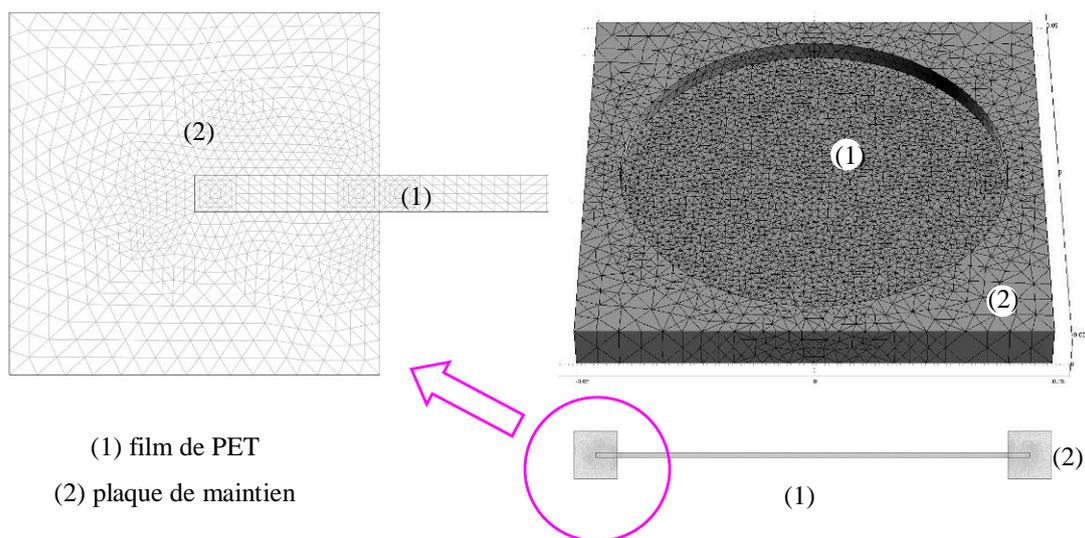


Figure III-9 : Maillage du film PET encastré dans la plaque d'aluminium

carrée de 10 cm de coté pour 1 cm d'épaisseur. Le centre de la plaque est extrudé de matière à le laisser libre sur un diamètre de 85 mm.

2.1.1. Présentation des différents modes de transfert de chaleur

Les mécanismes de transfert de chaleur sont au nombre de trois : la conduction, la convection, et le rayonnement :

- la conduction : elle correspond à une transmission de chaleur dans la masse d'un milieu matériel, les zones chaudes cédant de la chaleur à celles qui le sont moins. L'énergie est transférée par conduction selon la loi de Fourier qui donne l'expression du flux conductif :

$$q_c = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{(III. 1)}$$

où k définit la conductivité thermique, s'exprimant en $W/(m.K)$. Dans notre cas, des transferts par conduction existent à l'intérieur du film et depuis le film en direction de la plaque de maintien du film.

- la convection : elle exprime le transfert de chaleur par transport de matière entre un milieu fluide, dans notre cas l'air, et une paroi, ici le film. Elle peut être naturelle dans le cas par exemple du refroidissement du film par l'air ambiant ou forcée si le chauffage du film est réalisé à partir d'air ventilé à sa surface. La loi de Newton donne le flux convectif :

$$\boxed{\phi = hS(T_{air} - T_s)} \quad (\text{III. 2})$$

où S est la surface de contact, en m², et h le coefficient d'échange par convection en W/(m².K).

- le rayonnement : il traduit la transmission d'énergie à distance entre deux corps. Tous les corps émettent et absorbent des rayonnements de nature électromagnétique, composés de radiations de longueurs d'ondes différentes, qui se propagent dans des milieux parfaitement transparents tels que le vide ou l'air. Le flux radiatif est donné par la relation:

$$\boxed{q_r = \varepsilon(G - \sigma T^4)} \quad (\text{III. 3})$$

dans laquelle ε représente l'émissivité du matériau, T la température du corps et $\sigma = 5,67.10^{-8}$ W/(m².T⁴) la constante de Stefan-Boltzmann et G le flux entrant ou l'irradiation en W/m² qui s'écrit :

$$\boxed{G = G_m + F_{amb} \cdot \sigma T_{amb}^4} \quad (\text{III. 4})$$

G_m étant l'irradiation mutuelle venant d'autres sources en W/m² et F_{amb} le facteur d'éclairage. Dans le cas d'un mode de transfert d'une surface vers l'air ambiant nous avons $G_m = 0$ et $F_{amb} = 1$. Ainsi une surface émet un flux radiatif donné par l'expression

$$\boxed{q_r = \varepsilon\sigma(T_{amb}^4 - T_s^4)} \quad (\text{III. 5})$$

2.1.2. Détermination du coefficient d'échange par convection h du film de PET

Nous nous sommes attachés à déterminer le coefficient d'échange par convection h , variable selon la nature, la géométrie et l'environnement du matériau. À cette fin, nous avons mesuré par thermographie infrarouge l'évolution, au cours du refroidissement, de la température d'un film de PET de $100\ \mu\text{m}$ d'épaisseur initialement porté à $192\ \text{°C}$ à l'aide d'un chauffage infrarouge. La mesure est prise dans la zone où la température nous semble la plus homogène, c'est-à-dire au centre du film. Cela correspond au point SP01 sur la photo suivante.

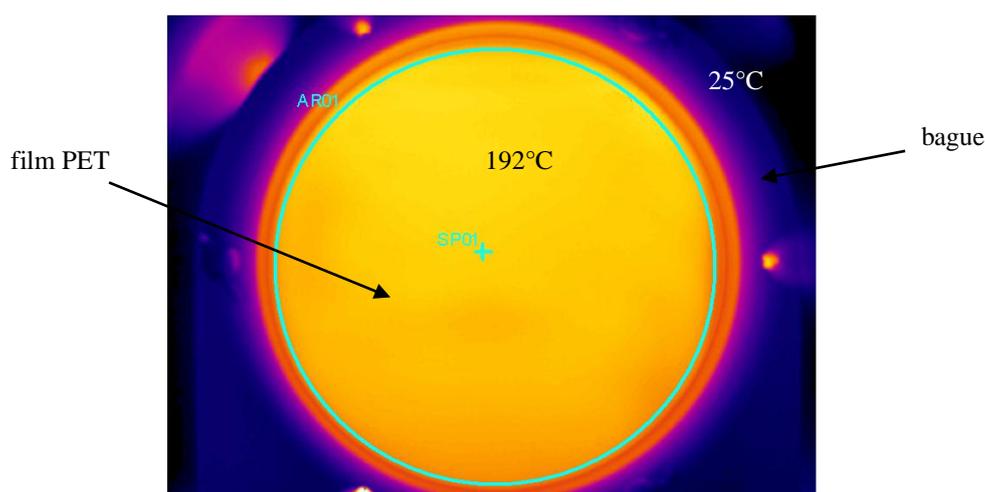


Photo III-5 : Cliché infrarouge d'un film chauffé par un émetteur infrarouge

L'émissivité du PET étant fixée à $\varepsilon = 0,90$ (étude interne *ESSILOR*), nous réalisons la simulation de la dissipation thermique du PET en faisant intervenir les transferts du film par rayonnement, convection libre et conduction. Nous faisons varier h de 0 à $50\ \text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$ pour obtenir les courbes suivantes que nous comparons à la mesure expérimentale obtenue par thermographie infrarouge :

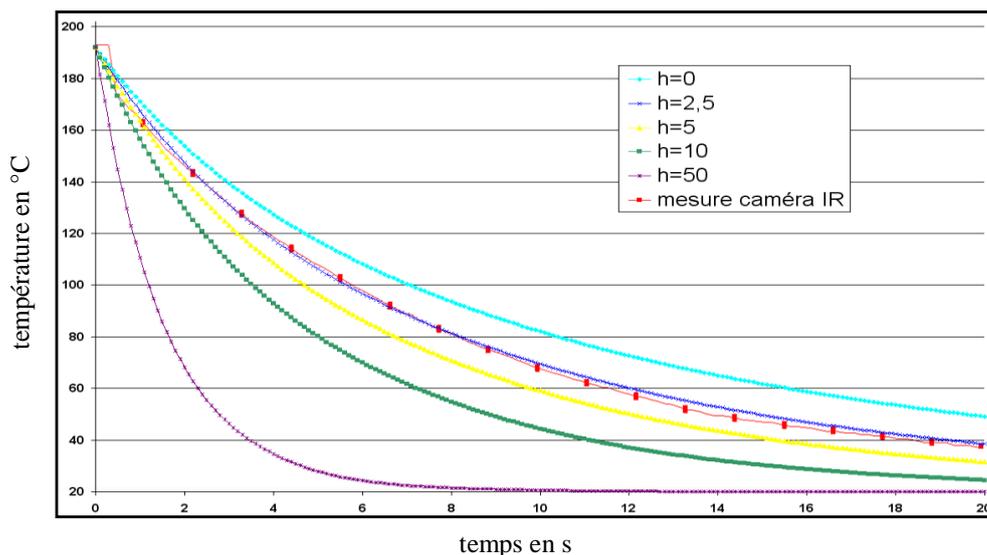


Figure III-10 : Détermination du coefficient d'échange par convection h .

Ainsi dans les conditions ambiantes du laboratoire, le coefficient d'échange par convection, déterminé de façon numérique, qui donne l'évolution la plus proche de l'expérience est $h = 2,5 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$.

2.1.3. Influence de chaque mode de transfert sur la cinétique de refroidissement d'un film de PET

Nous cherchons ici à établir la participation de chaque mode de transfert de chaleur, indépendamment des uns des autres, lors du refroidissement d'un film de PET de $100 \mu\text{m}$ d'épaisseur. Nous réalisons pour cela quatre simulations et examinons la température du film en son cœur :

- La cinétique de refroidissement du film par transfert conductif entre la plaque et le film : La première simulation consiste à déterminer dans quelle mesure la plaque d'aluminium participe au refroidissement du film. Nous imposons donc d'abord au système un seul type d'échange thermique de type conductif entre le film et la plaque. Pour cela le film est isolé des échanges thermiques convectifs et radiatifs vers l'extérieur. Les conditions initiales de température sont 20 °C pour la plaque et 120 °C pour le film.
- La cinétique de refroidissement du film par transfert radiatif entre le film et l'extérieur : La seconde simulation consiste à déterminer les pertes de chaleur du film

par transfert radiatif lorsqu'il est initialement à 120 °C et entouré d'air à 20 °C. Nous supposons ici que le film est parfaitement isolé de la plaque et que les échanges convectifs avec l'air sont nuls.

- La cinétique de refroidissement du film par transfert convectif libre entre le film et l'extérieur : La troisième simulation est consacrée à l'effet de la convection libre entre le film et l'air sur le transfert de chaleur. Les conditions initiales correspondent à un film dont la température est de 120 °C, isolé thermiquement de la plaque d'aluminium et n'émettant pas de flux radiatif. Le coefficient d'échange par convection $h = 2,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.
- La cinétique de refroidissement du film par l'ensemble des composantes de transfert thermique : Enfin, la quatrième simulation suppose l'ensemble des échanges thermiques précédents, c'est-à-dire la conduction entre le film et la plaque, la convection entre le film et l'air, et la radiation du film vers l'extérieur. À l'état initial le film est toujours à 120 °C, la plaque et l'air sont à 20 °C.

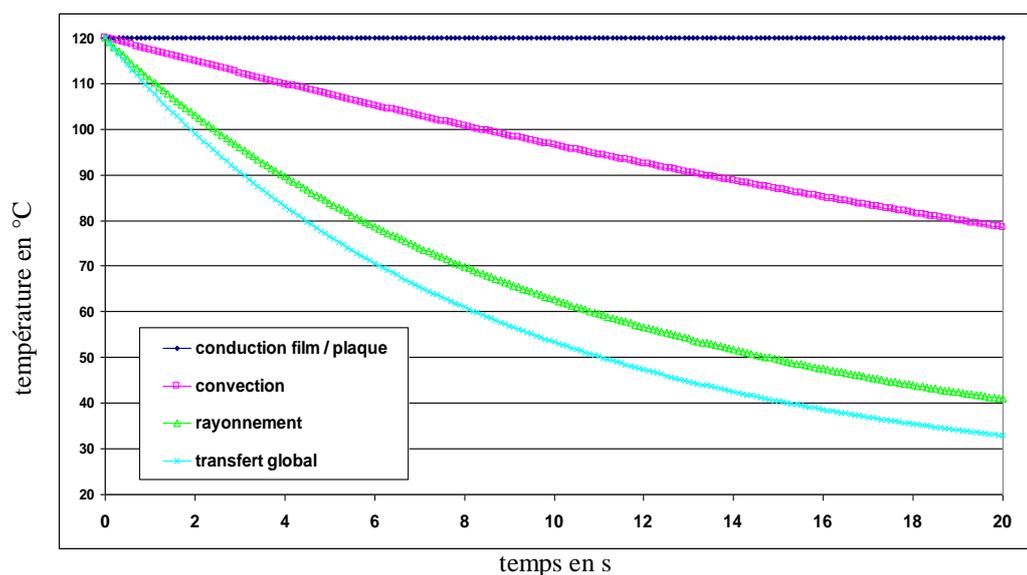


Figure III-11 : Cinétique de refroidissement du film en fonction du mode de transfert thermique

La courbe traduisant l'effet de la seule conduction entre le film et la plaque nous indique que la température du film est restée à 120 °C pendant les 20 s de mesures. En regardant les thermogrammes de la surface du film (Figure III-12), nous observons que le refroidissement par la plaque est localisé à la zone de contact. Les propriétés isolantes du polymère limitent le transfert de chaleur à l'intérieur même du matériau. Cela explique que le

film conserve sa chaleur et ne voit pas sa température diminuer pendant ce laps de temps.

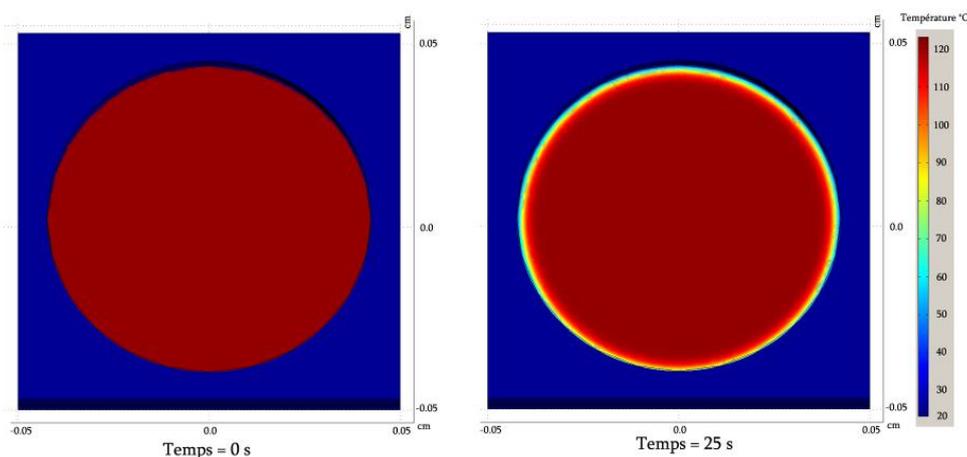


Figure III-12 : Thermogrammes du transfert plaque / film à 0 s et 20 s

La courbe correspondant au refroidissement du film par convection du film vers l'extérieur montre un refroidissement modéré sur cet intervalle : après 20 secondes sa température atteint 80 °C soit une baisse de 40 °C.

La courbe du rayonnement montre que la température du film passe à 60 °C après 10 secondes de refroidissement. Après 20 secondes, elle n'est plus que de 40 °C. C'est sensiblement le mode de transfert qui participe le plus au refroidissement du film. La dernière courbe représente le refroidissement du film selon les trois modes de transferts. Bien que la réponse globale ne soit pas trop éloignée de la composante relative au rayonnement ces résultats montrent que les pertes de chaleur par convection libre ne sont pas négligeables. Après 20 secondes, le film est proche de 30 °C et tend vers la température ambiante.

Nous avons aussi réalisé les thermogrammes, reproduits sur la Figure III-13, du film de la zone de contact avec la plaque, afin d'avoir une lecture globale des transferts thermiques. L'axe des abscisses correspond à la longueur sur laquelle la mesure de la température du film est réalisée. Le 0 étant la zone de contact, les valeurs négatives correspondent à la partie du film prise dans la plaque et les positives au film en contact avec l'air. L'axe des ordonnées correspond à la fenêtre temporelle définie entre 0 et 25 secondes pendant laquelle le régime transitoire est simulé. L'échelle de droite correspond à la température. Elle affiche la gamme allant de 120 °C à 20 °C, ce qui correspond respectivement à la température initiale du film et à la température ambiante. Les

thermogrammes relatifs au transfert radiatif et au transfert convectif libre montrent un refroidissement homogène sur toute la surface, on se rend ici bien compte de la cinétique de refroidissement qui est plus rapide pour le radiatif que pour le convectif.

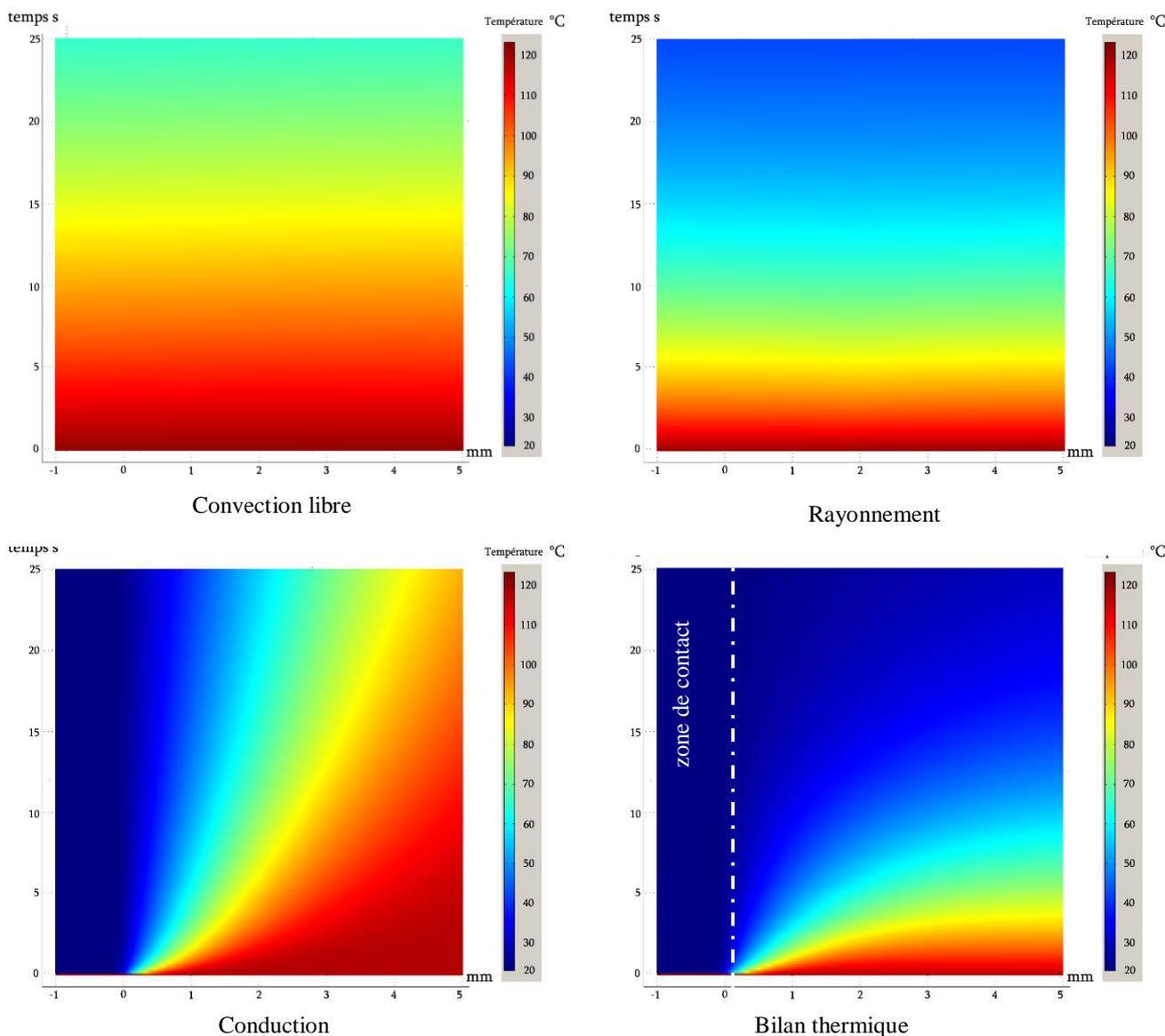


Figure III-13 : Thermogrammes du refroidissement d'un film de PET en fonction du mode de transfert thermique dans la zone de contact entre le film et la plaque.

Le thermogramme du transfert conductif est divisé en deux zones. Celle de gauche qui correspond au film encastré. La température y reste proche de 20°C, ce qui s'explique par l'absorption de la chaleur du film par la plaque d'aluminium. La zone de droite correspond au film qui n'est pas en contact avec la plaque. Le refroidissement provient du contact avec la

plaque et se propage assez lentement vers l'intérieur du disque. Le dernier thermogramme représente l'ensemble des transferts de chaleurs. Invariablement, le film pris dans la plaque voit sa température rester à 20 °C. En dehors, le contact de la plaque sur le film n'influence sa température que sur une zone limitée à 3 mm environ. En somme, ce sont donc les transferts radiatifs et convectifs qui prédominent dans le refroidissement du film.

2.1.4. Influence de l'épaisseur du film de PET sur la cinétique de transfert thermique

Nous avons par ailleurs analysé l'influence de l'épaisseur du film sur la réponse thermique tant au niveau du chauffage que du refroidissement. Les épaisseurs que nous avons considérées sont de 500 µm, 200 µm, 100 µm et 50 µm.

Tout d'abord, dans le cas du refroidissement, nous choisissons d'imposer une loi de transfert thermique constituée du transfert convectif et du transfert radiatif car nous avons vu précédemment que ce sont ces transferts qui prédominent hors de la zone de contact. Les températures initiales sont de 120 °C pour le film et de 20 °C pour l'air. La température est mesurée au cœur du matériau, les trente premières secondes de simulation donnent les courbes suivantes.

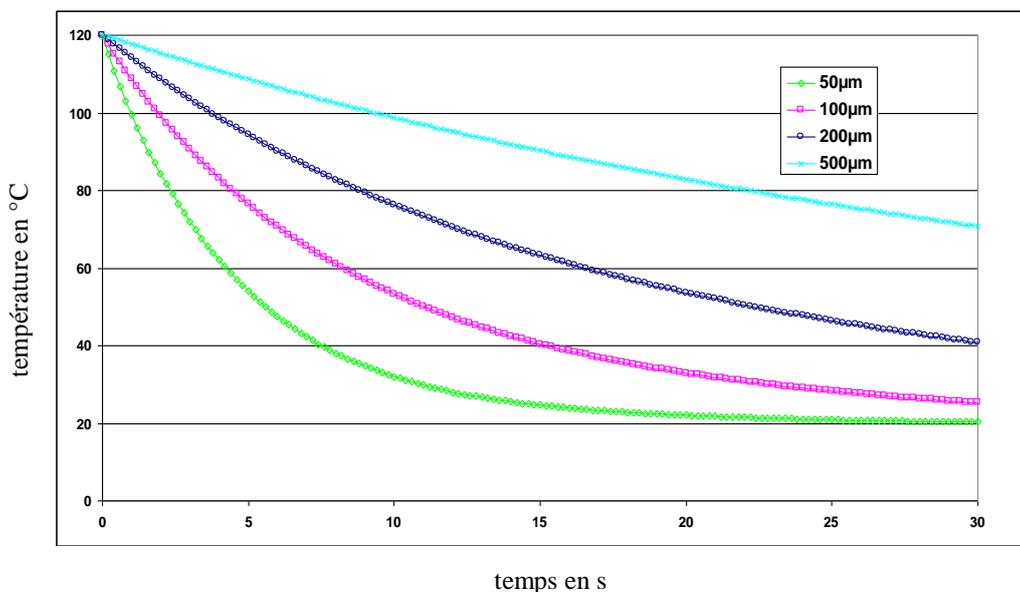


Figure III- 14 Refroidissement d'un film à 120°C en fonction de son épaisseur.

La seconde simulation est une étude du chauffage par un flux de chaleur sur la face

supérieure du film. Un tel flux peut être fourni, par exemple, par l'éclairement d'un émetteur infrarouge. Cet éclairement dépend de la nature de l'émetteur, de sa puissance, de sa surface mais aussi de la distance entre l'émetteur et la surface à chauffer. Dans ses travaux de thèse, S. Andrieu a mesuré l'éclairement de trois types d'émetteurs infrarouges [37]. Les mesures présentées dans le Tableau III-2 ont été effectuées avec une distance de 15 cm entre l'émetteur et le capteur sur une surface de 600 mm par 600 mm.

Émetteur	Halogène	Quartz	Céramique
Type	Philips	TQS	Elstein HTS
Puissance (W)	500	600	600
Température (K)	2500	1170	970
Éclairement max ($W.m^{-2}$)	1319	4544	3310
Éclairement moy ($W.m^{-2}$)	324	647	578

Tableau III-2 : Propriétés des émetteurs infrarouges selon S. Andrieu [34]

La surface du film que nous devons chauffer (disque de 8,5 cm de diamètre au plus) est du même ordre de grandeur que la surface d'une céramique IR. Le niveau d'éclairement de ce récepteur est donc proche de l'éclairement maximum issu de l'émetteur du fait de l'angle solide d'éclairement assez faible. Aussi, pour alléger nos simulations dans cette première approche d'estimation, nous avons choisi de ne pas considérer les effets 3D. Par ailleurs, et toujours avec le souci de simplification, nous avons défini dans un premier temps un niveau de puissance absorbée en s'affranchissant des relations de recouvrement entre spectre d'émission de l'élément chauffant et spectre d'absorption du film. Nous reviendrons sur ces considérations ultérieurement.

Dans ces conditions, nous avons considéré un chauffage homogène sur la face externe du film apporté par un flux de chaleur d'un niveau comparable à celui de l'éclairement maximum d'un émetteur infrarouge placé à 15 cm du film. Ainsi, nous avons choisi de considérer un flux de $2000 W.m^{-2}$ et un autre de $3000 W.m^{-2}$, deux valeurs compatibles avec la littérature.

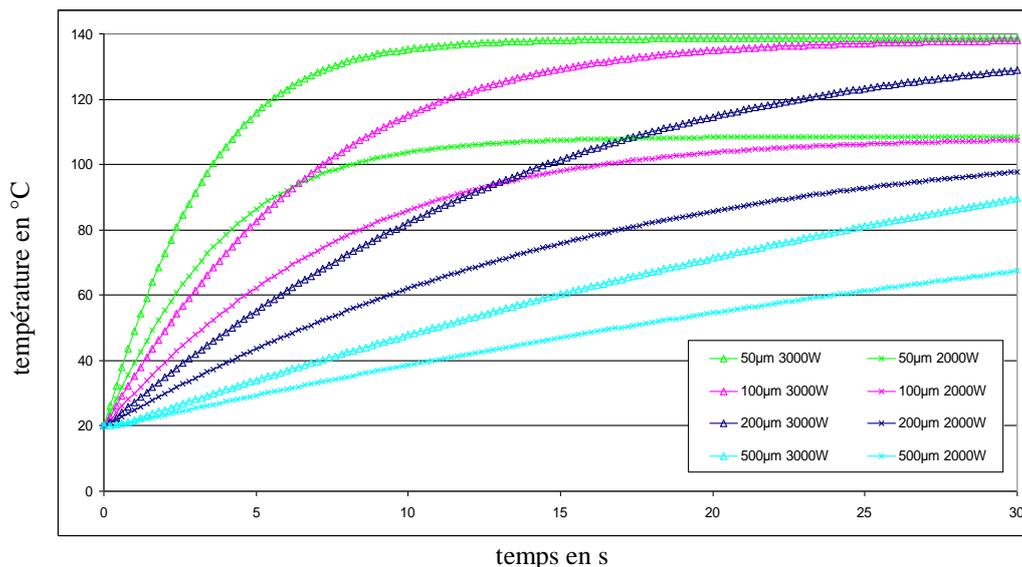


Figure III-15 : Chauffage d'un film par infrarouge en fonction de son épaisseur.

Comme attendu, plus le film est fin et plus il se refroidit ou se réchauffe rapidement : le film de 50 µm passe de 120 °C à 40 °C en moins de 8 secondes alors qu'il en faut trente au film de 200 µm. De même, un film de 50 µm va atteindre une température de 100 °C en 4 s lors d'un chauffage qui éclaire sous une densité de puissance de 3000 W.m⁻², ou en 8 s avec un chauffage à 2000 W.m⁻² alors qu'il faudra respectivement 14 s et 30 s pour un film de 200 µm.

Les courbes de la Figure III-15 montrent qu'avec un chauffage à 3000 W.m⁻², la température du centre du film de 50 ou 100 µm d'épaisseur se stabilise autour de 140 °C : à cette température, le film reçoit autant d'énergie par infrarouge qu'il n'en cède. Considérons à nouveau l'effet du contact entre la plaque et le film avec un temps de chauffage de 120 s.

Les thermogrammes reproduits sur la Figure III-16 montrent aussi le profil transversal de température entre le film en contact avec la plaque et le film en contact avec l'air. Plus le film est épais et plus cette zone est étendue : pour le film de 50 µm elle est de 1,5mm, pour le film de 100 µm de 2 mm, pour celui de 200 µm de 2,5 mm et pour le film de 500 µm la zone s'étend sur plus de 3 mm.

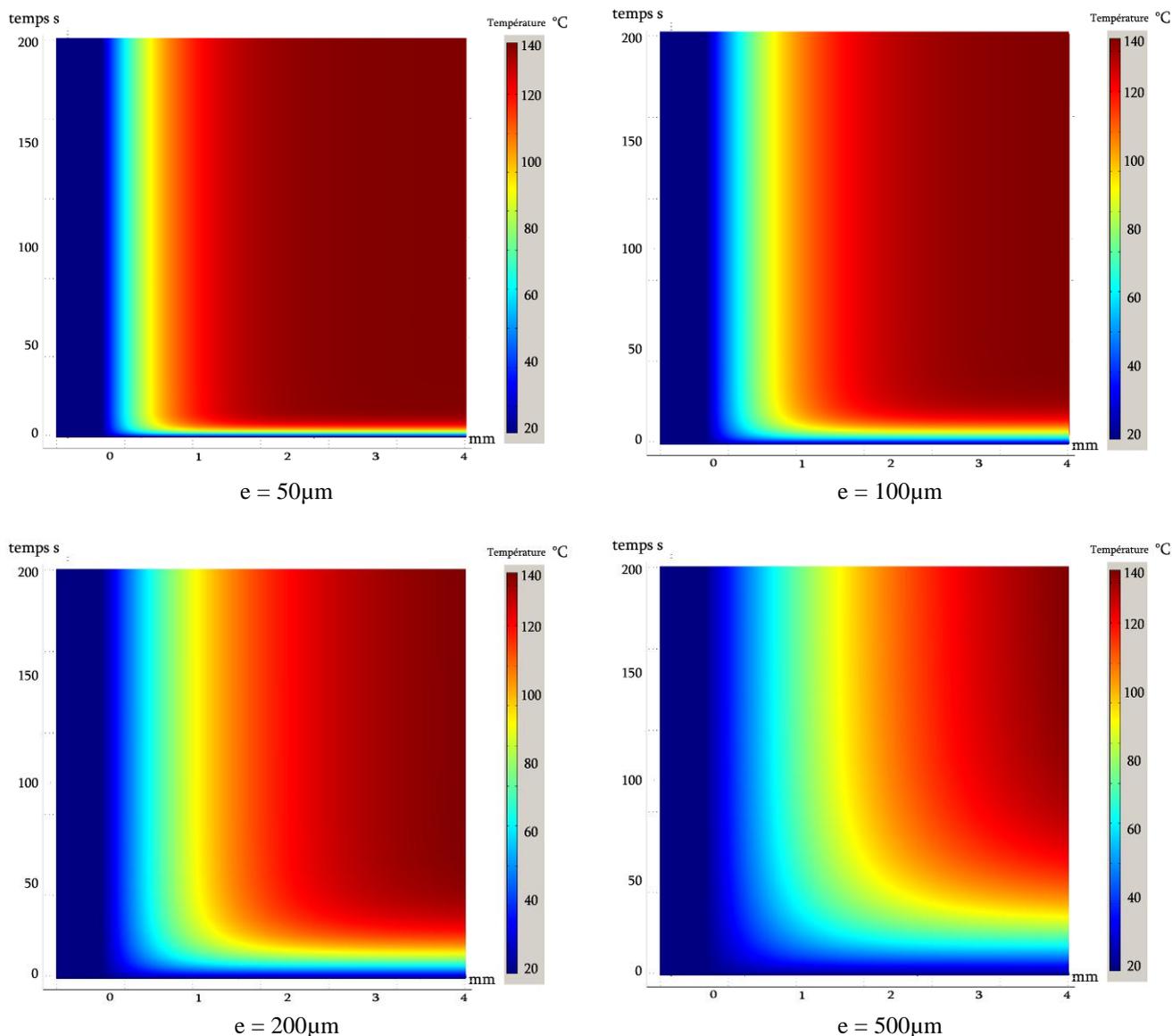


Figure III-16 : Thermogrammes du chauffage d'un film en fonction de son épaisseur

Conformément à nos observations et notre conclusion précédentes, le refroidissement d'un film de PET provient essentiellement de son rayonnement vers le milieu extérieur et un peu de la convection libre. Le film en contact avec la plaque d'aluminium reste à la température de la plaque pendant le chauffage du film. Il existe une zone de transition entre le film à 20 °C et celui chauffé qui est d'autant plus grande que le film est épais.

2.1.5. Simulation des transferts thermiques à l'intérieur du film pixellisé

Ce paragraphe est consacré à l'étude de l'influence des microcuves et du liquide

qu'elles contiennent sur les transferts thermiques. Nous choisissons de retenir pour les simulations à suivre des liquides fonctionnels qui ont été utilisés lors de la démonstration de la faisabilité du film pixellisé et la réalisation de différents prototypes. Nous retrouvons ainsi dans le tableau deux liquides de remplissage : le 5CB, qui est un cristal liquide, l'éthylène glycol, un solvant utilisé pour dissoudre des colorants photochromiques dans les microcuves. Le PET est donné en guise de référence.

Matériau de remplissage	ρ	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Cp (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
5CB	1020	0.15	1000
PET	1430	0.18	1300
Éthylène glycol	2500	0.25	1100

Tableau III-3 : Propriétés thermiques des liquides de remplissage

Pour cette simulation nous avons utilisé un maillage aux dimensions du film pixellisé tel que représenté sur la Figure III-17.

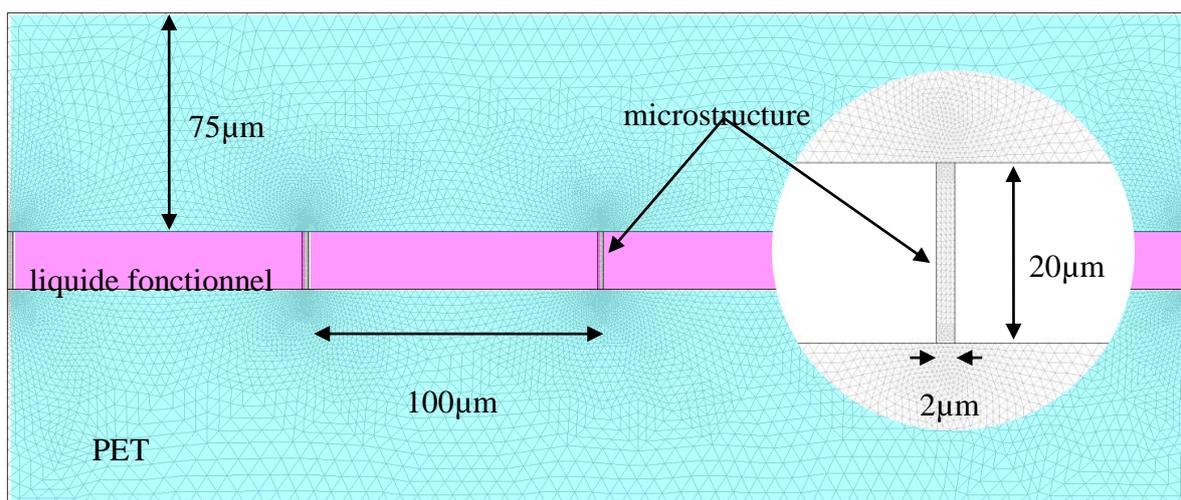


Figure III-17 : Maillage de la microstructure

Nous avons considéré un chauffage externe apporté par un flux de chaleur de 3000 W.m⁻² à la surface du film microstructuré. L'évolution dans le temps de la température du film sur la face opposée à celle du chauffage ainsi simulée, et en fonction du liquide fonctionnel dans les microcuves, est reportée sur Figure III-18. La nature du liquide de

remplissage a un impact qui reste limité sur le chauffage du film : pour atteindre une température de 120 °C, il faudra 16,5 s pour le cristal liquide 5CB, 17 s au PET et 18 s à l'éthylène glycol.

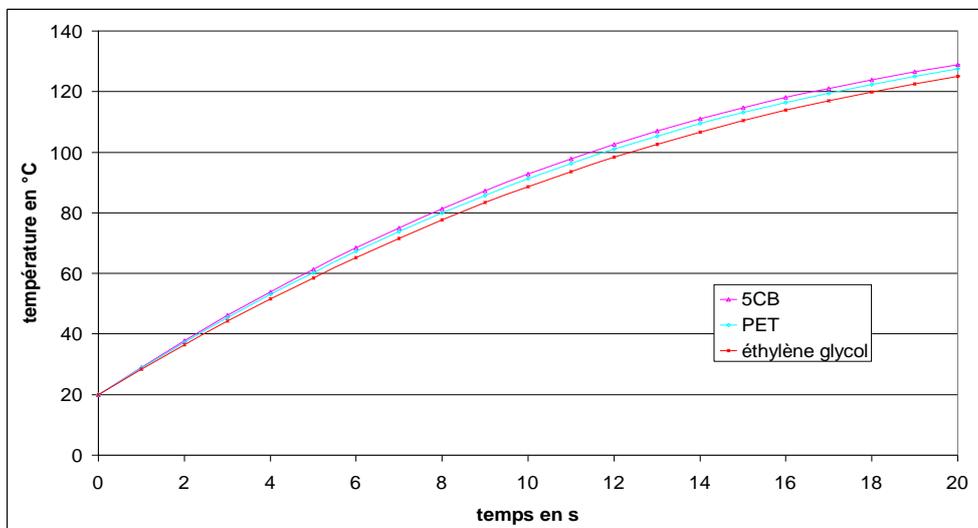


Figure III-18: Cinétique de chauffage du film en fonction de la nature du liquide contenu dans les cuves

Nous n'avons présenté ici que la cinétique de montée en température en fonction de la nature du liquide contenu dans les cuves. Il est clair que les résultats concernant le refroidissement du film en fonction du liquide qu'il contient sont bien sur du même ordre de grandeur.

Avec les conditions de notre simulation, qui considèrent en particulier une puissance absorbée indépendante de la nature du liquide contenu dans les microcuves du film pixellisé, nous pouvons donc conclure que celle-ci n'aura éventuellement un effet au plan thermique que si les propriétés d'absorption des éléments constitutifs sont sensiblement différentes.

2.2. La sélection du mode de chauffage

Pour notre procédé nous voulons mesurer la courbure du film pendant sa mise en œuvre, cela impose l'emploi d'un chauffage sans contact.

Les deux solutions qui se présentent immédiatement pour remplir cette fonction d'assistance thermique dans le procédé de thermoformage sont, d'une part, le chauffage par convection forcée au moyen d'un flux d'air chaud pulsé – c'est le système retenu et mis en œuvre dans la machine MARS – et, d'autre part, le chauffage par rayonnement infrarouge

largement utilisé dans les processus de thermoformages industriels. Cependant, le thermoformage de film à la fois mince et transparent est peu courant. D'ailleurs, il s'agit plus précisément d'un film transparent pour l'homme car il n'absorbe pas les ondes dans le domaine du visible (400 nm à 700 nm). Un tel film peut toutefois ne pas être transparent à d'autres longueurs d'ondes. La Figure III-19 provient des travaux de S. Monteix [38], qui propose une mesure de l'absorption d'un film de PET transparent optiquement sur une échelle allant de 400 nm à 10 μm . Nous constatons effectivement que le film transmet les longueurs d'onde de 400 nm à 2,5 μm . De 2,5 à 5 μm , le film n'est plus tout à fait transparent à ces longueurs d'onde et absorbe une partie du rayonnement émis, notamment de 5 μm et jusqu'à 10 μm (fin de la mesure), le film absorbe une grande partie du rayonnement émis.

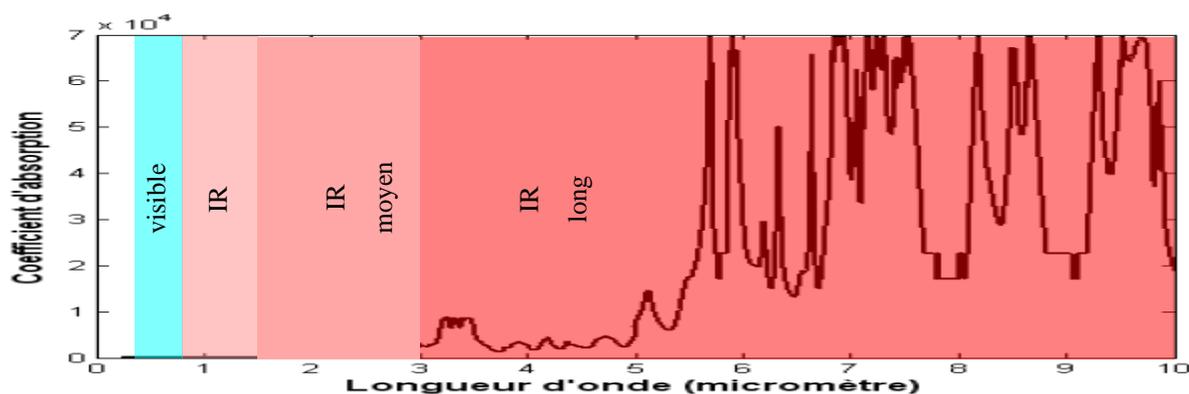


Figure III-19 : Coefficient d'absorption d'un film mince de PET transparent [38]

Le choix d'un émetteur dépend donc de sa capacité à chauffer le film, c'est-à-dire de l'adéquation entre le spectre d'absorption du produit à chauffer et le spectre d'émission de l'émetteur. D'après les mesures d'absorption d'un film de PET, il est préférable d'utiliser un émetteur infrarouge avec un spectre d'émission situé dans l'IR long. Le choix de l'émetteur dépend également de sa capacité à chauffer le film d'une manière uniforme sur toute sa surface. En effet, nous souhaitons réaliser la mise en forme du film pixellisé avec une température sensiblement identique afin de favoriser une déformation qui soit la plus homogène possible.

Notre présélection de chauffage s'est portée sur trois émetteurs électriques et un chauffage convectif qui sont représentatifs du chauffage des matières plastiques dans l'industrie.

2.2.1. Présentation des éléments chauffants étudiés

- *L'émetteur halogène – IR court*

Le premier émetteur infrarouge retenu est constitué de deux ampoules halogènes *PHILIPS* de 500 W, type lampadaire halogène, espacées de 5 cm. Ce dispositif, constitué d'un tube en quartz cylindrique rempli d'un gaz halogène inerte et d'un filament en tungstène, émet dans l'infrarouge court et moyen. Cette famille d'émetteur est souvent utilisée pour le chauffage de préformes de bouteilles en PET, comme le montre la photo suivante.

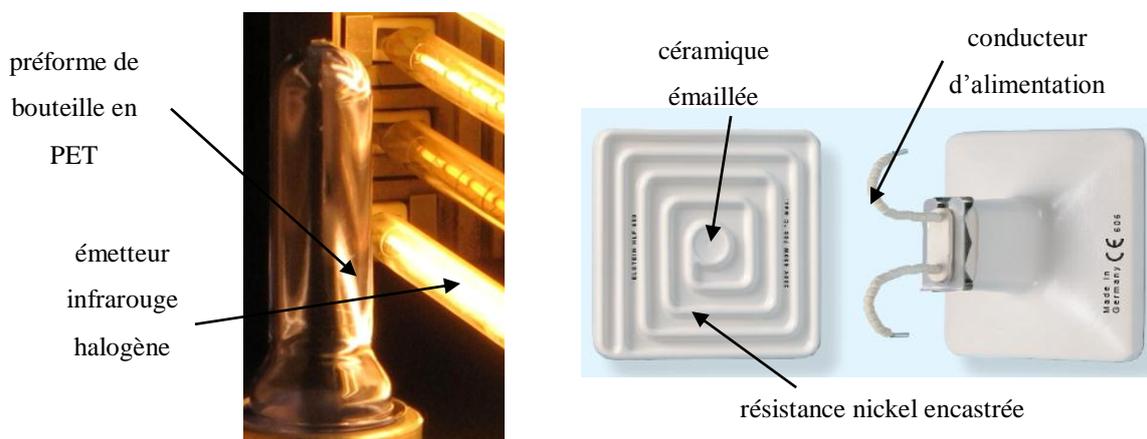


Photo III-6 (à gauche) : Chauffage d'une préforme par des émetteurs infrarouge halogènes lors du thermoformage d'une bouteille en PET [39]

Photo III-7 (à droite) : Émetteur céramique de la société *ELSTEIN*

- *L'émetteur céramique – IR long*

Le second émetteur HLF, d'une puissance de 500 W, est proposé par le fabricant *ELSTEIN*. Il est constitué d'une résistance en nickel noyée dans une céramique de 10 cm de côté.

Ce type d'émetteur est le plus utilisé dans l'industrie du thermoformage car son émission est compatible avec l'absorption de la plupart des polymères. Cet émetteur semble aussi compatible avec le chauffage de notre film de PET car d'après la Figure III-23 le PET possède un spectre d'absorption situé dans le domaine de l'infrarouge long.

- *L'émetteur Infraline – IR étendu*

Le troisième émetteur que nous avons retenu est l'émetteur Infraline 1050 W de la société *ITECH-SYSTEM*, d'une longueur de 230 mm et d'une largeur de 75 mm. Ce dispositif est constitué d'une céramique d'aluminosilicates recouverte d'un dépôt de nickélate de praséodyme qui constitue un revêtement hautement émissif avec une émissivité de 0,90 à 800°C - le corps noir ayant une valeur de 1 – sur un spectre de 1,5 à 10 μm [40] [41] et d'une résistance présentant une topologie optimale avec un pas serré de 2 mm qui permet d'obtenir une température homogène sur l'ensemble du tesson.



Photo III-8 : Emetteur Infraline de la société *ITECH-SYSTEM*

- *le chauffage convectif*

C'est le seul chauffage de l'étude de type convectif mais il constituera la référence pour les essais qualitatifs de chauffage du film PET. En effet, au moment du démarrage de cette étude, c'est le dispositif qui est utilisé sur le prototype de mise en forme MARS. Le système est réalisé à partir d'un décapeur thermique GHG 660 LCD de chez *BOSCH*, dont la puissance de 2300 W permet un chauffage de 50 à 660 °C avec un débit d'air pulsé réglable de 250 à 500 l/min. Le décapeur est associé à un diffuseur cylindrique, adapté à la surface du film, de 10 cm de diamètre.

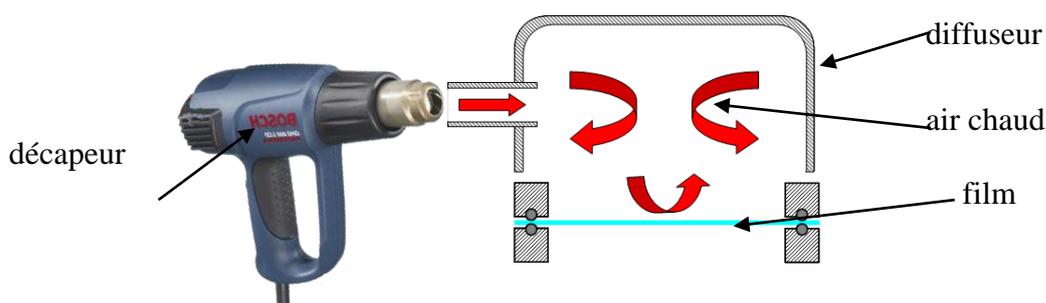


Figure III- 20 Dispositif de chauffage du film de type convectif

2.2.2. Étude de l'homogénéité du chauffage obtenue avec les éléments chauffants

Nous cherchons ici à sélectionner la source de chaleur qui nous apporte le chauffage le plus homogène à la surface du film. Nous comparons pour cela les capacités de chauffage des quatre éléments chauffants à partir de relevés thermographiques infrarouges réalisés à partir d'une caméra Thermovision A40-M, de la société *FLIR SYTEMS*, possédant un capteur CMOS de 320x240 pixels et une réponse spectrale située entre 7,5 et 13 μm . La mesure de la température du film lors du chauffage convectif n'est pas possible à travers le diffuseur. Pour contourner ce problème nous avons mesuré la température sur la face inférieure du film. Dans le cas des émetteurs infrarouge, la mesure directe par le dessus n'est toujours pas possible car l'émetteur est dans le champ de la caméra et masque le film. Par dessous la caméra réalise la mesure à la fois du film et de l'émetteur par transmission or l'émetteur est beaucoup plus chaud que le film et ce dernier n'apparaît plus par thermographie. La mesure de la température du film est donc obtenue par réflexion en prenant soin d'avoir un angle α suffisant pour ne pas filmer la réflexion de l'émetteur sur le film.

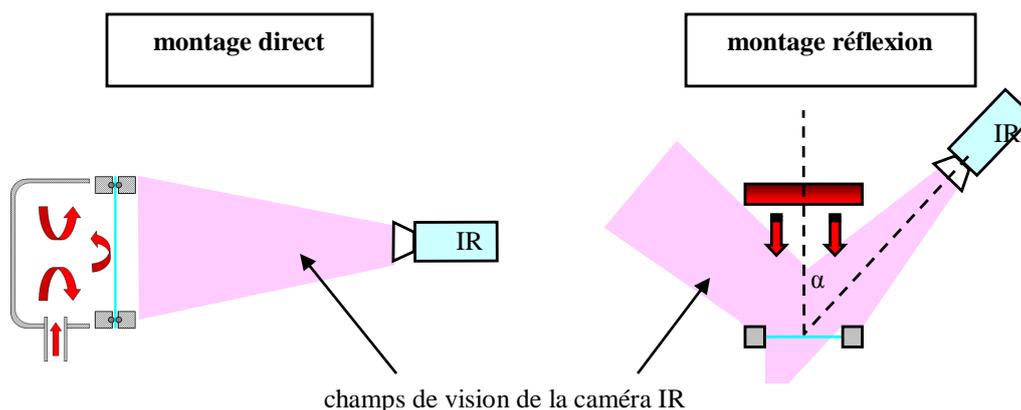


Figure III-21 : Banc de mesure de température

Avant toute expérience, nous veillons à ce que l'élément chauffant soit préchauffé selon les recommandations du constructeur. En effet il suffit de 2 s à l'halogène pour atteindre son régime de fonctionnement alors qu'il en faut 10 min à la céramique.

L'émetteur est placé sur un plan parallèle au film à une distance variable, entre 15 et 25 cm, afin d'obtenir un chauffage du film stabilisé à 150 °C. Les mesures obtenues par la

caméra infrarouge nous donnent l'évolution du chauffage au cours du temps. Nous présentons ici les thermographes représentatifs de chaque mode de chauffage 30 s après la stabilisation de la température maximale du film autour des 150 °C fixés.

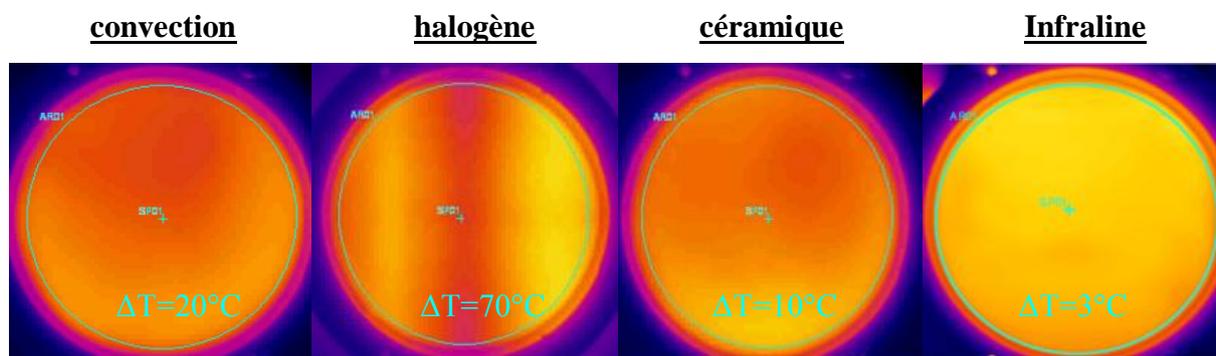


Figure III-22 : Thermographie infrarouge des éléments chauffants

Le thermographe du chauffage convectif est obtenu après une dizaine de seconde de chauffage. Les relevés de températures montrent un ΔT de 20 °C entre la zone les plus foncée qui est environ à 130 °C et la zone la plus claire à 150 °C. Cette différence de température peut s'expliquer de part la géométrie du diffuseur qui n'est pas optimisée à celle du film. Par ailleurs, la température ne se stabilise pas tout à fait ; il apparaît en effet un phénomène d'oscillation aléatoire de la température autour de la position d'équilibre qui peut s'expliquer par la création de turbulences à l'intérieur du diffuseur.

Le thermographe du film chauffé par l'émetteur halogène est obtenu environ 1 min après la mise en place du chauffage. Le ΔT est ici de 70 °C avec une température de 150 °C à la verticale de chaque lampe halogène et de 80 °C entre les deux. Manifestement, ce dispositif, qui est pourtant utilisé dans le chauffage de préformes en PET, n'est pas adapté au chauffage de films minces de PET. Notons cependant que nous n'avons pas observé le phénomène oscillatoire qui semble être propre au chauffage convectif.

Le troisième cliché concerne le chauffage du film de PET par la céramique dans le domaine de l'infrarouge long. Le ΔT , après un chauffage à 150 °C en 10 s, n'est plus que de 10 °C régulièrement réparti sur l'ensemble de la surface.

Enfin, l'émetteur Infraline permet d'atteindre la température de 150 °C après 10 s de chauffage environ. Cette valeur est du même ordre de grandeur que le chauffage convectif ou que le chauffage obtenu avec la céramique IR. Le cliché montre un ΔT de seulement 3 °C, ce

qui est de loin la valeur la plus homogène de nos essais.

Avant de retenir l'émetteur Infraline pour nos campagnes de thermoformage nous avons étudié l'influence du chauffage du film sur le réchauffement du verre ophtalmique positionné en dessous. En effet, le verre hôte du film pixellisé d'indice 1,67, a une température de transition vitreuse relativement basse de 60 °C qu'il ne faut pas dépasser au cours du procédé de thermoformage. Les travaux de thèse de S. Monteix montrent l'influence de l'épaisseur d'un film de PET sur sa transmittivité. La Figure III-23 suivante illustre la transmittivité de films de PET, de même nature, de 20 µm, 30 µm, 50 µm et 100 µm d'épaisseur sur le spectre de 1 µm à 25 µm. Il y est très clair que le film le plus fin laisse passer une grande partie du rayonnement qu'il reçoit alors que le film de 100 µm en absorbe davantage. En revanche il n'apparaît pas de rapport fixe entre l'absorption et l'épaisseur du film : à la longueur d'onde de 1 µm le film de 20 µm d'épaisseur transmet 50 % du rayonnement et le film de 100 µm environ 40 %, alors qu'à la longueur d'onde de 20 µm le film de 20 µm d'épaisseur transmet 40 % du rayonnement alors que le film de 100 µm voit sa transmittivité proche de 0 %.

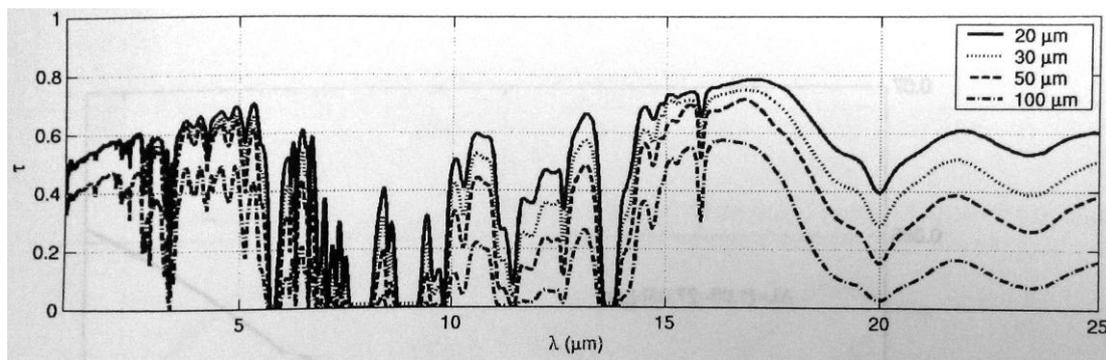


Figure III-23 : Transmittivité de films PET de 20, 30, 50 et 100 µm d'épaisseur aux longueurs d'onde de 1 µm à 25 µm selon MONTEIX [38]

Nous avons cherché à mesurer l'impact du chauffage du film sur la température du verre lorsque le film est chauffé 150 °C pendant 30 s. La technique de mesure utilisée est la méthode de mesure directe en plaçant le verre entre la caméra IR et le film. Les thermogrammes de la Figure III-24 correspondent à gauche au chauffage convectif et à droite au chauffage par l'émetteur IR étendu. Le verre +6.00 est ici au premier plan et le film de

PET est en second plan, séparés d'une distance de 2 cm qui correspond à celle que nous avons dans le prototype PIXIS entre le haut du verre et le film en place.

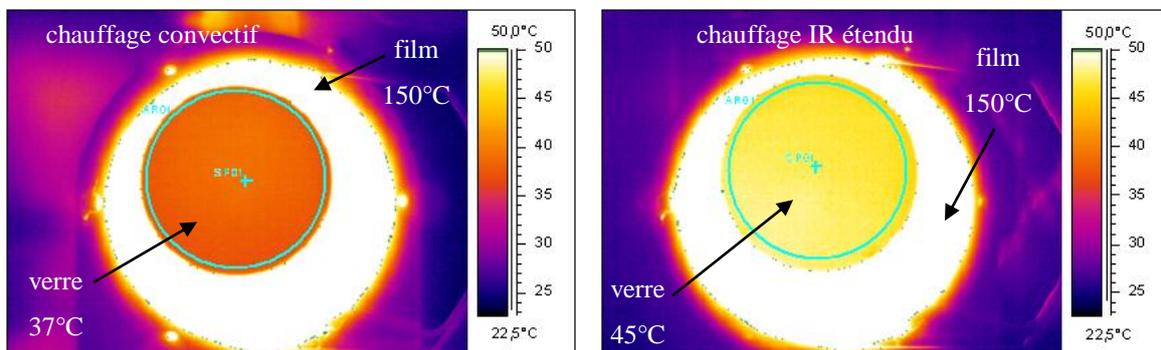


Figure III-24 : Thermogramme de l'échauffement du verre lors du chauffage du film PET

Le verre voit sa température passer de 25 °C à 37 °C lors du chauffage convectif et à 45 °C dans le cas du chauffage IR. Cette différence de température s'explique par la différence de nature des deux modes de chauffage :

- le chauffage convectif chauffe la surface du film à une température de 150 °C et cette chaleur est transmise par conduction jusqu'à l'autre face du film. Le film transfère à son tour sa chaleur par conduction (en chauffant l'air ambiant) et par radiation, ce qui permet au verre d'atteindre la température de 37 °C.
- Dans le cas du chauffage IR, le film est également chauffé à 150 °C. Outre les mêmes échanges thermiques entre le film et le verre qui régissent le cas précédent, il faut maintenant considérer en plus la partie des radiations de la céramique qui n'est pas absorbée par le film et qui va l'être par le verre, ce qui a pour conséquence un accroissement de la température de celui-ci à 45 °C.

Pour conclure, puisque la céramique Infraline permet le chauffage du film le plus uniforme de tous les modes testés et que la température du verre mesurée lors de l'étape de chauffage du film n'atteint pas la température limite de 60 °C, nous avons retenu cette céramique comme mode de chauffage de notre prototype PIXIS dans le cadre de nos campagnes de thermoformage.

3. Les moyens de caractérisation du report du film

Il est clair, tel que cela est apparu dans les discussions des chapitres précédents que, pour notre objectif de report de film sur verre hôte, la maîtrise et le contrôle du gonflement du film au cours de la phase de thermoformage sont capitales, de même que la caractérisation de la déformation inévitable de ce film après report.

3.1. Le suivi du gonflement pendant la phase de thermoformage

Compte tenu de notre souhait d'automatiser au mieux le processus de thermoformage que nous avons développé, le suivi en continu du gonflement du film au moyen d'un sphéromètre était pratiquement inenvisageable ici. Nous avons donc été amenés à mettre au point un système de relevé de déflexion sans contact, avec mesure conjointe du rayon de courbure, basé sur le suivi de la réflexion sur la calotte sphérique d'un spot laser.

3.1.1. La mesure du rayon de courbure avec un sphéromètre

L'utilisation d'un sphéromètre est la méthode la plus simple pour mesurer le rayon de courbure R d'une calotte sphérique. Cet appareil est composé d'un comparateur et d'une bague de diamètre D calibré. La lecture de la flèche H (en millimètres) s'effectue sur le cadran de l'appareil. Le rayon de courbure R est obtenu en injectant la flèche dans la formule :

$$R = \frac{H^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2}{2H} \quad (\text{III. 6})$$

Cette méthode est toutefois limitée pour notre application car la pointe du comparateur appuie sur le film avec une certaine force, rendant la mesure du rayon de courbure difficile voire impossible dans le cas des basses pressions conduisant aux grands rayons de courbure.

3.1.2. Le contrôle de la courbure pendant le gonflement par réflexion laser

Un autre problème se pose à nous avec le sphéromètre car la mesure de la courbure n'est pas possible pendant le chauffage du film. Pour y remédier, nous avons mis au point une méthode de mesure du rayon de courbure sans contact. Cette méthode consiste à pointer

une zone du film avec un faisceau laser et de mesurer la distance entre la source et son image après réflexion sur le film.

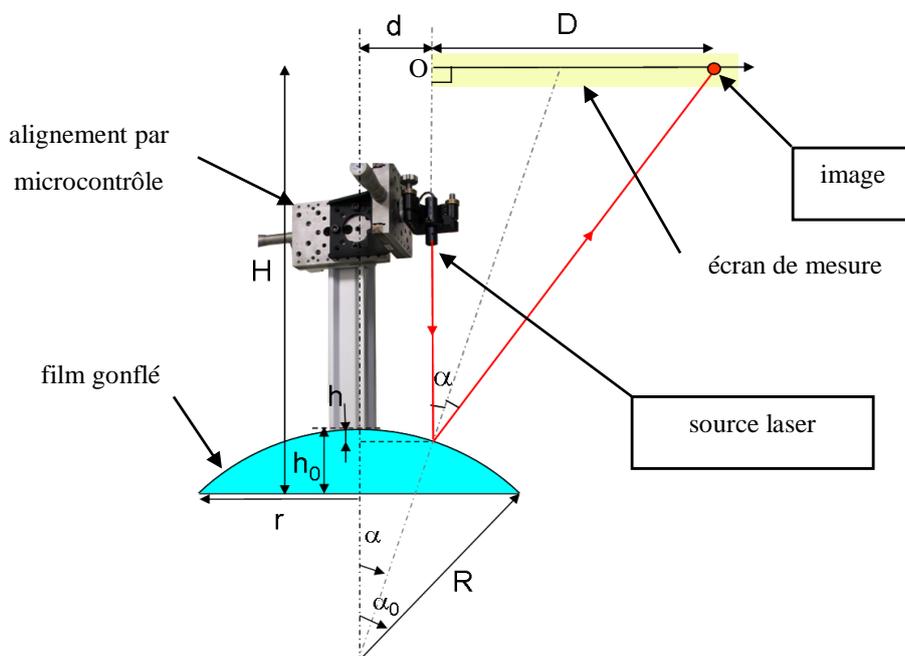


Figure III-25 : Montage pour le contrôle de la courbure du film

Nous présentons sur la Figure III-26 la distance source / image d'un faisceau laser projeté sur un écran placé à un mètre du film lorsqu'il n'est pas gonflé. En plaçant la source laser à une distance d du centre du film nous pouvons donner la distance D de son image après sa réflexion sur le film. Nous avons représenté ces résultats pour des films déformés au gabarit des verres de -6.00 à $+6.00$ pour une source située à une distance du centre du film d de 0 , 10 mm, 20 mm et 30 mm. Les résultats pour $d=0$ mm sont triviaux puisque le centre du film, dans le cas d'une déformation supposée sphérique, est une surface réfléchissante perpendiculaire au faisceau. Nous n'obtenons donc aucune information sur la déformation par cette méthode au centre du film. En s'éloignant du centre les résultats sont plus intéressants, ainsi, en plaçant la source laser à $d=30$ mm du centre du film, nous pouvons suivre l'évolution du gonflement du film de 0 mm pour le film plan jusqu'au rayon de courbure d'un verre $+6.00$ à une distance de 1294 mm de O . Avec cette méthode, nous avons noté des repères au plafond, correspondant aux gabarits des verres mis en œuvre dans nos expériences. Nous pensons qu'il serait intéressant de faire évoluer le prototype en intégrant un capteur pour contrôler le gonflement du film jusqu'à la courbure voulue de façon automatique.

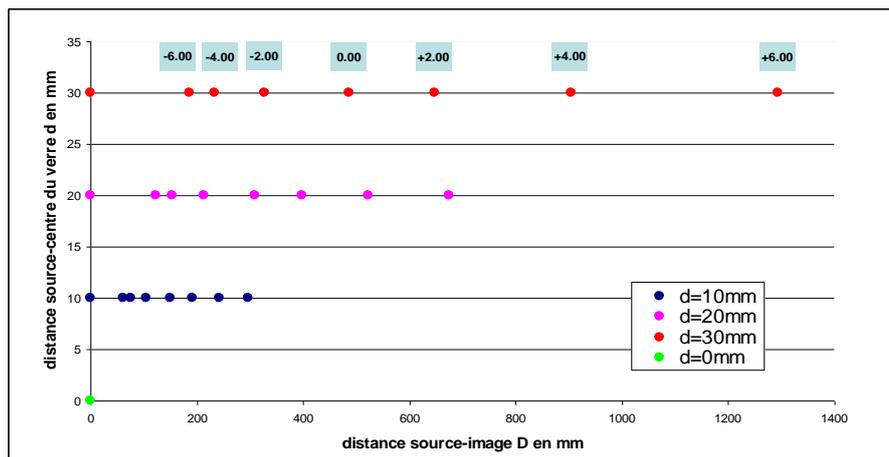


Figure III-26 : Distances source-image en fonction de la position du laser et du rayon de courbure du verre pour un écran placé à 1 mètre en hauteur du verre

3.2. La caractérisation des déformations après report par la technique d'auto-corrélation d'images

Une méthode classique pour mesurer les déformations lors du thermoformage consiste à réaliser une grille régulière à la surface de la plaque polymère puis à évaluer la géométrie du maillage après sa mise en œuvre.

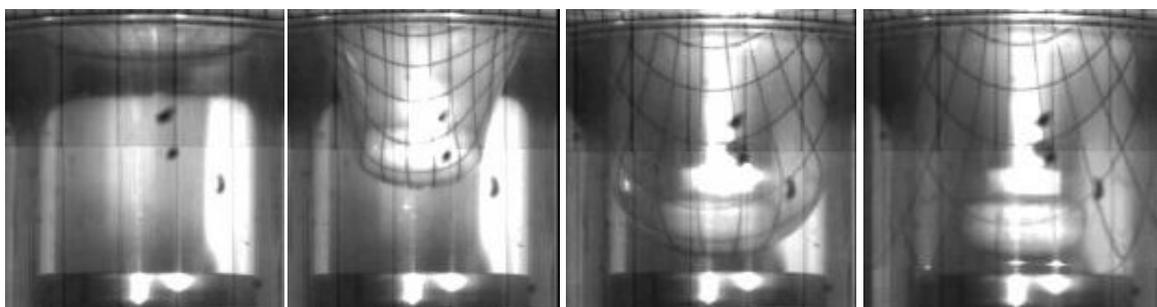


Photo III - 9 : Mesure des déformations à l'aide d'un maillage lors du thermoformage d'un pot [42]

Cette méthode est longue à mettre en place et la résolution des résultats dépend de la finesse de la maille et des déformations à mesurer. Or, nous savons, d'après nos évaluations que nous avons à mesurer de petites déformations, généralement inférieures à 10 %. Cette méthode n'est donc pas adaptée à ce type de mesures.

La méthode du mouchetis, originalement introduite en 1983 [43] et basée sur

l'utilisation d'un motif aléatoire (voir figure ci-dessous) obtenu par pulvérisation de fines gouttes de peinture sur la surface à étudier, donne de meilleurs résultats [44] pour ce niveau de déformations.

Les films pixellisés de l'étude sont amenés à être reportés sur des verres ophtalmiques, cela implique que la mesure du champ de déplacements et de déformations doit être réalisée dans l'espace 3D. Pour effectuer ces mesures, deux caméras numériques sont nécessaires et la reconstruction de l'image repose alors sur des techniques développées en vision par ordinateur. Les mesures de l'étude ont été réalisées à l'aide du système commercial ARAMIS 3D.

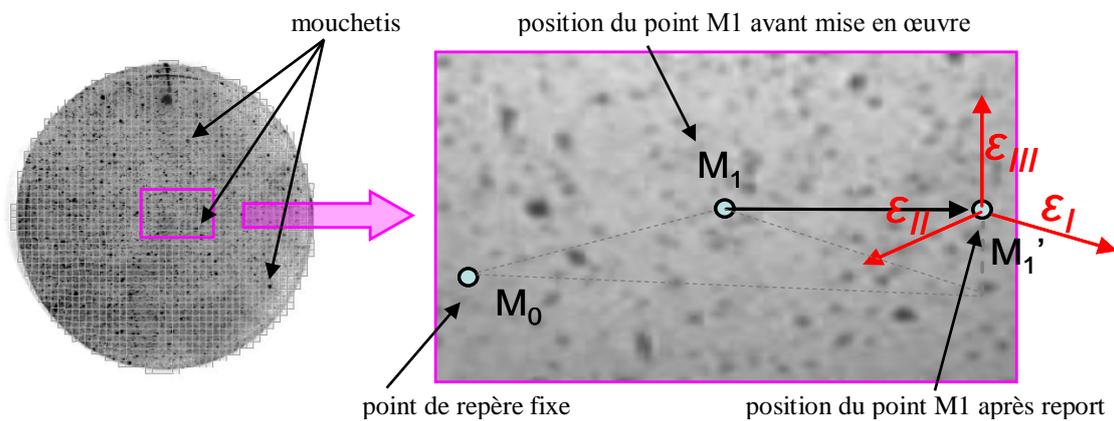


Figure III-27 : Exemple de motif aléatoire et suivi des déformations

Les analyses permettent d'obtenir le déplacement de chaque point de peinture par rapport à ses voisins et ainsi de remonter à la déformation principale ε_I qui correspond à l'allongement maximal et à sa direction, à la déformation secondaire ε_{II} qui est la composante de la déformation suivant une direction orthogonale au tenseur de déformation principal ε_{III} correspond quant à elle à l'amincissement ou à l'épaississement et résulte du calcul s'appuyant sur l'hypothèse d'incompressibilité du matériau qui permet d'écrire la relation $\varepsilon_I + \varepsilon_{II} + \varepsilon_{III} = 0$.

Le mouchetis est réalisé sur le film à étudier à partir d'une peinture noire aérosol du commerce. La peinture utilisée est résistante aux hautes températures afin de ne pas dégrader le mouchetis pendant la mise en œuvre du film. Une courte pulvérisation à une trentaine de centimètres est suffisante pour obtenir un mouchetis à la surface du film. Ce film transparent

moucheté de peinture noire est posé sur une surface plane et blanche de façon à bien faire ressortir les points de peinture. Le mouchetis est alors cartographié dans l'espace à l'aide des deux caméras et enregistré sur ordinateur. Après le report du film une nouvelle mesure est réalisée. La comparaison des deux clichés permet entre autres de remonter aux déformations locales du film ainsi qu'à sa nouvelle géométrie dans l'espace. La Figure III-28 représente typiquement la mesure d'un film moucheté par autocorrélation où l'on peut voir ses déformations avant et après report.

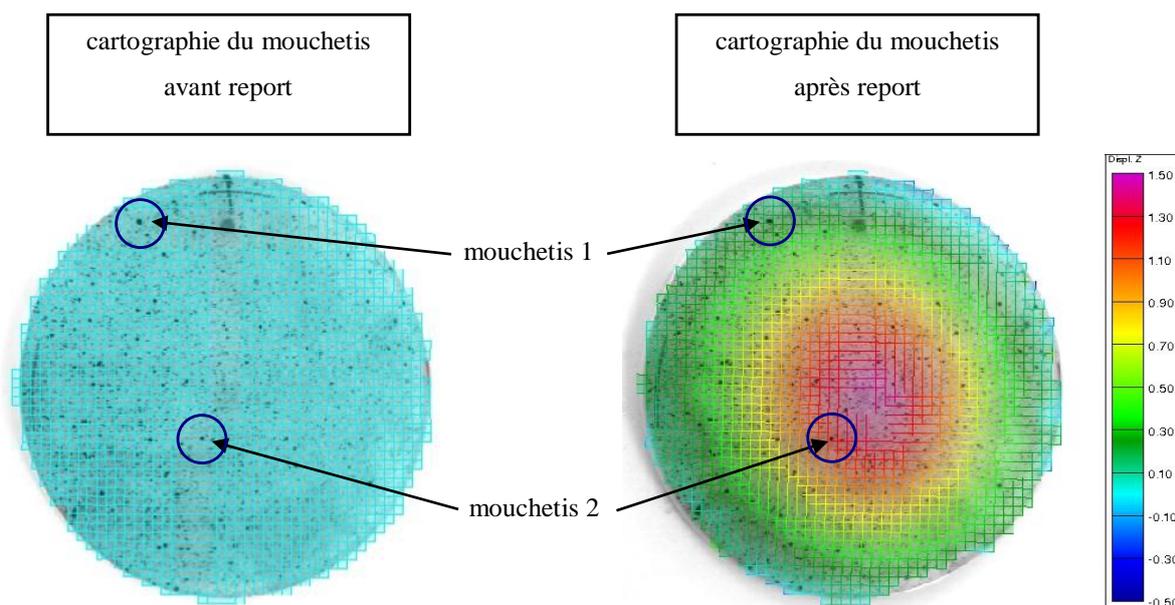


Figure III-28 : Cartographie des mouchetis avant et après report du film sur verre

3.3. le contrôle cosmétique des reports

Outre la caractérisation de la déformation du film après report que nous venons d'expliciter, il convient également d'évaluer dans un premier temps la qualité de ce report en vérifiant la présence ou non de défauts, tels que piégeage de bulles ou de poussières, le déchirement de motifs de structuration et de fonctionnalisation (décollement de parois de cuves, délaminations, rupture par étirement de couches structurales telles que les couches antireflets, etc...). La présence de ces défauts doit bien évidemment induire des anomalies optiques facilement identifiables et propres à chacun de ces types de défauts (diffusion, ...). L'autre critère essentiel sera la bonne tenue de ce report, c'est-à-dire du collage, dans le temps. Cette étude de vieillissement permettra éventuellement d'observer de nouveaux

défauts de collage révélateurs de mécanismes de relaxation de contraintes.

En ce qui concerne la détection des défauts au sortir de l'étape du report, nous avons utilisé trois méthodes de caractérisation :

- la lampe à arc (Photo III-10-a) est un outil de caractérisation optique qui possède une source lumineuse provenant d'une ampoule à vapeur de mercure. Elle permet d'observer par projection sur un écran les défauts engendrés par le report tels que bulles d'air, poussières ou décollement du film ;
- la lampe spot (Photo III-10-c) qui permet le contrôle visuel par transmission de la qualité en termes de diffusion du report ;
- enfin, le microscope optique qui est l'outil le plus adapté à l'observation et à la qualification des défauts ponctuels.

Ces méthodes de caractérisation sont propres à la R&D mais ne sont pas celles utilisées lors de la fabrication du verre car elles ne révèlent pas forcément la sensation du porteur face au défaut. Des contrôles d'inspection cosmétique sont réalisés par quelques personnes particulièrement sensibles et capables de décider de la conformité du verre. Les outils utilisés sont alors la *lampe Waldmann* sur fond noir pour l'inspection en réflexion des verres et en particulier des couches antireflets, ou le *référentiel 17* (Photo III-10-b) lors de l'inspection des verres en transmission.



Photo III-10 : Contrôle cosmétique d'un verre ophtalmique a) lampe à arc b) Référentiel 17 c) spot

4. Conclusion

En nous orientant très tôt vers le principe d'emboutissage pneumatique, principe qui dans le cadre de notre application est original, l'analyse préliminaire de la déformation du film au cours du report dans les procédures existantes nous a beaucoup aidé pour lancer la conception et la mise au point de notre appareillage prototype.

Sur le plan des capacités au sens large de l'outillage, bien que nous nous soyons démarqués des procédures déjà explorées, nous avons pu prendre en compte la plupart des contraintes et exigences du cahier des charges que nous avons établi. Ainsi, les possibilités de dimensionnements tant des films à reporter que des verres hôtes, les gammes de températures nécessaires pour l'assistance au formage, les plages de pressions envisageables pour former des matériaux potentiellement différents en termes de propriétés mécaniques et/ou structurales, ont été définies afin que, dans notre objectif de mise au point, nous puissions explorer des conditions relativement variées. Ceci est primordial dans ce type de projet constituant une rupture technologique et dont certaines caractéristiques sont susceptibles d'évoluer de manière sensible mais pour lesquels on souhaite, dans le même temps, conserver le cadre de certaines conditions industrielles déjà fixées. Ici par exemple, les diamètres et les épaisseurs des lentilles très variables ont imposé le dimensionnement de la chambre, la course des vérins, etc...

L'autre exigence, qu'il était indispensable de satisfaire pour assurer la reproductibilité des processus, était d'aboutir à un ensemble qui puisse être facilement automatisé. Il nous semble que les choix des technologies mis en œuvre nous ont permis d'approcher cet objectif. L'ensemble des travaux et des essais que nous avons conduits grâce à l'outillage que nous venons de décrire vont être maintenant rapportés dans les chapitres suivants.

Chapitre IV

Propriétés et caractérisations du film optique

Le support, ou différemment dit l'armature de la structuration en microcuves – constituées de parois en polymère solide mais extrêmement fines – elles-mêmes remplies de matériaux fonctionnels – eux dans la phase liquide ou sous forme de gel – est composée de deux films optiques réalisant le plancher et le capot des microcuves. Le film pixellisé voit donc ainsi sa tenue mécanique essentiellement assurée par la présence de ces deux films structuraux continus dans le plan. Dès lors, il est clair que le thermoformage et la qualité du report d'un tel dispositif sur la surface d'une lentille ophtalmique dépendent essentiellement des propriétés thermomécaniques de ces films.

Dans ce chapitre nous justifierons le choix du PET, et en particulier celui du Melinex 506, pour ses propriétés optiques et mécaniques. L'étude thermomécanique dynamique, avec notamment l'étude du comportement du film de PET sur une large gamme de températures, nous permettra de préciser les caractéristiques rhéologiques de ce polymère et de proposer le modèle comportemental qui sera indispensable pour la conduite de simulations numériques du processus de thermoformage spécifique que nous avons proposé.

1. Présentation du film optique

Au début de l'étude du film pixellisé, le choix du film substrat optique était assez limité. Les grands fabricants de films, tels que *DUPONT TEIJIN FILMS*, *3M*, *HONEYWELL* ou *GENERAL ELECTRIC PLASTICS*, commencent seulement à s'intéresser à la fabrication technique de films optiques adaptés à l'électronique, avec l'émergence des écrans plasma et LCD. Le cahier des charges du substrat de notre étude impose une qualité optique proche de celle d'un verre ophtalmique, ainsi que la résistance aux différentes étapes de la fabrication du film pixellisé et aux sollicitations engendrées lors du report. Le polyéthylène de téréphtalate (PET) est un matériau qui répond globalement à ces exigences avec de bons compromis.

1.1. Le choix du Polyéthylène de Téréphtalate.

Le PET, ou polyéthylène de téréphtalate, est un polymère thermoplastique de la famille des polyesters. Il est synthétisé par estérification de l'acide téréphtalique et de l'éthylène glycol ou par polycondensation du bis(2-hydroxyethyl) téréphtalate (BHET) et de l'éthylène glycol.

Sous l'effet d'une température supérieure à la température de transition vitreuse T_g , le PET peut cristalliser pour former des microstructures du type sphérolitique, caractéristiques des polymères semi-cristallins [45], [46] : La phase amorphe est quant à elle présente sous deux formes : une phase amorphe intersphérolitique et une phase amorphe intrasphérolitique localisée entre les lamelles cristallines. La croissance d'une sphérolite, comme on le voit sur la Figure IV-1, est sphérique. Cela explique que les lamelles cristallines sont orientées radialement. Elles sont séparées par des zones amorphes. La géométrie des sphérolites peut dépendre de la température du recuit ou du gradient thermique subi au cours de la formation [47].

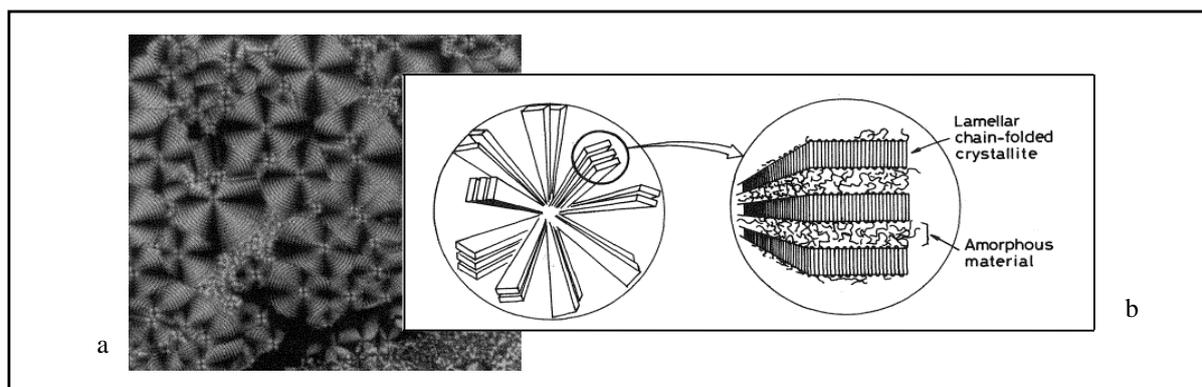


Figure IV-1 : a- Photo de sphérolites d'un matériau semi-cristallin ; b-vue en coupe d'une sphérolite.

Il a été montré que dans ce matériau le phénomène de cristallisation se déroule en deux temps [48] :

- une cristallisation primaire qui voit les sites de germination croître jusqu'à l'entrée en contact des sphérolites pour un taux de cristallinité inférieur à 34 % . ;
- au-delà de ce seuil de 34 % on assiste à une phase de cristallisation secondaire au cours de laquelle les lamelles cristallines des sphérolites se développent.

Ces aspects morphologiques influent bien évidemment sur les caractéristiques

mécaniques du PET. Ainsi, L. Ladouce a montré par des essais de fluage que le module de YOUNG E (aussi appelé module d'élasticité, constante qui relie la contrainte de traction – ou de compression – et la déformation pour un matériau élastique isotrope) d'un film de PET est fonction de son taux de cristallinité [49].

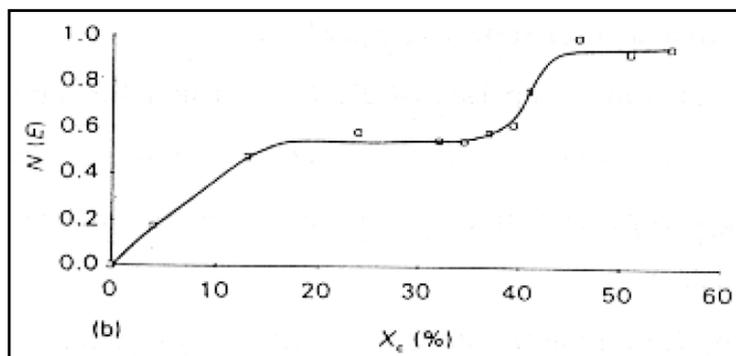


Figure IV-2 : Evolution normalisée du module E en fonction du taux de cristallinité d'un PET.

Cette courbe montre que le module croît avec la cristallinité suivant deux courbes sigmoïdales ; la première provenant de la croissance des germes, et la seconde de l'augmentation du taux de cristallinité au sein des sphérolites. Plus précisément, ces propriétés de déformation dans les polymères semi-cristallins résultent de la mise en jeu des phases amorphes et cristallines comme suit :

- lorsque le PET possède un taux de cristallinité inférieur à 34 %, le matériau est constitué d'une matrice amorphe dans laquelle les sphérolites sont réparties. En étirant un tel matériau, la déformation est essentiellement localisée dans la matrice amorphe. La phase amorphe des sphérolites présente des mouvements rendus plus difficiles que dans la matrice amorphe par le fait que les chaînes présentes dans cette phase sont souvent «arrimées» dans la phase cristalline du PET [50] ;
- Pour un taux de cristallinité supérieur à 34 %, la matrice amorphe n'est plus présente, et le matériau n'est alors composé que de sphérolites. La déformation de la phase amorphe intrasphérolitique engendre localement le glissement ou l'écartement des cristaux lamellaires selon leur emplacement par rapport à la contrainte. Dans le cas de petites déformations, le glissement interlamellaire qui est prédominant et se manifeste par la variation d'orientation lamellaire [51]. Les travaux de J.M. HAUDIN et de C. G'SELL [52] montrent que, dans le domaine des déformations viscoélastiques, les mécanismes de glissement et de séparation interlamellaires concernent essentiellement

la phase amorphe. Pour de plus grandes déformations, et dans le régime de déformation plastique, les cristaux lamellaires se disloquent et forment une nouvelle structure cristalline fibrillaire [53]. La Figure IV-3 reprend le réarrangement moléculaire selon la force de traction appliquée.

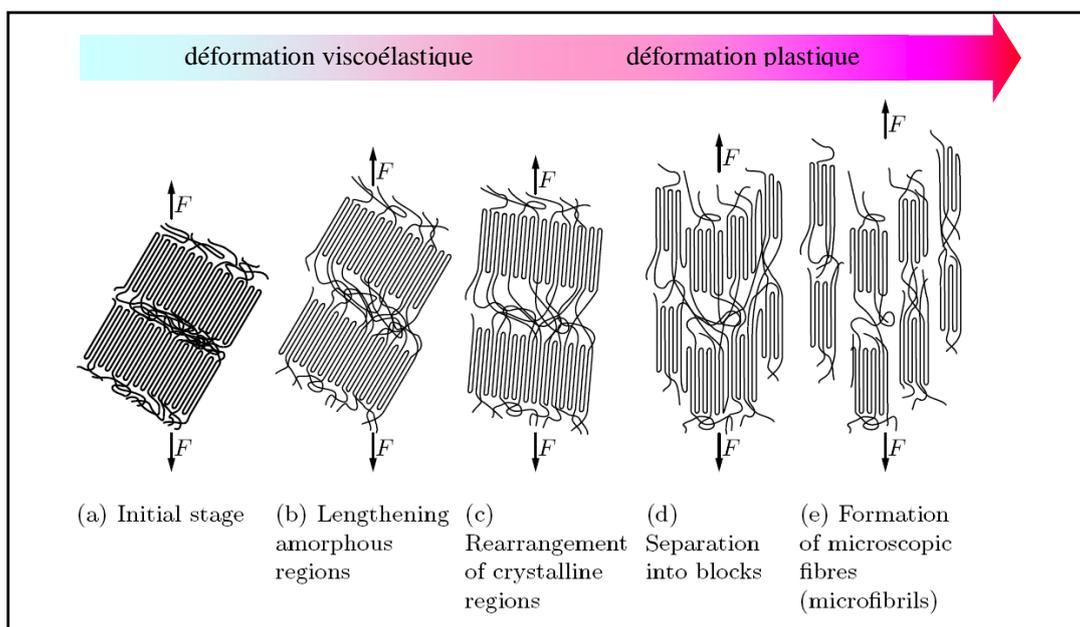


Figure IV-3 : Les phases de déformation d'un thermoplastique semi-cristallin dont $\chi_c > 34\%$ [54].

Nous avons vu dans le chapitre 2 que les déformations engendrées lors du procédé de mise en œuvre seront au maximum de l'ordre de 10 % dans le cas des reports les plus exigeants. Nous restons donc dans le domaine des « petites déformations ». Nous nous attendons alors à déformer la phase amorphe du PET et à ne pas engendrer de nucléation [55], et ce quel que soit le taux de cristallinité du film que nous utiliserons.

1.2. Le choix du Melinex 506 pour le projet optique digitale

Le film PET retenu pour la fabrication du verre digital est fabriqué par *DUPOND TEIJIN FILMS*. Il s'agit du Melinex 506 dans sa version 75 μm d'épaisseur dont les principales caractéristiques sont notées dans le tableau suivant :

Property	m ² /kg Test Method	Unit	Value			
General						
Area Yield	--	--	9.5	7.1	5.7	4.0
Relative Density	ASTM D 1505-79 (modified to Melinex test method)	--			1.4	2.9
Mechanical					MD*	TD**
Tensile strength at break	ASTM D 882-83				17.5	17.5
F5 (force to elongate 5% of gauge length)	ASTM D 882				10	10
Optical						
Haze	ASTM D1003-77 (Measured on Gardner Hazemeter)		0.4	0.5	0.5	0.5
Thermal						
Upper Melt temperature	ASTM E794-85				255 - 260	
Coefficient of thermal expansion		(cm/cm deg C)			19 x 10 ⁻⁶ (MD)	19 x 10 ⁻⁶ (TD)
Shrinkage		%			MD	TD
					1	0.3

Tableau IV-1 : Caractéristiques du Melinex 506 données par le fabricant DUPOND TEIJIN FILMS.

Pour la réalisation de composants optiques flexibles ou rigides tels que des écrans tactiles, souples ou à cristaux liquides, la société *ADHESIVES RESEARCH* propose le film ARclear-8796. Celui-ci se présente sous la forme d'un sandwich constitué du Melinex 506 de 75 µm, d'une colle adhésive sensible à la pression en acrylique de 25 µm et d'un film protecteur. Une des faces de Melinex est traitée pour augmenter son énergie de surface et ainsi améliorer l'adhésion du PSA à sa surface, les caractéristiques mécaniques restant inchangées. Nous comparons dans le tableau suivant les valeurs des propriétés optiques du film ARclear 8796 données par le fabricant et des mesures optiques réalisées sur le film acheté. Ces données sont compatibles avec les standards de qualité d'*ESSILOR* et font de ce film ARclear-8796 un bon candidat pour le projet optique digitale.

	Données commerciales	Mesures fabricant
Visible light Transmission	≥ 95 %	≥ 97 %
Haze	≤ 2 %	≤ 1 %
Clarity	≥ 97 %	≥ 99 %

Tableau IV-2 : Propriétés optiques du film ARclear-8796.

2. Caractérisation du film optique

Les caractérisations que nous allons décrire successivement nous permettront d'appréhender les propriétés optiques et thermomécaniques du film PET ainsi que les caractéristiques de verre hôte nécessaires pour optimiser les paramètres de chauffage et de pression lors du thermoformage.

2.1. L'absorption UV-VISIBLE du Melinex 506 et du Arclear 8796

Le verre pixellisé peut contenir, dans le cas d'une application photochromique par exemple, des molécules sensibles aux UV. Le film de scellement doit donc être transparent à ces longueurs d'ondes pour permettre la réaction photochimique. C'est pourquoi nous avons réalisé la mesure de l'absorption de différents films sur un intervalle spectral allant de l'UV au visible et vérifié leur transparence dans ce domaine. La Figure IV-4 représente le spectre d'absorption du PET Melinex 506 et celui du film ARclear 8796.

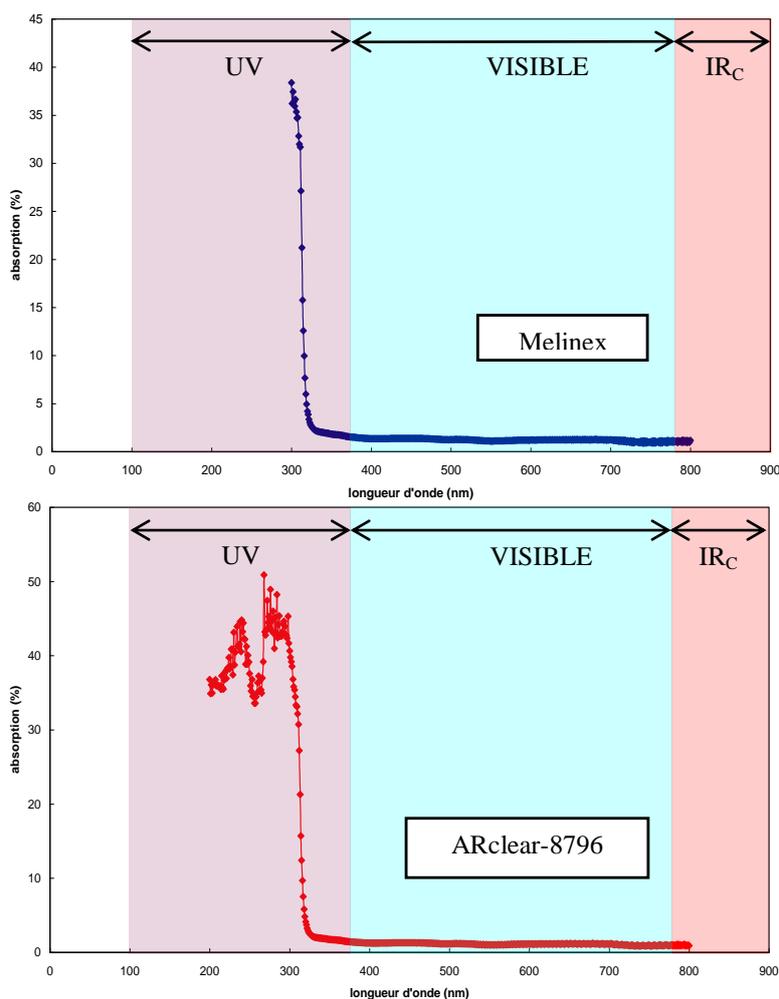


Figure IV-4 : Spectre d'absorption UV-Visible des films Melinex et ARclear.

Ces spectres nous indiquent que :

- l'absorption du film Melinex 506 et du film AR-8796 sont pratiquement identiques. Cela signifie que la couche adhésive PSA qui est adossée au film de PET principal n'a

pas d'incidence sur l'absorption du film de PET dans le domaine spectral d'intérêt ;

- le Melinex est transparent dans le visible à 98% et aux UVA à plus de 95%. Il est donc compatible avec le verre digital photochromique car il laisse passer le spectre UV pour l'application et le spectre visible pour le porteur.

Nous avons également retenu le triacétate de cellulose (TAC) comme candidat pour ses propriétés optiques et en particulier sa transmission dans l'UV-visible. Cependant, ce matériau devient jaune après une exposition prolongée aux UV. Une version plus résistante aux UV, optimisée par ajouts de stabilisants, filtre malheureusement les longueurs d'onde de 320 à 400 nm qui sont indispensables au fonctionnement du verre photochromique. Les spectres d'absorption UV-visible de ces deux films de TAC de 75 μ m d'épaisseur sont reportés sur la figure IV-5. Le TAC ne peut donc pas être retenu comme candidat.

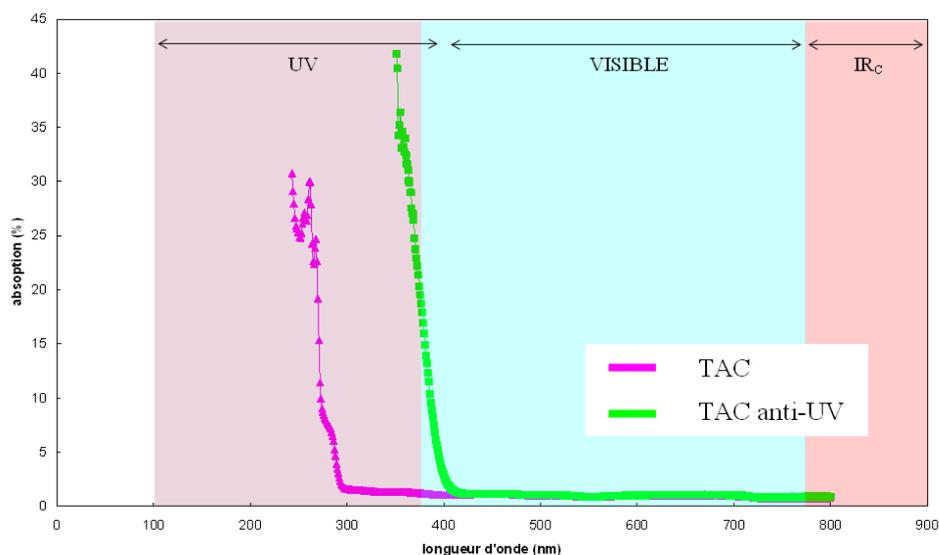


Figure IV-5 : Spectre d'absorption UV-visible de films TAC.

2.2. La diffraction du Melinex 506 aux rayons X

Nous cherchons ici à connaître la nature cristalline du Melinex 506. La chambre de DEBYE-SCHERRER est une technique d'analyse qui est basée sur la diffraction des rayons X de la matière. Le dispositif se compose d'une source monochromatique de rayons X, d'un porte-échantillon et d'un film en forme de bande qui entoure le dispositif. Les rayons X sont diffractés sous la forme de cônes, qui laissent des traces en forme de cercle sur la bande.

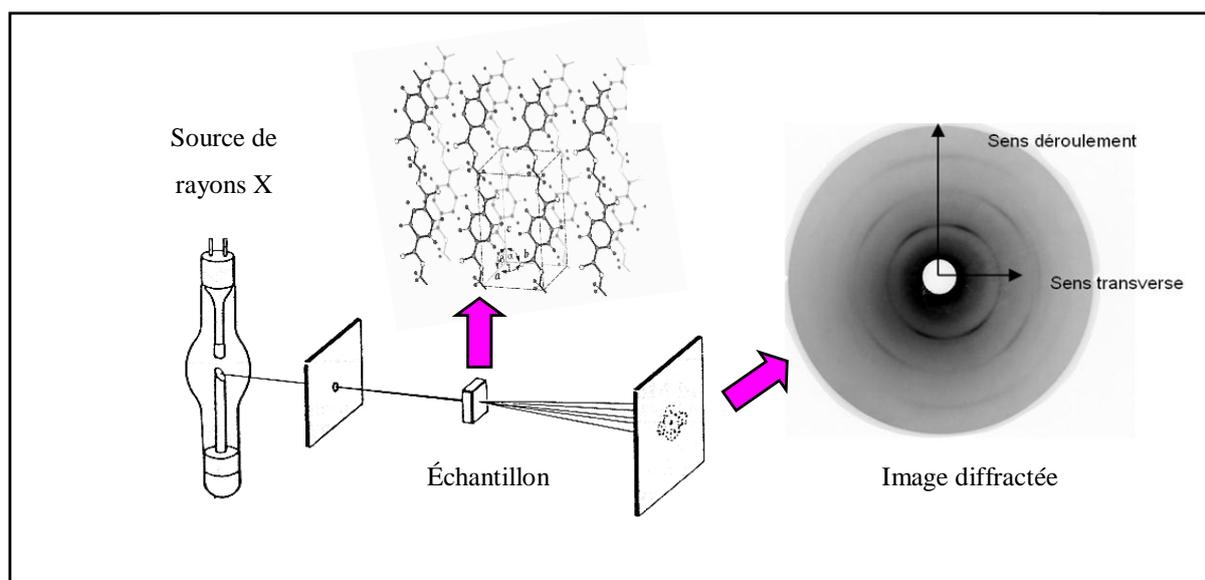


Figure IV-6 : Montage de diffraction des rayons X du PET Melinex 506.

Ce simple dispositif permet de localiser aisément la position des pics (rayon de l'arc de cercle sur la bande), bien que la trace photographique rend peu précise l'estimation de l'intensité (niveau de gris). Elle est toutefois suffisante pour déterminer la nature cristalline de l'échantillon. La Figure IV-7 ci-dessous regroupe les différentes organisations cristallines possibles du PET. La diffraction des Rayons X aux grands angles de notre film PET Melinex 506 nous apprend que le polymère est à l'état semi-cristallin. On observe des réflexions cristallines caractéristiques des plans cristallographiques généralement observés et associés à la maille cristalline du PET, représentée sur le schéma selon DAUBENY et al [56].

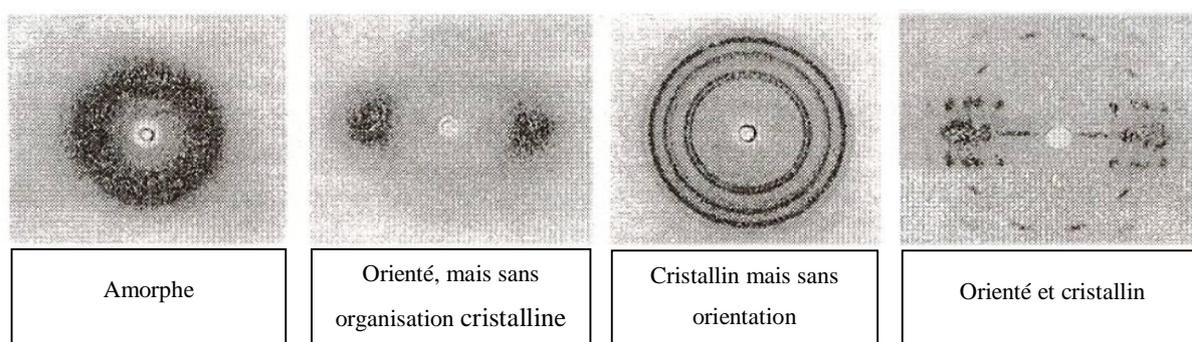


Figure IV-7 : Cliché Debye Scherrer de fibres de PET avec différentes organisations d'après CHAMPETIER [57].

Le cliché de diffraction anisotrope, obtenu en Figure IV-6 démontre la présence d'orientations préférentielles de cette phase cristalline, l'orientation est bidirectionnelle : l'aspect diffus et étalé des tâches obtenues témoigne du caractère bi-étiré de la matière.

2.3. L'analyse enthalpique différentielle – DSC

Pour déterminer la température de transition vitreuse, la température de fusion et le taux de cristallinité du Melinex, nous avons réalisé l'analyse enthalpique différentielle du matériau. L'analyse enthalpique différentielle (AED) ou en anglais *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) est une technique thermo-analytique permettant la mesure du flux de chaleur dans un échantillon par rapport à une référence lors d'une variation continue et imposée de température de l'ensemble. Le flux de chaleur est modifié lors du passage des transitions ou transformations affectant les polymères : transition vitreuse, cristallisation, fusion. Nous avons réalisé l'analyse enthalpique différentielle d'un échantillon de 22,6 g de PET Melinex 506 chauffé de -50 °C à 300 °C , et ce en imposant une montée en température de 10 °C par minute. L'échantillon est refroidi à la température initiale. Le spectre obtenu ci-dessous présente deux phénomènes distincts :

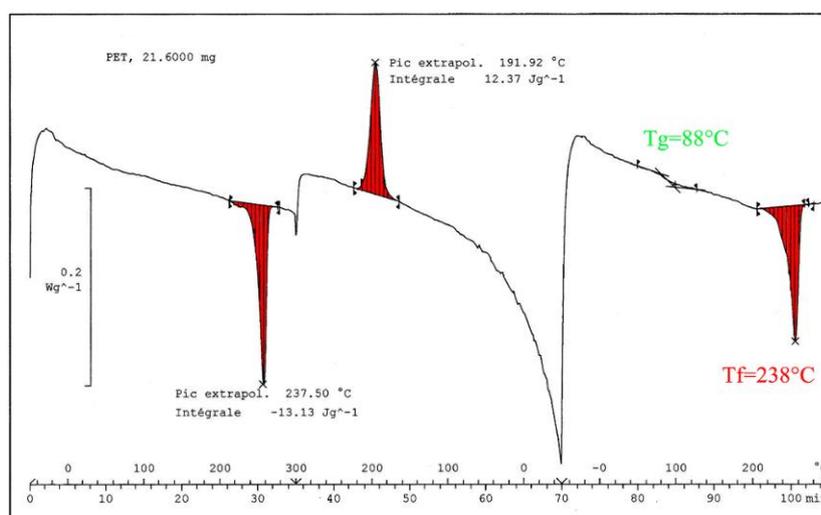


Figure IV-8 : Thermogramme par DSC du Melinex 506.

- un saut de flux à 88 °C caractéristique de la température de transition vitreuse (Tg) du matériau.
- un pic endothermique à température de 238 °C qui témoigne de la fusion (Tf) de la phase cristalline du PET.

En revanche cette analyse enthalpique ne nous a pas permis de remonter au taux de cristallinité du film de PET du fait de l'absence de pic de cristallisation.

2.4. La thermogravimétrie

Lors de la fabrication du film pixellisé, nous ferons subir au substrat des étapes de chauffage pouvant atteindre des températures de l'ordre de 120 à 130 °C. Il importe donc de vérifier que les seuils de température de dégradation des différents constituants sont au-delà de ces températures.

La thermogravimétrie est un moyen largement utilisé pour déterminer la température à laquelle le film peut résister sans subir de dégradation chimique des molécules qui le composent. Cette caractérisation consiste à suivre la perte de masse d'un échantillon lors de son chauffage. Ici, nous avons couvert une gamme de température allant de l'ambiante jusqu'à 950 °C et nous pouvons vérifier sur la Figure IV-9 que le PET peut être chauffé sans dégradation jusqu'à 300 °C : La perte de masse de 0,4 % de l'échantillon sur la plage 20 °C – 300 °C correspond à une déshydratation ainsi qu'à l'évaporation de solvants résiduels.

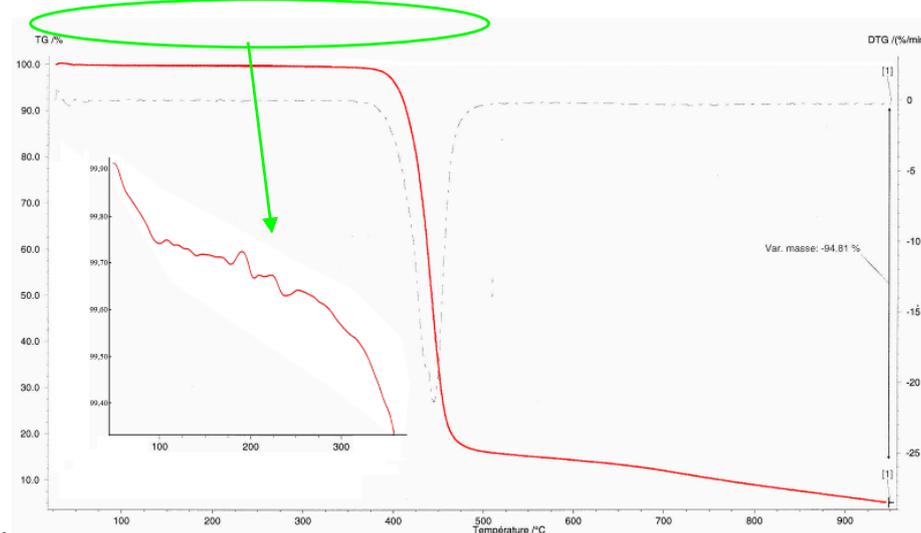


Figure IV-9 : Evolutions thermique de la masse d'un échantillon de Melinex 506 et dérivée de la masse à une vitesse de chauffe de 10°C/min.

Nous noterons dans la suite de l'étude qu'il ne sera pas nécessaire de caractériser le PET à des températures supérieures à 300°C.

2.5. La caractérisation thermomécanique du film de PET

Il est apparu clairement que, lors du report du film pixellisé par thermoformage sur les lentilles ophtalmiques, les déformations de ce film ne devraient pas dépasser les 10 % ce qui restreint le besoin de caractérisation au domaine des « petites déformations ». La littérature nous a rapidement indiqué que dans ces conditions nous resterions très vraisemblablement, au cours de nos processus de mise en forme, dans le régime de déformation viscoélastique pour lequel seule la phase amorphe du PET est modifiée, et ce, quel que soit le taux de cristallinité du film que nous utiliserons.

Rappelons ici succinctement quelques principes sur les régimes de déformation liés aux mécanismes de viscoélasticité. Ils peuvent être décrits par différents modèles couplant un ou plusieurs éléments présentant une réponse élastique idéale à l'application d'une contrainte - les ressorts qui sont régis strictement par la loi de HOOKE - et un ou plusieurs éléments présentant une réponse idéale à l'application d'une contrainte - les pistons régis par la loi de NEWTON. Ainsi, selon le type de comportement que l'on veut décrire, nous pouvons décliner les différents modèles bien connus, et représentés schématiquement sur la Figure IV-10, comme suit :

- le modèle de MAXWELL (Figure IV-10-a) associe en série un ressort et un piston pour représenter le comportement de relaxation ; l'expérience de relaxation consiste à appliquer une déformation constante au matériau et à suivre l'évolution de la contrainte en fonction du temps ;
- le modèle de VOIGT-KELVIN (Figure IV-10-b) assemble le ressort et le piston en parallèle pour décrire le comportement de fluage ; pour l'expérience de fluage c'est la contrainte constante qui est appliquée au matériau et il s'agit de suivre l'évolution de la déformation en fonction du temps ;
- les modèles généralisés de MAXWELL-WIECHERT (Figure IV-10-c) associant en parallèle N modèles de MAXWELL élémentaires, ou de BURGER (Figure IV-10-d) combinant lui les schémas de VOIGT-KELVIN et de MAXWELL ; ces deux derniers modèles sont quant à eux évidemment susceptibles de décrire des comportements à la fois plus complexes et plus réalistes. Avec ces modèles, lorsqu'une charge sera appliquée, la déformation qui en résultera combinera, par exemple (voir Figure IV-10-e), une réponse élastique instantanée, suivie d'une réponse retardée avec un

mécanisme de fluage ; lorsque l'on annulera la charge, on pourra observer un recouvrement instantané, suivi d'une relaxation incomplète laissant apparaître une déformation résiduelle permanente correspondant à une réponse d'écoulement. Ce sont ces deux derniers types de modèles plus fins qui sont le plus souvent capables de décrire les comportements rhéologiques des matériaux à base de polymères.

La méthode de caractérisation de ce régime de viscoélasticité maintenant bien connue et qui s'impose, dès lors que l'on veut optimiser un processus de thermoformage, est la technique d'analyse thermomécanique dynamique. Nous avons choisi de caractériser par cette méthode les propriétés rhéologiques du film PET « Melinex 506 » et du verre « Styliis 1.67 » qui constituent les éléments essentiels de notre hétéro-assemblage au plan de la rigidité.

Les analyses thermomécaniques que nous présentons dans les paragraphes suivants ont été effectuées par Noëlle BILLON et Christelle COMBEAUD au sein du *CEMEF (Centre de Mise en Forme des Matériaux)* de l'école des mines de Paris.

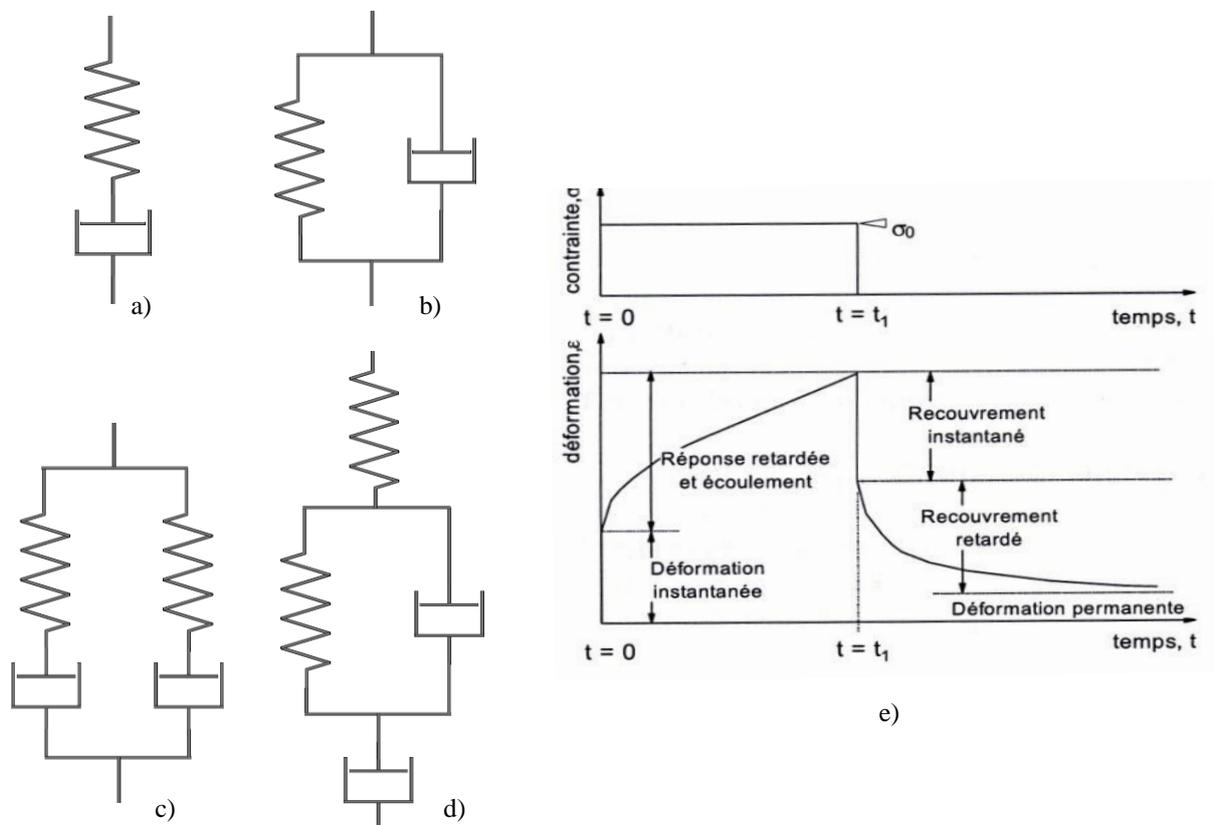


Figure IV-10 : a) Modèle de MAXWELL ; b) Modèle de VOIGT-KELVIN ; c) Modèles généralisé de MAXWELL-WIECHERT ; d) Modèle de BURGER ; e) Allure générale typique d'une réponse à un chargement en contrainte.

2.5.1. Présentation de l'Analyse Thermomécanique Dynamique

La plus grande partie de la caractérisation est consacrée à l'analyse dynamique mécanique en traction du film de Melinex 506 grâce à laquelle nous serons en mesure de proposer une loi de comportement aux simulations numériques du procédé de mise en œuvre par thermoformage. Les polymères thermoplastiques et les élastomères présentent des modules d'élasticité et des facteurs de pertes qui varient fortement avec la température et la fréquence de sollicitation. Ces propriétés dynamiques dépendent de leur composition et de leurs procédés de fabrication. La technique DMTA, du terme anglais *Dynamic Mechanical Thermal Analysis*, permet de mesurer finement la réponse d'un échantillon à des sollicitations mécaniques. Elle est tout particulièrement adaptée pour la caractérisation du régime de comportement viscoélastique linéaire pour lequel les paramètres physiques pertinents associés ne sont pas fonction de l'amplitude de la déformation et où par ailleurs ces déformations restent faibles. Cette technique permet de déterminer en particulier :

- les modules élastique G' et anélastique G'' en fonction de la température et de la fréquence d'excitation,
- Le facteur d'amortissement $\tan \delta$, souvent appelé facteur de perte, en fonction de la température et de la fréquence imposées,
- la température de transition vitreuse Tg qui dépend de la fréquence.

L'essai consiste à imposer au matériau une déformation sinusoïdale, de fréquence et d'amplitude contrôlées. Afin de rester dans le domaine linéaire du matériau, on applique de très faibles déformations à l'échantillon (moins de 0.1 %). On recueille une estimation du déphasage qui existe entre la déformation imposée et la force que l'on mesure entre les mors. On impose à l'échantillon une déformation sinusoïdale $\gamma = \gamma_0 \sin(\omega t)$ de pulsation $\omega = 2\pi f$ et l'on mesure en même temps des contraintes correspondantes.

Pour un solide hookien (purement élastique) la contrainte est donnée par la relation :

$$\tau = G\gamma \quad (\text{éq. IV-1}) \qquad \text{d'où} \quad \tau = G\gamma_0 \sin(\omega t) \quad (\text{éq. IV-2})$$

→ Cette contrainte est en phase avec la déformation.

Pour un liquide newtonien (purement visqueux), la contrainte s'écrit maintenant :

$$\tau = \eta \frac{d\gamma}{dt} \quad (\text{éq. IV-3}) \quad \text{d'où} \quad \tau = \eta\gamma_0\omega \cos(\omega t) \quad (\text{éq. IV-4})$$

→ Dans ce cas la contrainte est en opposition de phase avec la déformation.

Les corps viscoélastiques ont un comportement intermédiaire entre les deux précédents et sont soumis à une contrainte qui est décrite par la relation :

$$\tau = \tau_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (\text{éq. IV-5})$$

dans laquelle δ est l'angle de déphasage, également appelé angle de perte. En développant l'expression précédente, la contrainte s'exprime sous la forme de deux composantes : la première est en phase avec la déformation, la seconde en opposition de phase :

$$\tau = \gamma_0 G' \sin(\omega t) + \gamma_0 G'' \cos(\omega t) \quad (\text{éq. IV-6}) \quad \text{avec} \quad \begin{cases} G' = (\tau_0 / \varepsilon_0) \cos \delta \\ G'' = (\tau_0 / \varepsilon_0) \sin \delta \end{cases}$$

Cette écriture suggère une représentation dans le plan complexe comme indiqué sur la Figure IV-11-b

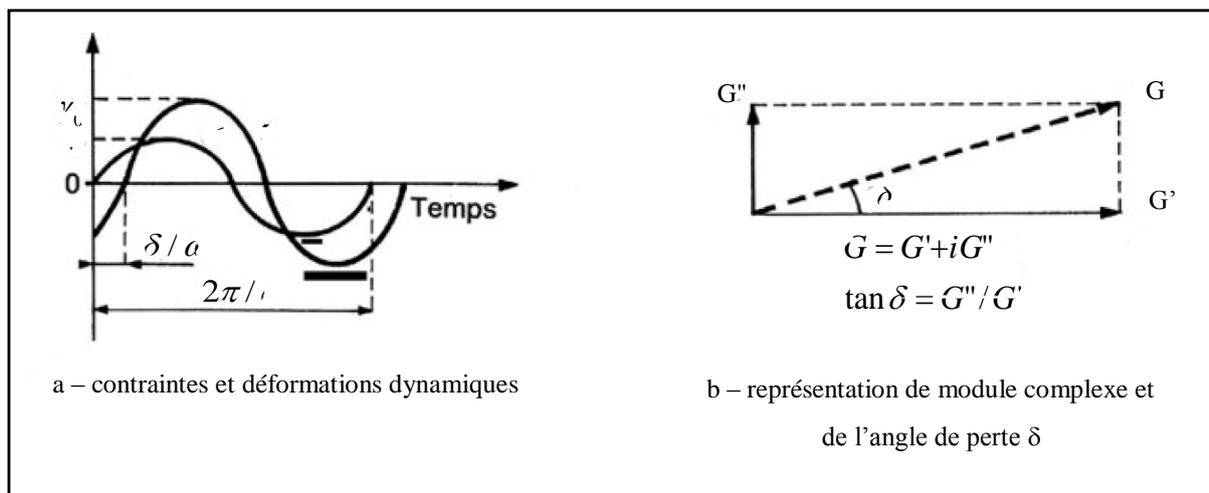


Figure IV-11 : Comportement d'un corps viscoélastique.

En écrivant :

$$\begin{cases} \gamma = \gamma_0 \exp(i\omega t) \\ \tau = \tau_0 \exp[i(\omega t + \delta)] \end{cases}$$

On obtient alors l'expression du module complexe en traction

$$G = \tau / \gamma = (\tau_0 / \gamma_0) \exp(i\delta) = (\tau_0 / \gamma_0)(\cos \delta + i \sin \delta) \quad (\text{éq. IV-7})$$

$$\text{soit} \quad G = G' + iG'' \quad (\text{éq. IV-8})$$

dans laquelle le module G est donné par $|G| = \sqrt{G'^2 + G''^2}$ (éq. IV-9)

G' , partie réelle du module complexe, en phase avec les parties réelles de τ et de γ , est souvent appelé module de conservation en traction car il correspond à l'énergie conservée et récupérée pendant le cycle de chargement.

G'' , partie imaginaire du module complexe, en opposition de phase avec les parties réelles de τ et de γ , est associé au caractère visqueux et à l'énergie dissipée ; on l'appelle module de perte ou de dissipation en traction.

Enfin, le rapport des deux modules élastiques G' et anélastiques G'' est égal à la tangente de l'angle de perte δ .

2.5.2. Comportement du film de PET sur une large gamme de température

L'analyse thermomécanique dynamique suivante a été réalisée à partir d'un échantillon du film de PET Melinex 506, prélevé dans le sens de déroulement du rouleau, soumis à des sollicitations mécaniques - oscillatoires d'une amplitude de 5 μm et d'une fréquence de 1 Hz - et thermiques - avec une température imposée allant de l'ambiante jusqu'à 250 °C avec une montée de 1 °C/min - .

Le résultat de l'analyse, donné sur la Figure IV-12 comporte 3 courbes qui correspondent au module élastique G' , au module anélastique G'' et à $\tan \delta$. – le rapport de G'' et G' - .

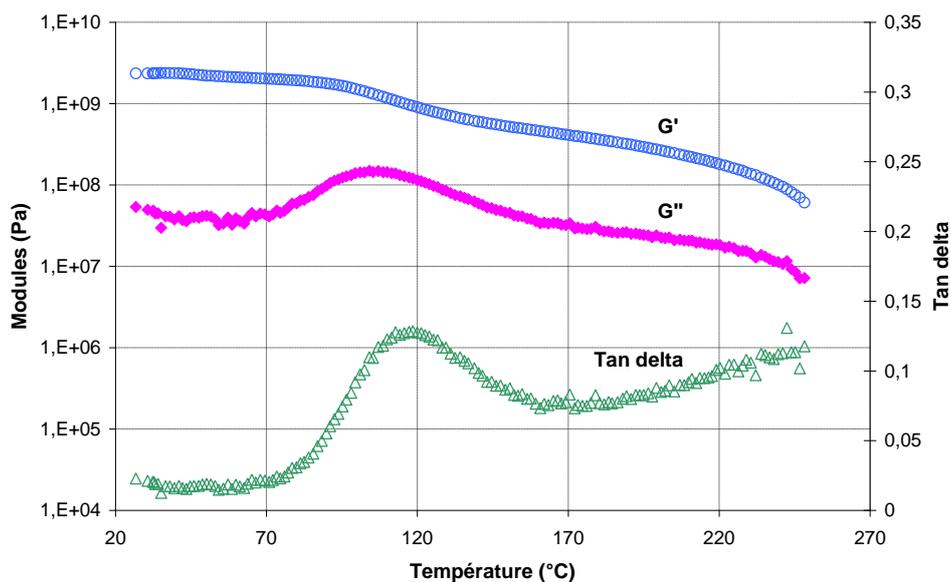


Figure IV-12 : Analyse dynamique mécanique en traction du PET Melinex 506.

Le pic bien visible à 119 °C sur la courbe $\tan \alpha$ correspond à la température de transition α . À partir de cette température, le module élastique G' entame une décroissance progressive. En dessous de cette température le matériau présente un comportement vitreux. La courbe G' comparée aux courbes de la Figure IV-13 – qui présente les courbes caractéristiques du module d'élasticité pour différentes familles de polymères – est représentative d'un PET semi-cristallin. En effet, il n'existe pas de plage caoutchoutique utile au thermoformage que l'on rencontre avec les thermoplastiques amorphes.

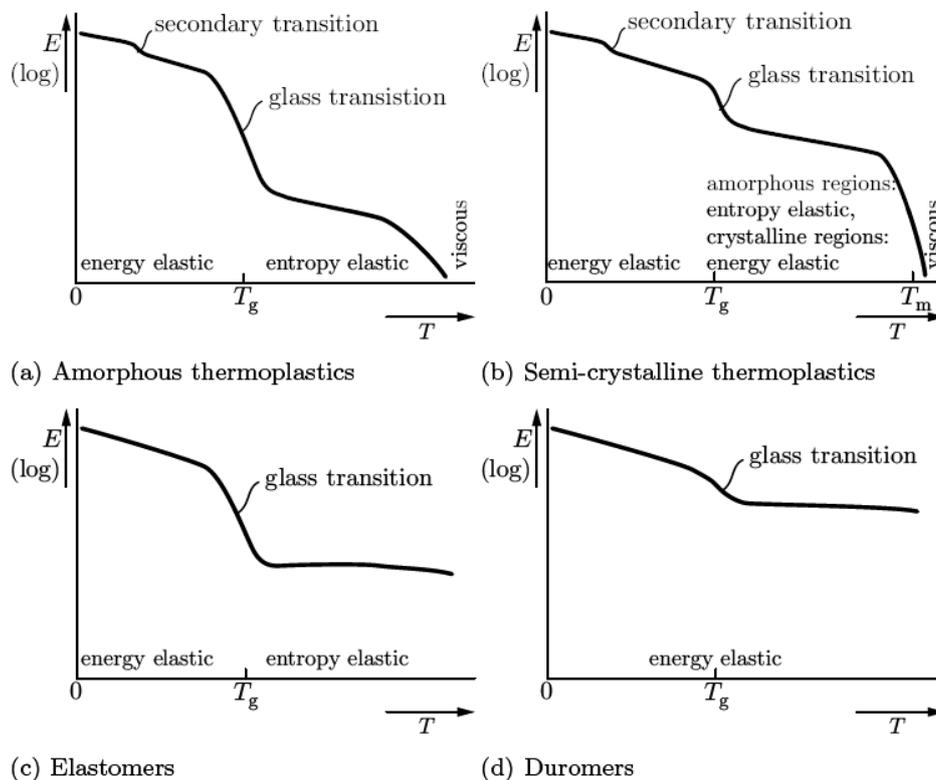


Figure IV-13 : Module d'élasticité en fonction de la température pour différents polymères [58]

Pour des températures supérieures à 220 °C, le matériau adopte un comportement plus caractéristique de l'état fondu. L'essai est interrompu à la température de 250 °C.

2.5.3. Influence du bi-étirage du film de PET sur son comportement

Cette étude nous intéresse dans le sens où le film de PET Melinex 506 comporte une étape d'amincissement par bi-étirage lors de sa fabrication : ce procédé de mise en œuvre est complexe et peut engendrer des variations du comportement mécanique du film selon ses axes d'étirages. L'analyse a été effectuée à partir d'un échantillon prélevé dans le sens de déroulement du rouleau et un autre dans le sens transversal. Les paramètres de sollicitations mécaniques imposés aux échantillons sont de 5 μm à 1 Hz de la température ambiante et jusqu'à 250 °C avec une montée de 1 °C/min.

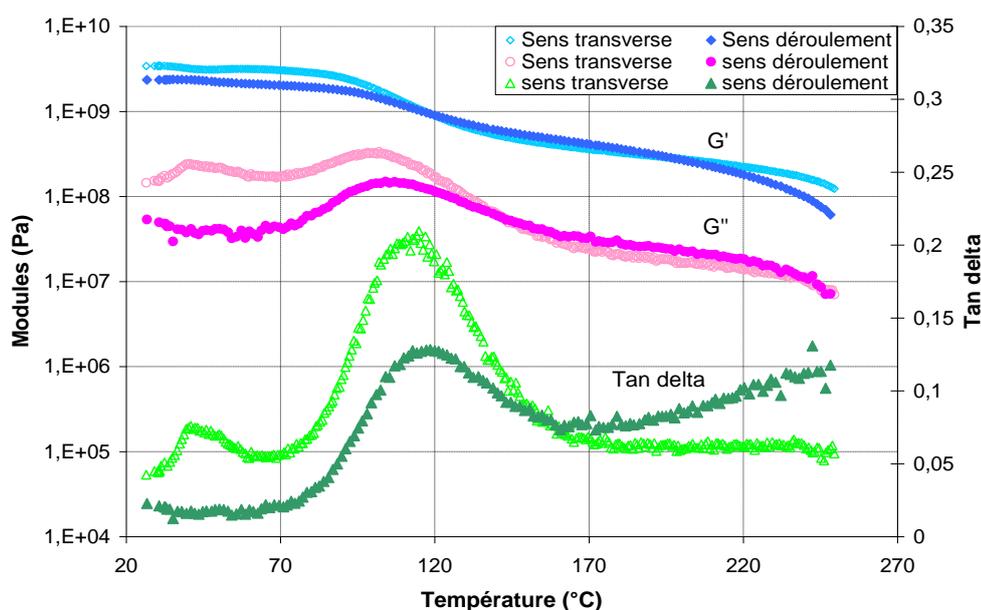


Figure IV–14 : Comparaison d'échantillons prélevés dans le sens de déroulement du film et perpendiculairement (sens transverse).

La Figure IV–14 montre qu'avant la transition α que les modules élastique et anélastique du film ne sont pas identiques. À ces températures, le film apparaît plus rigide dans le sens transverse que dans le sens de déroulement du rouleau : le film présente donc une légère anisotropie mécanique. Au-delà de cette transition, les modules sont très comparables.

Cela suppose qu'au cours du procédé de thermoformage du film sur la lentille il est préférable de chauffer le film à une température supérieure à 120 °C car le film possède la même formabilité dans ses deux directions à partir de cette température. Le film pixellisé comportant deux films de PET, il est possible de réaliser l'assemblage en les superposant avec un angle de 90 ° : l'assemblage est ainsi assimilable à un film isotrope mécaniquement et autorise alors à travailler sous la température alpha et à espérer une déformation homogène.

2.5.4. Influence des recuits sur le comportement du film de PET

Le film de PET passe par des étapes de recuit, qui peuvent être assez longues, lors de la fabrication du film pixellisé. Une analyse a été réalisée sur un film ayant subi un recuit de trois heures à 100 °C. Les paramètres de sollicitations mécaniques imposées aux échantillons sont une nouvelle fois de 5 μm à 1 Hz de la température ambiante et jusqu'à 250 °C avec une montée de 1 °C/min. Les résultats sont comparés à un film non recuit sur la Figure IV-15 :

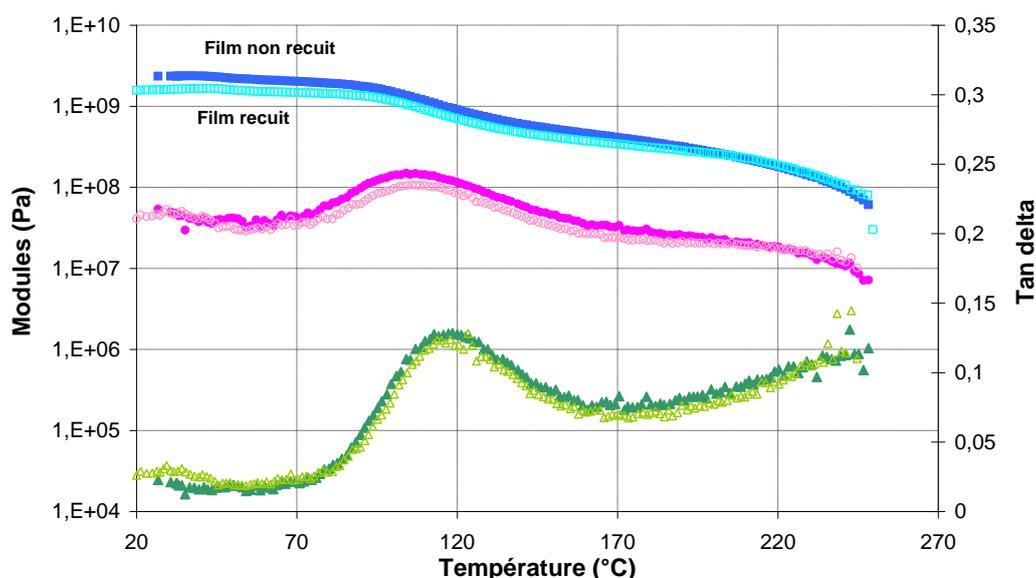


Figure IV-15 : Effet d'un recuit du film, pendant 3 heures à 100 °C.

Aux incertitudes près des mesures, l'analyse thermomécanique dynamique du film de PET Melinex 506 recuit à 100 °C pendant 3 heures ne montre pas de différence avec le film d'origine. L'étape de recuit ne semble donc pas modifier les propriétés rhéologiques de la matière et ne risque pas d'altérer les propriétés mécaniques du film.

2.5.5. Comportement du film de PET sur une large gamme de fréquence

Cette analyse a pour but d'observer l'influence de la fréquence des oscillations imposées sur la réponse mécanique du film de PET. Les échantillons du film, prélevés dans le sens de déroulement, sont soumis des sollicitations d'une amplitude fixe de 5 μm à différentes fréquences d'oscillation de 0,3 Hz, 1 Hz, 3 Hz et 10 Hz

On constate, à la lecture de la Figure IV-16, une dépendance de la température de transition α à la fréquence de sollicitations imposée : l'augmentation de la fréquence de sollicitations met en évidence le déplacement de la température de transition α vers les températures croissantes et à la lecture du schéma, multiplier la fréquence par un facteur dix revient à une augmentation de la température de transition de 4 à 8 °C. De même une sollicitation du matériau à plus haute fréquence, pour une température donnée, revient à décaler le module élastique vers des valeurs légèrement plus élevées.

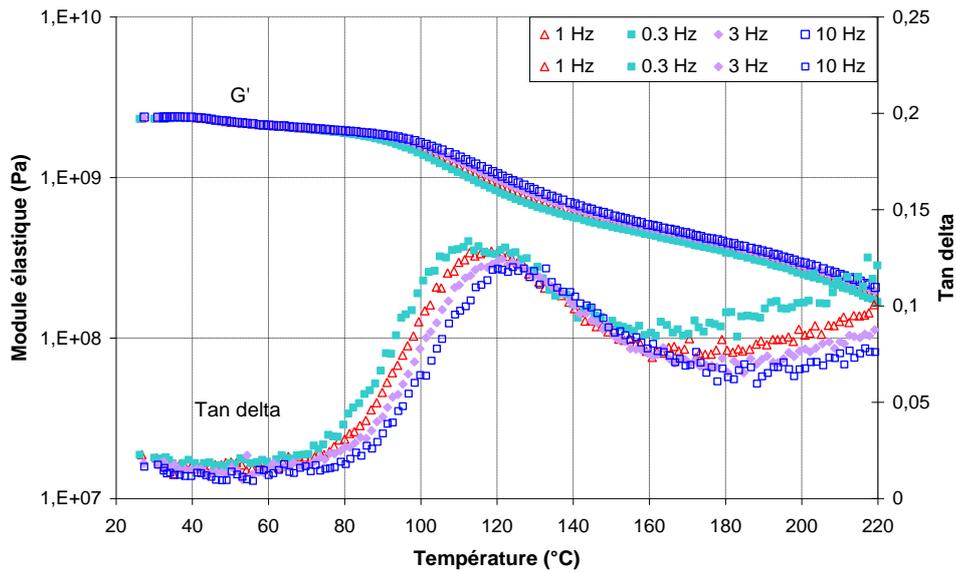


Figure IV-16 : Module élastique et angle de perte d'échantillons de film de PET soumis à des sollicitation de 5 μm à des fréquences de 0.3, 1, 3 et 10 Hz.

Pour les mesures conduites entre 120 et 200 °C propres au plateau caoutchoutique du matériau, on observe une dépendance du module élastique à la fréquence assez peu marquée. Pour avoir une meilleure vision du comportement du substrat aux fréquences de sollicitation sur une large gamme de températures. Le module élastique du film a été cette fois ci analysé à différentes températures en faisant varier la fréquence des oscillations de 0,1 à 100 Hz. Les résultats sont donnés en Figure IV-17 :

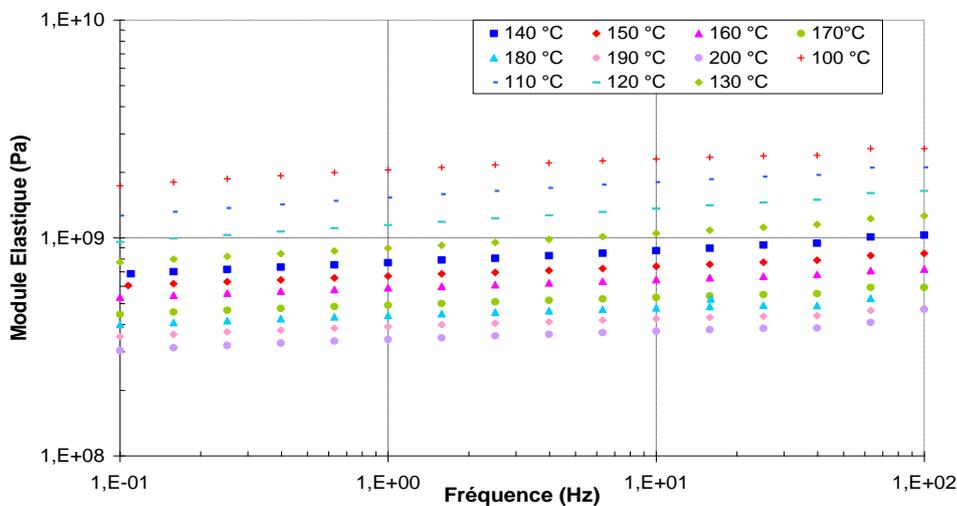


Figure IV-17 : Mesures du module élastique en fonction de la fréquence de sollicitation pour différentes températures comprises entre 100 et 200 °C.

2.5.6. Principe d'équivalence « temps-température »

L'analyse que nous venons de présenter dans le paragraphe précédent des comportements du substrat en fonction de la fréquence de sollicitation et ce, pour différentes températures, nous suggère d'examiner si le principe d'équivalence « temps-température » est envisageable. Ce principe d'équivalence doit se traduire par la possibilité de recouvrement partiel et/ou de continuité entre les courbes relevées à différentes températures T et une courbe choisie comme référence relevée à la température de référence $T_{réf}$ par une simple translation en fréquence d'un facteur $\text{Log}(a_T / a_{T_{réf}})$. En d'autres termes, il s'agit d'opérer un changement de temps - ou de fréquence - pour chaque température considérée ; cette procédure de superposition conduit à l'obtention d'une courbe unique à la température de référence appelée courbe maîtresse. Ainsi, il est permis de décrire les caractéristiques viscoélastiques du polymère sur une gamme de fréquences - ou donc du temps - considérablement élargie par rapport aux possibilités offertes par les méthodes conventionnelles de caractérisation rhéologique.

La Figure IV-18 reproduit la courbe maîtresse que nous sommes en mesure de construire en choisissant 160 °C comme température de référence par exemple, et la Figure IV-19 illustre l'évolution logarithmique correspondante au coefficient de glissement a_T qui a dû être mis en œuvre.

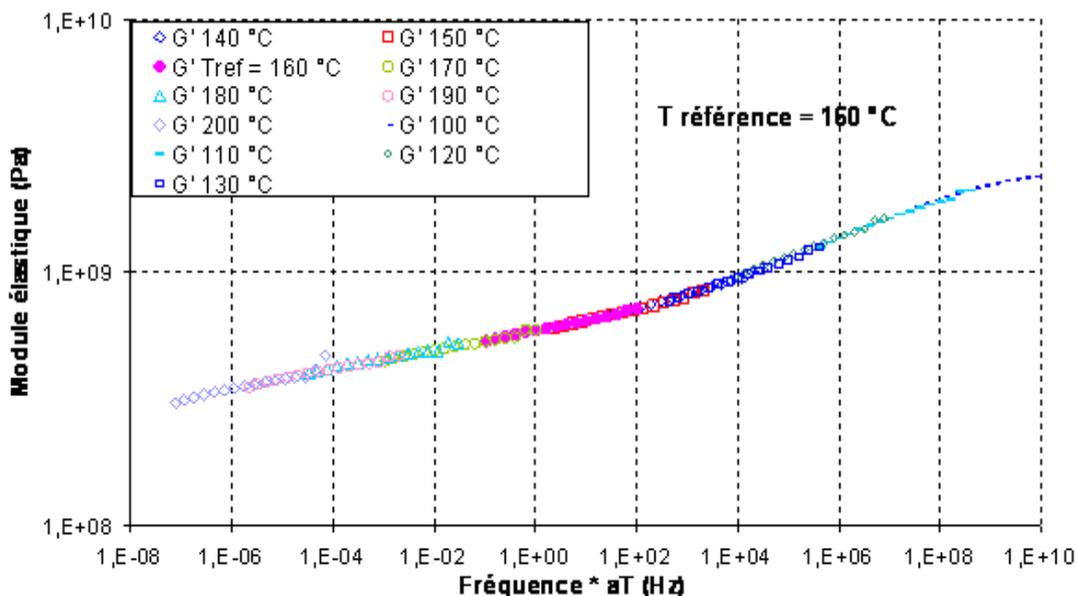


Figure IV-18 : Courbe maîtresse du module élastique en fonction de la fréquence de sollicitation obtenue en choisissant 160 °C comme température de référence

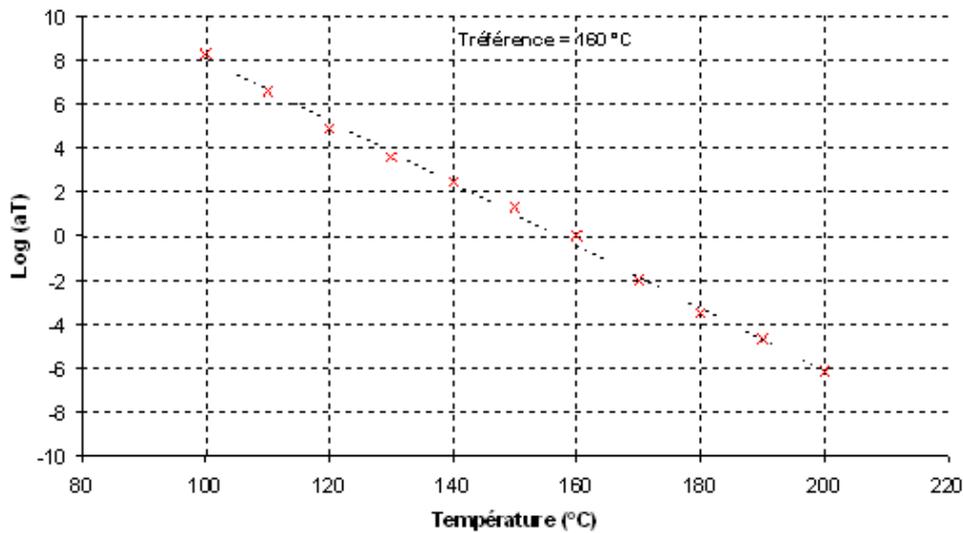


Figure IV-19 : Évolution du coefficient de glissement a_T mis en œuvre.

Nous avons vérifié que le principe d'équivalence temps-température obéissait à une loi empirique de type Arrhenius. On observe que, pour une gamme de fréquences pourtant large – de 0.1 à 100 Hz que l'on peut assimiler à une vitesse de déformation en s^{-1} –, le module élastique évolue relativement peu. En outre, les déformations et les vitesses de déformation impliquées au cours des procédés sont faibles et restreintes à un domaine donné, à savoir un faible taux en terme de déformation et de l'ordre de quelques dixièmes de s^{-1} à quelques s^{-1} au maximum pour la vitesse.

Dans ce travail de mise au point et d'optimisation des procédés technologiques de thermoformage et de report, le paramètre variable de contrôle sera plutôt la température que la vitesse. Toutefois, quel que soit le couple température-vitesse considéré au cours du procédé, nous sommes désormais en mesure de décrire le comportement du polymère PET qui constituera le support principal du film optique pixellisé.

Le modèle comportemental généralement utilisé pour décrire le régime de viscoélasticité linéaire spécifique de beaucoup de polymères est celui de WILLIAMS, LANDEL et FERRY qui ont suggéré, pour le calcul du coefficient de glissement $a_T/a_{T_{réf}}$, une loi qui s'écrit sous la forme :

$$\log(a_T / a_{T_{réf}}) = -\frac{C_1(T - T_{réf})}{(C_2 + T - T_{réf})} \quad (\text{éq. IV-10})$$

Le paramètre $T_{réf}$ est la température de référence, C_1 et C_2 sont des constantes qui dépendent de la nature du polymère et de la température de référence. Il a été montré que lorsque le choix de la température de référence est celui de la température de transition vitreuse T_g , ces coefficients C_1 et C_2 varient peu avec la nature du polymère et prennent les valeurs considérées comme « universelles » :

$$C_1 = 17,44 \quad \text{et} \quad C_2 = 51,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Toutefois, ce modèle ne vaut que pour une plage restreinte de la température au-dessus de la température de transition vitreuse et dans le cas où cette transition est la conséquence d'un seul processus avec donc une constante de temps caractéristique unique. Or, le comportement viscoélastique des polymères est généralement régi par plusieurs mécanismes physiques dont les temps caractéristiques associés évoluent avec la température selon des lois différentes. Dans ces conditions, la distribution des effets induits fait que le principe d'équivalence « temps-température » n'est plus rigoureusement applicable. Dès lors, dans ce contexte, le modèle WLF n'équivaut qu'à une approximation et n'est utilisable que dans un domaine très réduit de températures. Le caractère d'universalité des valeurs de C_1 et de C_2 est bien sûr remis en cause. Un travail de synthèse mené par D.J. PLAZEK et al [59] sur la détermination de C_1 et C_2 dans la zone de transition vitreuse, pour une large gamme de polymères, montre que C_1 varie entre 15 et 26, et que la valeur de C_2 est comprise entre 20 et 130 $^\circ\text{C}$. Nous avons rapporté dans le Tableau IV-3 la synthèse d'une étude bibliographique portant précisément sur les valeurs des coefficients de la loi dite WLF pour le PET.

Référence	Matériau	$T_{réf}$ ($^\circ\text{C}$)	C_1	C_2 ($^\circ\text{C}$)	g_i	τ_i (s)
PICART [60]	PET semi-cristallin	85	6,543 10,061	37,831 46,725		
DELOYE [61]	PET semi-cristallin	77	10	61		
BLUNDELL et al [62]		84,2	8,4	42,4		
CHEVALIER et al [63]	PETamorphe	90	- 1,62	- 26,8		
ALVES et al [64]	PET semi-cristallin	T_g^*	17,44 $15 < C_1 < 26$	51,6 $20 < C_2 < 130$		
MANO et al [65]	PET	75	16,7	28		

HARIDAS et al [66]	PET	80	5	85	0,75	2
PLAZEK et al [58]	PET amorphe	79,7 73,5	9,04 17,7	25,5 42,63		
CRUZ et al [67]	PET amorphe	70	8,89	9,53		
HANKS et al [33]	PET semi-cristallin	T_g^*	17,44	51,6	0,0402 0,0468 0,0572 0,1805 0,0487 0,0988 0,0205 0,1394 0,1283 0,0470 0,1005	1.10^{-5} 1.10^{-4} 1.10^{-3} 1.10^{-2} 1.10^{-1} 1.10^0 1.10^1 1.10^2 1.10^4 1.10^5 1.10^6
ERNER [41]	PS	100	11,8	72		
Ce travail	«Melinex 506» PET semi-cristallin	100	20,2	120,96	0,09 0,13 0,15 0,095 0,06 0,1	0,011 0,08 0,7 10 100 2000

Tableau IV-3 : Étude bibliographique du modèle comportemental WLF pour le PET dans différentes structures. Les valeurs extraites à partir de la caractérisation DMTA du PET Melinex 506 ainsi que dans certains cas les valeurs des constantes de temps τ_i et des modules d'élasticité g_i du modèle dynamique sont aussi rapportées.

En ce qui concerne la caractérisation WLF de notre PET Melinex 506, nous nous sommes bornés à la plage de température de 100 °C - 160 °C, utile pour l'optimisation de nos procédés de thermoformage. En choisissant pour température de référence la température la plus basse de nos relevés DMTA présentés et discutés précédemment - 100 °C - (température la plus proche de la température de transition vitreuse qui est préconisée), nous obtenons les valeurs 20,2 et 120,96 °C pour C_1 et C_2 respectivement. Ces valeurs que nous avons extraites ici à partir de notre caractérisation restent donc compatibles avec les plages définies par D.J. PLAZEK et al [59] et mentionnées précédemment. La Figure IV-20 compare la forme d'évolution de $\text{Log}(a_T / a_{T_{\text{réf}}})$ ainsi extraite aux lois que nous avons pu relever dans la

littérature. Cette confrontation semble indiquer que notre matériau Melinex 506 se range parmi ceux dont les comportements sont les moins sensibles à la température puisque la valeur de son coefficient de glissement a_T présente, tout au moins dans la gamme 100 °C – 150 °C, une diminution modérée.

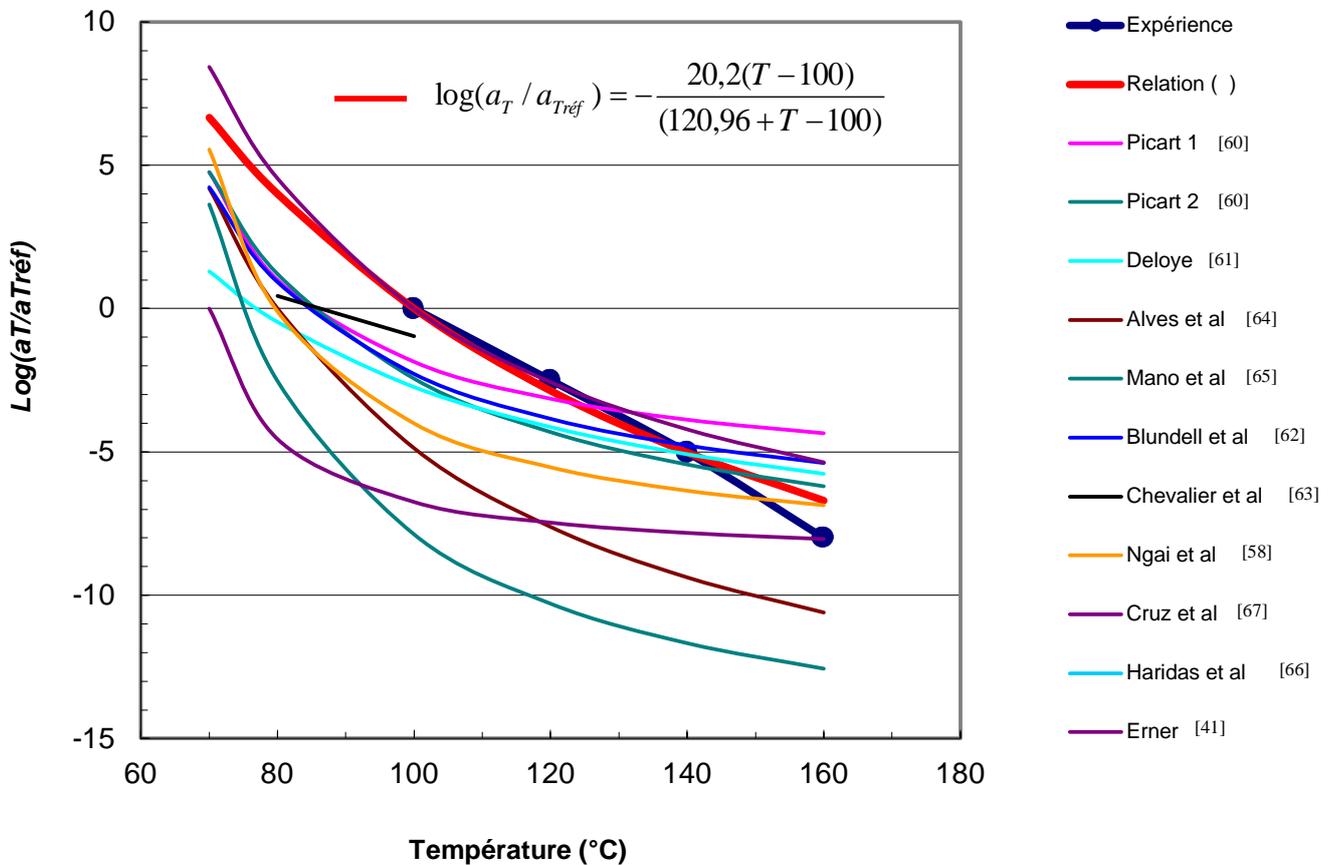


Figure IV-20 : Évolution de $\log(a_T/a_{T_{\text{réf}}})$ avec la température en considérant une température de référence de 100 °C et confrontation avec quelques lois de comportements relevées dans la littérature.

Pour compléter cette modélisation comportementale du régime viscoélastique du PET, il convient d'extraire du relevé de la variation du module de conservation G' en fonction de la fréquence, la ou les constantes de temps τ_i et les composantes du module g_i associées qui sont caractéristiques du modèle de MAXWELL généralisé multi modes mentionné en introduction du paragraphe 2.5 de ce chapitre

$$G'(\omega) = G_0 \left[1 - \sum_{i=1}^N g_i \right] + G_0 \sum_{i=1}^N \frac{g_i \tau_i^2 \omega^2}{1 + \tau_i^2 \omega^2} \quad (\text{éq. IV-11})$$

$$G''(\omega) = G_0 \sum_{i=1}^N \frac{g_i \tau_i \omega}{1 + \tau_i^2 \omega^2} \quad (\text{éq. IV-12})$$

La confrontation « expérience - modèle » de la Figure IV-21 des évolutions du module élastique en fonction de la fréquence dans le domaine utile montre que la limitation aux six couples de valeurs reportés dans le Tableau IV-3 et pour lesquels τ_i varie de 11 ms à 2000 s est satisfaisante.

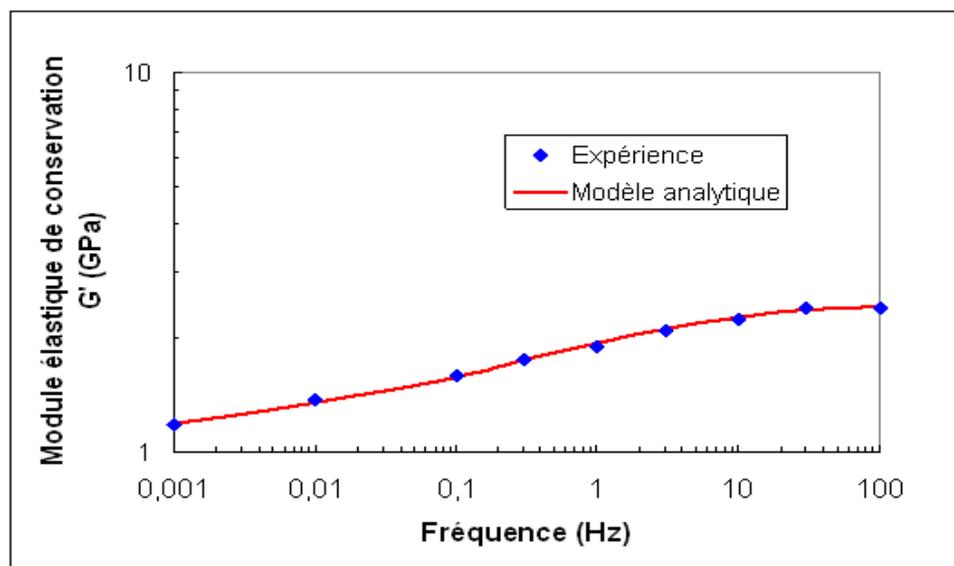


Figure IV-21 : Évolutions expérimentale et analytique du module élastique de conservation G' en fonction de la fréquence.

3. Caractérisation comparée de la lentille "Stylis 1.67"

Compte tenu du fait que notre objectif est de réaliser un hétéro-assemblage « film-verre », il convenait, pour tenter d'optimiser cette phase, de connaître également les caractéristiques thermomécaniques du second matériau retenu pour le substrat d'accueil, à savoir le verre Stylis à indice 1,67, à l'époque de ce projet.

La Figure IV-22 présente la comparaison de la caractérisation DMTA de ce matériau, également réalisée aussi par le *CEMEF*, à celle du PET Melinex 506. On observe qu'à l'état vitreux, aux basses températures, les deux matériaux présentent une rigidité comparable. La transition α à 1 Hz du verre a lieu maintenant à 94 °C et cette transition est particulièrement plus sensible: aux alentours de la transition, il existe une composante visqueuse qui reste

d'une contribution importante et comparable à celle du module élastique, au-delà de cette transition, on observe une chute de deux décades du module élastique.

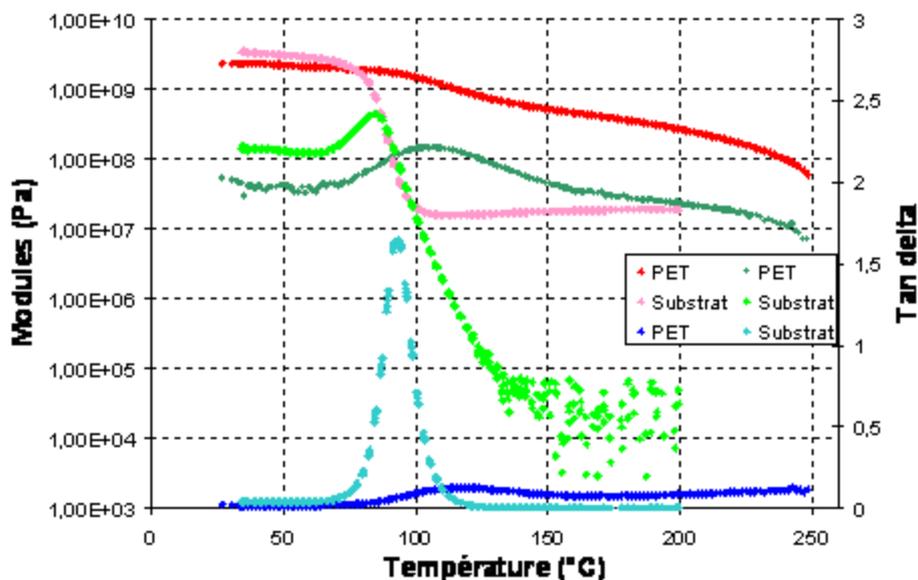


Figure IV-22 : Comparaison des relevés des modules élastiques et visqueux, et de l'angle de perte relatifs aux deux matériaux « verre Stylys 1,67 » et PET, pour une fréquence de 1 Hz, à une vitesse de chauffe de 1 °C/min.

Dans le contexte de la séquence complète d'assemblage, cette analyse comparée des propriétés des deux matériaux appelle les remarques suivantes :

- au cours de la phase de thermoformage, si l'on impose par exemple une température de chauffe de 160 °C pour le film PET et une température ambiante de 25 °C pour le verre hôte, seul le film, qui est au-dessus de sa transition α , est susceptible de se déformer et d'adopter la forme de la lentille. En effet, dans cette configuration expérimentale, le module élastique associé au verre est de l'ordre de sept fois plus élevé que celui du film ;
- A l'inverse, si l'on fait subir à l'assemblage une température de 100 °C après la phase de report du film sur la lentille, le film restera en dessous de la température de transition α à 1 Hz alors que celle du verre hôte la dépassera. On observe pratiquement deux décades de différence dans la mesure des deux modules élastiques, le film aura donc tendance à imposer une forme donnée au verre. Nous devons par ailleurs noter que ce dernier, lorsqu'il sera amené au-delà de sa transition α , risquera

également de se dilater conséquemment au cours des trois heures d'étuvage.

Ce risque que nous venons d'évoquer, lié au différentiel entre les coefficients de dilatations des deux matériaux qui doivent être assemblés, imposait une caractérisation complémentaire. Toujours grâce au concours du *CEMEF*, l'équipement de l'expérimentation DMTA a été mise en œuvre cette fois dans le mode statique : aucun déplacement dynamique n'est imposé au cours de l'essai, seule une pré-tension de l'échantillon minimale entre les mors est nécessaire à la validité de la mesure ; on recueille simplement, au cours d'un balayage en température ou d'un isotherme, le déplacement des mors lié à la dilatation pure de l'échantillon.

La caractérisation a consisté en une phase de rampe de température à 1 °C/min suivie d'un palier isotherme d'une durée de trois heures, de façon à placer l'assemblage constitué du film pixellisé reporté sur le verre dans les conditions représentatives de la cuisson d'un vernis thermodurcissable. La Figure IV-23 rassemble les résultats obtenus sur deux échantillons différents de film PET, le premier à l'état brut (commercial) et le deuxième ayant subi un traitement thermique pendant trois heures à 100 °C et sur le verre 1,67.

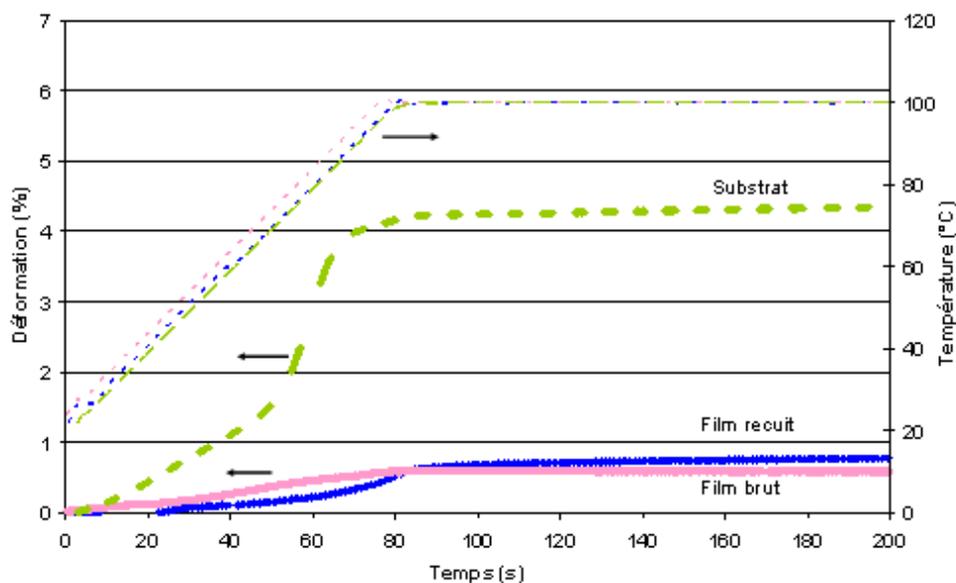


Figure IV-23 : Comparaison de la dilatation d'échantillons du verre 1.67 et du PET obtenus à partir de films à l'état brut et à l'état recuit, au cours d'une chauffe suivie d'un palier isotherme à 100 °C.

Bien que le chemin de déformation au cours de la rampe en température soit légèrement différent, on observe qu'à l'issue de la chauffe de l'ambiante à 100 °C, les deux

films de PET ne se sont dilatés que de 0.6 % environ. Le léger écart entre les comportements est vraisemblablement à imputer aux variations dans la cinétique de relaxation ou de réorientation des macromolécules (principalement dans la phase amorphe) qui permettent aux chaînes, issues de l'amorphe intercrystallin notamment, de se dilater plus ou moins librement ; à 100 °C, donc après franchissement de sa transition vitreuse, le verre 1,67 se dilate plus de quatre fois plus que le film de PET. Au cours de la cuisson du vernis, alors que le film, plus rigide, imposera sa forme au substrat, ce dernier va avoir tendance à se dilater conséquemment, tout en étant contraint par le collage de l'assemblage. Dans ces conditions, on peut donc envisager des déformations spécifiques au sortir de la phase de cuisson du vernis qui pourraient être à l'origine d'instabilités géométriques.

4. Conclusion

L'étude des propriétés du film de PET Melinex 506 démontre l'intérêt de son utilisation dans le projet d'optique digitale. Il est d'une part compatible avec l'optique ophtalmique de par ses qualités optiques puisqu'il est transparent dans le domaine spectral visible, et d'autre part il transmet suffisamment les UV pour des applications photochromiques.

Après avoir vérifié la nature semi-cristalline du Melinex 506, nous avons montré que dans le domaine des petites déformations dans lequel nous devrions nous situer (avec un taux de déformation de l'ordre de 10 % au maximum dans le cas le plus défavorable), seule la phase amorphe caractéristique devrait intervenir dans un régime de déformation viscoélastique.

La caractérisation du film par analyse thermomécanique dynamique a permis de vérifier le caractère viscoélastique attendu du Melinex 506 et de situer aussi idéalement sa plage de thermoformage entre 100 et 120 °C. L'analyse de ce comportement viscoélastique du film sur une large gamme de fréquence nous a notamment permis d'identifier les paramètres pertinents du modèle dit de MAXWELL généralisé que nous avons retenu en première analyse. Plus précisément, le principe d'équivalence « temps-température » est rendu par le modèle comportemental nommé WLF en considérant des constantes spécifiques qui ont été établies à $C_1 = 20,2$ et $C_2 = 120,96$ °C, valeurs qui sont compatibles avec les données relevées dans la littérature.

Nous sommes donc désormais en mesure d'utiliser ce modèle pour réaliser des simulations numériques de nos procédés de mise en œuvre et comparer les résultats ainsi obtenus avec les relevés des essais expérimentaux relatifs aux procédés PIXIS.

CHAPITRE V

Le report de première génération dit de « grande surface »

Ce chapitre est consacré à l'étude du report « grande surface » du film pixellisé, pour différents gabarits en termes de rayons de courbure de verres ophtalmiques selon le procédé de mise en œuvre PIXIS-A que nous avons décrit dans le chapitre 2. Ce report est dit de "grande surface" car les disques de films initiaux mesurent 10 cm de diamètre et sont reportés sur des lentilles que nous qualifierons de semi-finies parce que nous détournées aux gabarits des verres de lunettes souhaités. Dans une première partie nous déterminerons l'influence des paramètres sur la courbure du film lors de son gonflement, à savoir la température de chauffe, la pression imposée de déformation et le diamètre de la bague de maintien. La seconde partie sera consacrée aux simulations numériques réalisées en s'appuyant sur le modèle comportemental du film de PET que nous venons d'établir et en considérant différentes séquences de commandes du procédé PIXIS-A. La troisième partie nous permettra de déterminer les paramètres de report sur deux géométries de verres ophtalmiques. Nous utiliserons les outils de caractérisation mis en place pour mesurer et comparer les déformations qui sont imposées au film lors des reports.

1. Influence des paramètres de mise en œuvre sur la courbure du film de PET

Dans ce paragraphe nous cherchons à réaliser le report d'un film ARclear-8796, c'est-à-dire du film Melinex en PET de 75 μm d'épaisseur et de son adhésif PSA de 25 μm , à la surface de différents gabarits de verres de lunettes. Le film à reporter doit être courbé de manière à correspondre au rayon de courbure convexe du verre de lunettes. À cette fin nous étudierons les différents paramètres ayant une incidence sur le gonflement du film, à savoir la température de chauffe du film, la pression de déformation et le diamètre de la bague de maintien.

1.1. Influence de la température et de la pression sur le rayon de courbure du film

Dans un premier temps, nous avons cherché à déterminer de façon expérimentale la courbure que prend un film d'ARclear 8796 en fonction de la température et de la pression qui lui sont imposées. La bague 1 de maintien utilisée ici mesure 85 mm de diamètre. Le chauffage est réalisé à partir de la céramique infrarouge Infraline. Tout en maintenant le chauffage, l'enceinte est pressurisée à P1 avec une montée en pression de 0,1 bar par seconde.

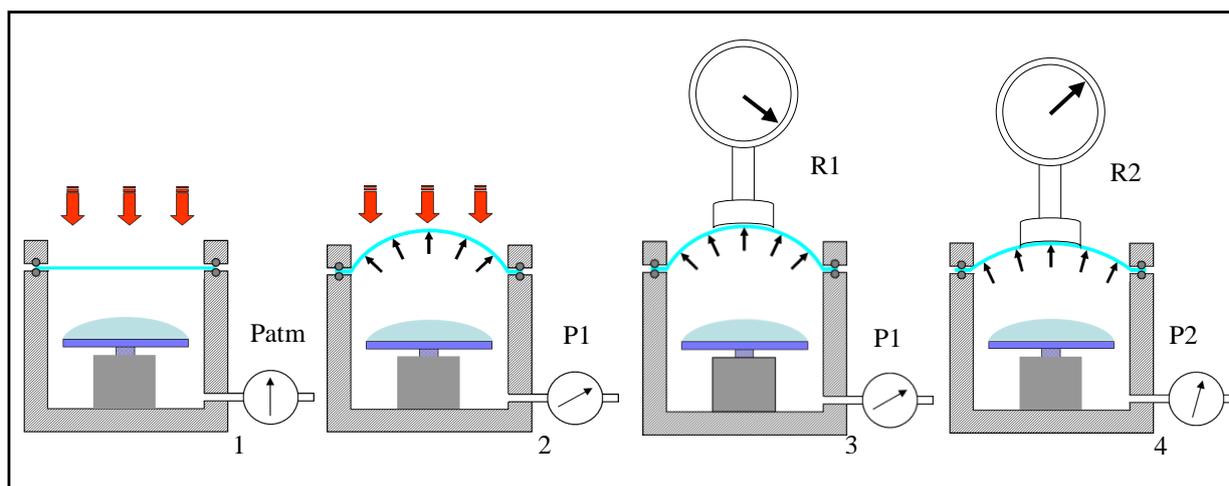


Figure V-1 : Mode opératoire de la détermination de la courbure du film ARclear 8796 en fonction de la température et de la pression

Lorsque la pression P1 est atteinte, le chauffage du film est arrêté et le film est ramené à la température ambiante. Un premier rayon de courbure R1 est mesuré, puis la pression est baissée jusqu'à 0,2 bars où le seconde rayon de courbure R2 est mesuré. Nous avons réalisé ces mesures de 0,3 à 1 bar par tranche de 0,1 bar à une température de 80 °C, 100 °C ou 120 °C. Notons que chaque mesure a été bien évidemment réalisée avec un film neuf.

Les courbes présentées sur la Figure V-2 montrent que, pour une température de mise en œuvre fixée, plus la pression imposée dans l'enceinte est élevée et plus le rayon de courbure diminue, c'est-à-dire que le film à 0,3 bar chauffé à 120 °C a un rayon de courbure 180 mm, à 0,5 bar un rayon de 110 mm et à 1 bar un rayon de courbure de 70 mm. Comme nous pouvions nous y attendre, nous observons que, pour une même pression imposée, plus la température de chauffage du film est élevée et plus il est déformable : à 0,5 bar le film a un rayon de courbure de 105 mm à 120 °C, 120 mm à 100 °C et 135 mm à 80 °C.

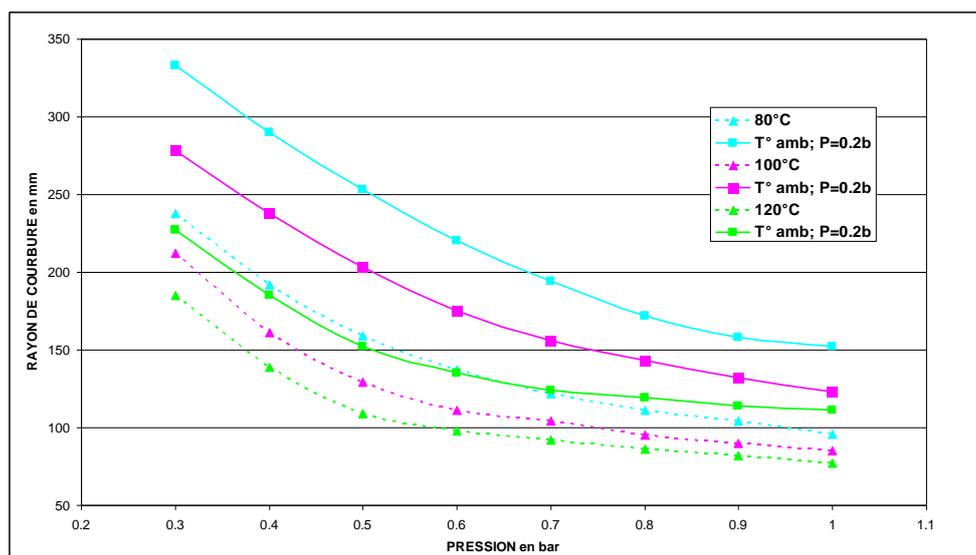


Figure V-2 : Variations du rayon de courbure du film en fonction de la température et de la pression appliquées avec la bague de 85mm

Sur le graphique les courbes relevées en pointillés représentent la mesure du rayon de courbure avec la pression de mise en forme, les courbes pleines celle des rayons de courbure du film observés à la suppression de 0,2 bar soit une pression quasi atmosphérique. Comme attendu, nous constatons que la courbure du film diminue lorsque la pression de mise en œuvre est relâchée. Cette évolution marquée par une différence entre les deux courbes qui n'est pas négligeable correspond à la relaxation de la composante élastique du film de PET. Ce phénomène est inévitable et devra retenir notre attention lors de l'étape de collage du film sur le verre.

1.2. Influence du diamètre de la bague sur le rayon de courbure du film

Nous cherchons ici à déterminer l'influence du diamètre de la bague de maintien du film sur sa courbure pour une même température et une même pression de mise en œuvre. Pour cela nous réalisons une nouvelle série de gonflements de films avec cette fois une bague possédant un diamètre de 77 mm ; nous comparons les rayons de courbures obtenus avec les mesures précédentes. Le rayon de courbure est mesuré après la déformation à une pression proche de la pression atmosphérique. Les résultats montrent que le diamètre de la bague influe sur le rayon de courbure obtenu. Par exemple, on voit que pour déformer un film, chauffé à 100 °C, à un rayon de 160 mm, il faut appliquer une pression de 0,7 bar avec la bague de 85 mm alors qu'il ne faut qu'une pression de 0,5 bar avec la bague de 77 mm.

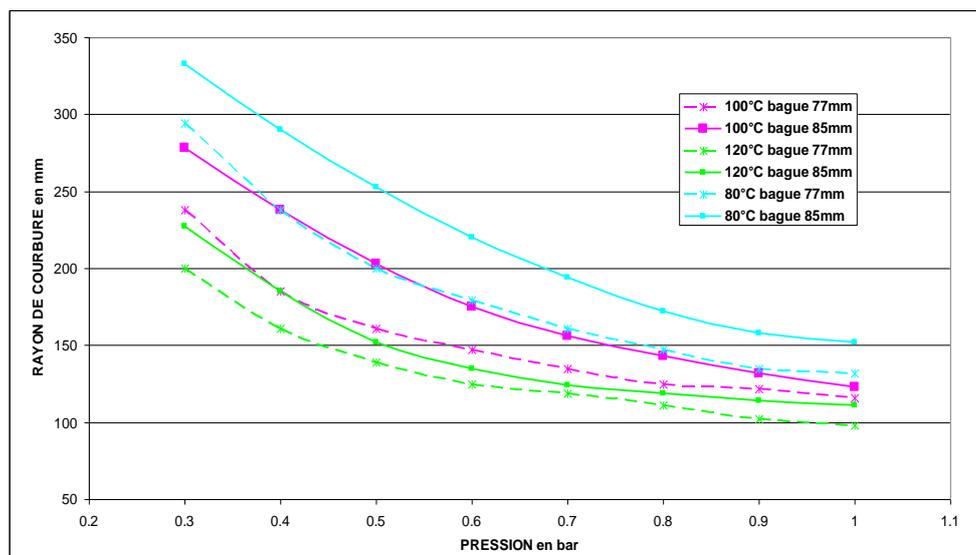


Figure V-3 : Variations du rayon de courbure du film en fonction de la température et de la pression appliquées avec une bague de 85 mm et un bague de 77 mm.

Nous avons vu dans le chapitre 2 qu’il était avantageux en terme de déformation de travailler avec un diamètre de bague le plus faible possible. Nous voyons ici que le diamètre de la bague a une influence sur les paramètres de pression à appliquer au film pour le déformer.

2. Simulation numérique du report « grande surface »

L’objectif du travail de simulation numérique que nous avons conduit résidait dans l’aide à l’optimisation des procédés de thermoformage et de report que nous avons développés, et autant que possible, dans la vérification et l’aide à la compréhension des mécanismes physiques mis en jeux. Nous ne prétendons pas aboutir à des modèles comportementaux rigoureusement prédictifs en termes de détermination des conditions opératoires pertinentes comme par exemple les pressions absolues, les températures et les temps de chauffe. Il importait par contre d’évaluer les tendances quant à l’influence de ces paramètres technologiques sur les caractéristiques auxquelles nous pouvions nous attendre et concernant essentiellement les taux de déformations et les degrés de contraintes qui seront soumis à la fois au film fonctionnalisé et au substrat verre hôte.

2.1. La méthode de simulation par éléments finis mise en œuvre

Compte tenu de la problématique qui nous était posée pour traiter cette question de la modélisation du procédé de « pré-thermoformage par gonflement », à savoir les traitements à la fois d'une réponse thermique et d'une réponse mécanique prenant en compte des comportements autres que le seul régime élastique linéaire, nous avons d'emblée opté pour la mise en œuvre de l'outil commercial de simulation par éléments finis *ABAQUS* [34].

Au plan de la structure même des calculs à mener de nature thermomécanique, il apparaît clairement que les traitements des volets thermiques et mécaniques peuvent être conduits de manière séquentielle. En effet, on peut considérer en première analyse que :

- la réponse mécanique n'a que très peu d'effets sur la résolution de la thermique : l'amplitude de la déflexion du film par gonflement est négligeable par rapport à la distance avec les sources chauffantes IR et, par ailleurs, le niveau d'absorption du rayonnement ne sera que très faiblement affecté par l'amincissement du film lorsqu'il sera marqué ;
- le calcul de la réponse thermomécanique du gonflement prenant en considération un champ de température préalablement établi exige en conséquence un traitement numérique direct et unique.

Dans ces conditions, un calcul rigoureux et beaucoup plus lourd des équations de la thermique et de la mécanique qui seraient implicitement couplées n'est pas nécessaire.

Dans cette première phase de l'analyse du comportement thermomécanique du film pixellisé (i.e. fonctionnalisé) à former et à reporter, nous avons par ailleurs choisi de ne considérer que les éléments constitutifs les moins résilients, autrement dit nous n'avons décrit que le film support en PET qui constitue à la fois le support et l'armature de l'assemblage complet. C'est aussi la démarche que nous avons adoptée pour l'étude expérimentale puisque, comme nous l'avons déjà mentionné, nous avons d'abord travaillé avec le seul film PET et son film de colle acrylique sensible à la pression : d'une part la très forte valeur ajoutée par les couches supplémentaires de structuration, qui sont également en cours de mise au point, ne nous autorisait pas à faire les premiers essais avec la structure complète ; d'autre part, mécaniquement ces couches qui sont souvent plus fines et avec une résistance intrinsèque à la tension moindre, ne font que subir les déformations imposées de telle sorte que l'on peut

négliger leur impact sur la réponse du système complet. Nous verrons ultérieurement qu'il est par contre intéressant de connaître leurs seuils en déformation admissible pour juger de la viabilité des procédés développés. Au final, il ne restait donc que la couche de colle PSA de 25 μm d'épaisseur et qui présente déjà à la température ambiante un module d'élasticité très faible. Nous n'avons pas caractérisé notre composé spécifique PSA déposé sur le PET Melinex 506 mais la littérature sur cette famille de matériaux fait état de valeurs inférieures (le plus souvent, largement inférieures) à 60 MPa pour des caractérisations effectuées à la température ambiante [68], [69] et [70].

- **Modèle thermique**

Nous nous sommes limités au domaine linéaire qui suppose que la conductivité thermique est indépendante de la température. Le chauffage a été simplement décrit par une densité de puissance absorbée uniforme dans l'ensemble de la partie du film qui est exposée au rayonnement IR. Enfin, nous avons pris en compte les mécanismes de convection et de rayonnement sur les deux faces du film, ainsi que la conduction thermique vers les bagues de serrage ; ce sont ces trois mécanismes de pertes qui déterminent avec le niveau de la puissance absorbée l'équilibre thermique du système. Le calcul traite de la réponse à une excitation temporelle de chauffage qui peut être quelconque et il rend donc compte bien évidemment du régime transitoire.

Les valeurs des principaux paramètres physiques que nous avons adoptées sont consignées dans le Tableau V-1.

Conductivité thermique	λ	0,24 W/m.°C
Émissivité	ε	0,9
Coefficient de convection	h	2,5 W/(m ² .°C)
Densité	d	1430 kg/m ³
Chaleur spécifique	Cp	1300 kJ/kg.°C

Tableau V-1 : Valeurs des paramètres thermophysiques utilisées.

- **Modèle thermomécanique**

Le calcul prend en compte la réponse thermique concomitante mais calculée, comme nous venons de le justifier, préalablement : en d'autres termes, pour ce calcul qui est donc

conduit séquentiellement, les résultats de la simulation thermique sont injectés dans la simulation mécanique avec bien évidemment la synchronisation adéquate des excitations thermique et mécanique. Le chargement mécanique, ici une pression, peut aussi prendre une forme dans le temps souhaitée quelconque ; le plus souvent il s'agira d'un chargement et d'un déchargement sous forme de rampes encadrant un plateau. La tenue mécanique du film par la bague de fixation sur la chambre de compression est rendue par la prise en compte des conditions d'encastrement qui portent à la fois sur les déplacements en x, y, z et leurs dérivées respectives par rapport à ces coordonnées :

$$U_x = U_y = U_z = \frac{\partial U_x}{\partial x} = \frac{\partial U_y}{\partial y} = \frac{\partial U_z}{\partial z} = 0 \quad (V-1)$$

Compte tenu des relativement faibles taux de déformations ultimes que nous avons été amenés à explorer (qui ne dépassent guère les 10 % comme cela été mentionné précédemment), le traitement thermomécanique proprement dit considèrera uniquement le régime viscoélastique du PET constitutif principal du film. Ce régime sera décrit par le modèle comportemental dit de « WLF » en considérant les valeurs des paramètres physiques qui ont été extraites et décrites dans le chapitre 4. Ces valeurs sont rappelées dans le Tableau V-2.

Module d'élasticité (G)	2,4 GPa					
Coefficient de POISSON (ν)	0,35					
Modèle de viscoélasticité, loi « WLF »	T _{réf} = 100 °C ; C ₁ = 20,2 ; C ₂ = 120,96 °C					
	g ₁ 0.09	g ₂ 0.13	g ₃ 0.15	g ₄ 0.095	g ₅ 0.06	g ₆ 0,1
	τ ₁ 0.011 s	τ ₂ 0.08 s	τ ₃ 0.7 s	τ ₄ 10 s	τ ₅ 100 s	τ ₆ 2000 s

Tableau V-2 : Valeurs des paramètres utilisées dans le modèle thermomécanique

Pour l'une et l'autre des étapes de simulation, c'est à dire pour les calculs en séquence des réponses thermique et thermomécanique, le maillage de la structure conserve la même topologie : il est formé d'hexaèdres et a un pas de l'ordre de 2 mm ; cette valeur du pas nous est pratiquement imposée par l'épaisseur du film qui est de 75 μm puisque nous devons rester en deçà de la limite de 100 qui est préconisée pour le facteur de forme des éléments pour

favoriser la convergence dans la résolution numérique. Le disque ayant par ailleurs un diamètre de 85 mm cette finesse du maillage conduit à 3 604 nœuds et 1 734 éléments ce qui correspond à 10 812 variables ou degrés de liberté dans le cas de la simulation thermomécanique. La Figure V-4 donne une représentation de ce maillage et montre également le positionnement de 4 nœuds régulièrement répartis sur un rayon du disque ; ces positions spécifiques seront utilisées dans la suite de la présentation pour relever et illustrer l'évolution de certaines des variables physiques.

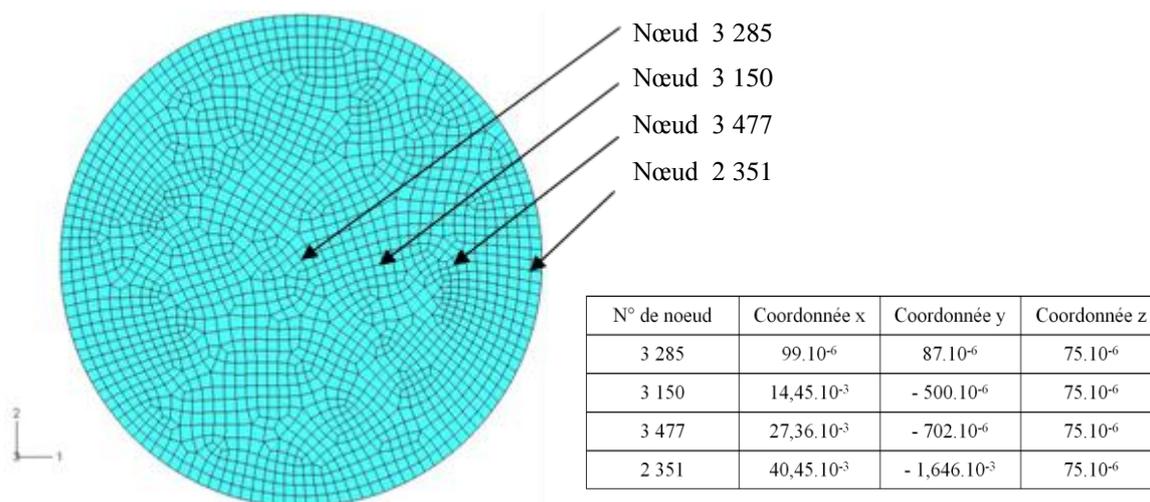


Figure V-4 : Illustration du maillage mis en œuvre à la fois dans la simulation de la phase de chauffage et dans la simulation du régime thermomécanique correspondant au gonflement ; 4 nœuds disposés sur un rayon sont répertoriés.

Pour finir cette description synthétique du modèle numérique par éléments finis que nous avons mis en œuvre il convient de préciser les besoins en termes de puissance de calcul : sur un ordinateur de bureau dont la CPU fonctionne à une fréquence de 3,2 GHz et ayant une mémoire RAM de 3 Go, un jeu de simulations en séquence « thermique + thermomécanique » des régimes transitoires sur 40 secondes exige un temps de calcul allant de 3 à 6 heures selon le degré de précision imposé - 10^{-4} à 10^{-6} - en tant que critère d'arrêt du calcul.

2.2. Quelques résultats de simulation du formage par gonflement

Pour rendre compte de l'intérêt de ce travail de simulation, tout en gardant le souci de synthèse, nous avons choisi de ne rapporter ici que les résultats relatifs à trois expériences.

Pour les deux premiers exemples de simulation du pré-thermoformage par gonflement nous avons considéré une température de chauffage de 140 °C et une surpression de 1 bar. Cette température du film a été obtenue en considérant une densité de puissance absorbée du rayonnement IR de $3,6 \cdot 10^7 \text{ W/m}^3$ ce qui, compte tenu de l'épaisseur du film, correspond à une densité surfacique de puissance absorbée de $0,27 \text{ W/cm}^2$. Ces deux cas de simulation ne diffèrent que par les séquences de synchronisation du chauffage et de la déformation : dans le premier exemple, la mise en pression est réalisée avant l'initiation de la chauffe, alors que dans le second, le gonflement est activé après que le film ait été chauffé. Nous le verrons ultérieurement, en pratique c'est généralement la deuxième procédure qui est retenue. Nous avons toutefois souhaité présenter la simulation du premier mode pour bien mettre en évidence les effets bénéfiques du chauffage à partir d'une différenciation quantitative.

- **Séquence de commande n°1 : mise sous pression suivi du chauffage**

Au cours de cette séquence, décrite sur la Figure V-5, la surpression de gonflage (pression par rapport à la pression atmosphérique) est mise à la consigne de 1 bar progressivement de manière linéaire à partir de $t = 0 \text{ s}$ et sous une rampe de 1 s. Le chauffage est lui activé à $t = 5 \text{ s}$ avec lui aussi une montée en puissance sur 1 s. La pression de mise en forme est maintenue à 1 bar jusqu'à $t = 30 \text{ s}$, elle est ensuite d'abord réduite à la pression de 0,2 bar en 1 centième de seconde et enfin annulée à $t = 35 \text{ s}$. Le rayonnement IR est quant à lui coupé au bout de 25 s (c.à.d. avant la baisse de pression) et on suppose qu'il s'éteint pratiquement instantanément (1 centième de seconde pour la simulation). Le transitoire des deux simulations - thermique et thermomécanique - est simulé et observé sur le temps de 40 s depuis $t = 0 \text{ s}$.

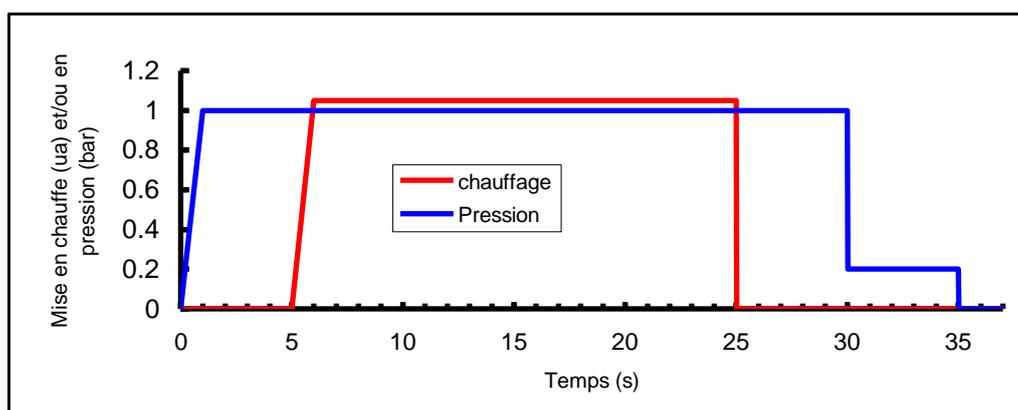


Figure V-5 : Séquence de commande 1

Les transitoires de température reportés sur la Figure V-6-a qui correspondent aux relevés observés sur les 4 nœuds régulièrement disposés sur le rayon du disque initial comme définis précédemment, montrent un temps de montée et de descente de l'ordre de 10 s.

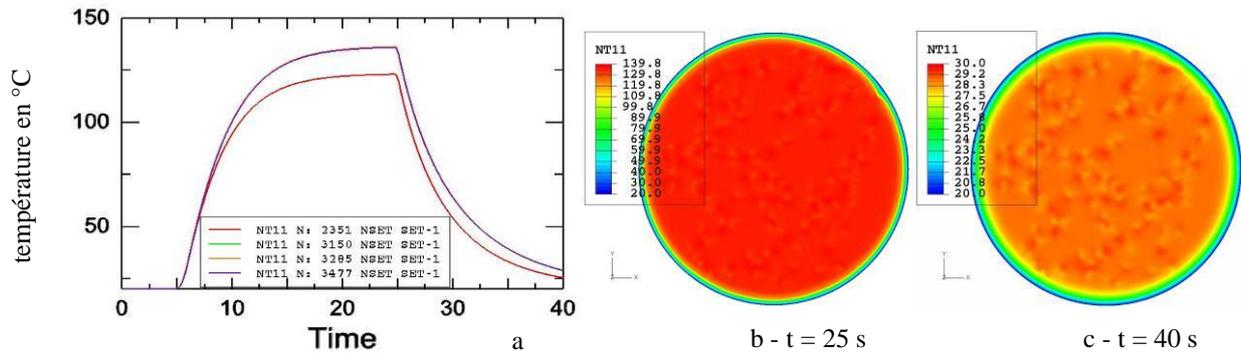


Figure V-6 : Réponse thermique du film à un chauffage de 138°C

Ces temps de réponse sont tout à fait compatibles avec les résultats de l'étude thermique que nous avons détaillée au chapitre 3 compte tenu de l'épaisseur du film – 75 μm - et des paramètres thermophysiques et opératoires retenus (conductivité thermique, coefficient d'échange pour la convection, puissance IR absorbée). Le thermogramme relevé sur le film (Figure V-6-b) au temps $t = 25$ s, c.à.d. à la fin de la montée en température, montre bien une bonne uniformité de température à 140 °C excepté sur la mince couronne externe qui correspond à la zone de refroidissement par conduction vers les bagues de maintien métalliques. Enfin, au temps de 40 s, soit 15 s après l'arrêt du chauffage, le refroidissement n'est pas complètement terminé puisque l'on observe un ΔT résiduel de 9,5 °C (Figure V-6-c).

La Figure V-7-a reproduit les transitoires des déplacements en z observés sur les 4 nœuds spécifiques et la Figure V-7-b illustre les niveaux de gonflement aux temps $t = 25, 32.5$ et 40 s. Comme attendu, on observe bien d'abord, après un premier palier, l'effet du chauffage qui se manifeste par une « reprise » du gonflement consécutive au ramollissement et au fluage du PET. Une fois le second plateau atteint, le refroidissement n'a ensuite aucune incidence sur l'amplitude du gonflement. Lorsque la pression est relâchée d'abord à 0,2 bar puis ensuite à 0 bar, on observe bien un recouvrement et une déformation résiduelle permanente correspondant à la réponse d'écoulement du régime de déformation viscoélastique.

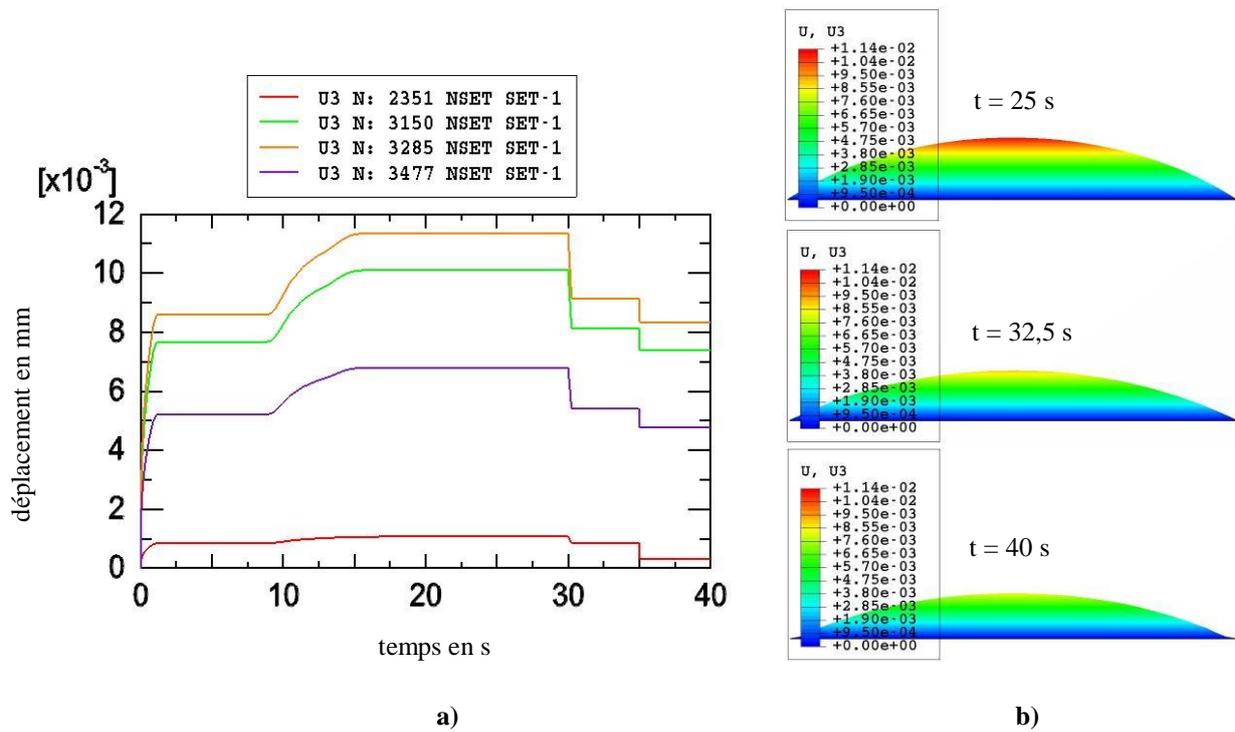


Figure V-7 : Déplacements dans la direction z (niveau de gonflement)

La Figure V-8 donne l'évolution du rayon de courbure calculé d'une part localement autour des 4 nœuds spécifiques à partir des relations :

$$R_C = \sqrt{\left[z_i + \frac{(x_j^2 - x_i^2 + y_j^2 - y_i^2) - (z_i + z_j)(z_i - z_j)}{2(z_i - z_j)} \right]^2 + x_i^2 + y_i^2} \quad (V-2)$$

dans laquelle x_1, y_1, z_1 et x_2, y_2, z_2 sont les coordonnées de deux nœuds i et j voisins, et d'autre part, globalement à partir du relevé de la déflexion totale et de l'expression :

$$R_C = \frac{F^2 + r^2}{2F} \quad (V-3)$$

dans laquelle F représente la déflexion du film et r son rayon.

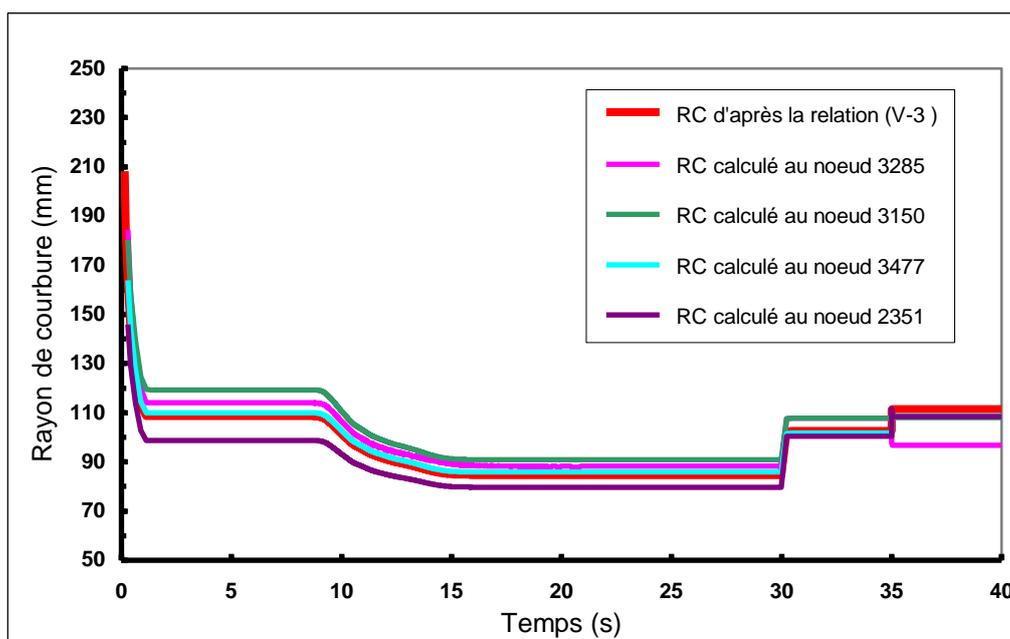


Figure V-8 : Suivi des rayons de courbure au cours de la séquence.

On vérifie ainsi que la déformation globale du film reste quasi-sphérique tout au long du transitoire. Nous avons en effet observé qu'en calculant ces rayons de courbure localement en choisissant des nœuds très proches mais différents (appartenant donc à des éléments du maillage différents), les résultats sont quelque peu erratiques ; ceci est à imputer, nous semble-t-il, à une très forte sensibilité de ces évaluations du rayon de courbure aux erreurs résiduelles du calcul numérique.

Les relevés des contraintes équivalentes Von Mises pour les temps $t = 4, 25, 32.5$ et 40 s sont reportés sur la Figure V-9. On observe que ces contraintes sont maximales vers le sommet de la calotte avec une forte amplitude pour les deux premières phases et qu'elles sont ensuite fortement réduites après la phase de déformation et le déchargement. Ainsi, on mesure bien l'intérêt de ce principe de prédéformation par gonflement avec assistance thermique favorisant l'écoulement viscoélastique suivi d'une phase de relaxation, puisqu'on évalue la réduction de la contrainte à un facteur de l'ordre de 5 si l'on s'arrête à une pression de repos de 0,2 bar.

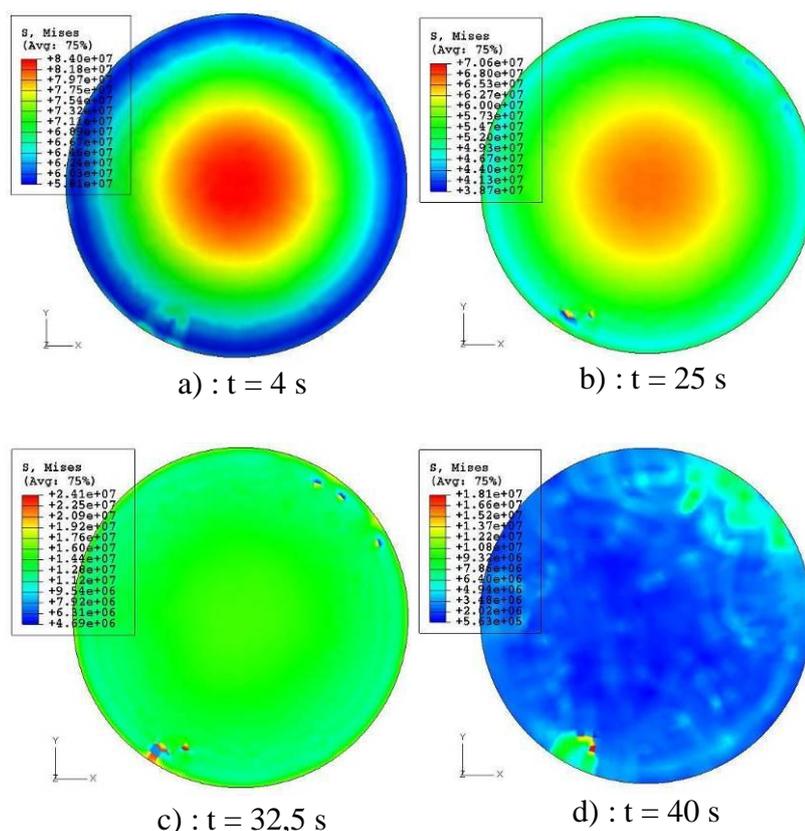


Figure V-9 : Contraintes équivalentes Von Mises

Enfin, les relevés de la Figure V-10 des déformations maximales, intermédiaires et minimales sont aussi donnés pour les temps $t = 25, 32.5$ et 40 s. Compte tenu de la forte densité du maillage il est difficile de visualiser correctement en une seule vue l'ensemble des vecteurs représentatifs des 3 composantes de déformation (3 vecteurs par éléments du maillage). Néanmoins, nous avons pu vérifier que la composante de déformation maximale correspond à la déformation radiale, la déformation intermédiaire à la déformation ortho radiale, et enfin la déformation minimale correspond à l'amincissement du film ; la Figure V-11 montre à titre d'exemple les distributions de chacune des trois composantes vectorielles relevées au temps $t = 25$ s de la séquence de thermoformage. Dans ces conditions, les relevés montrent que la déformation en étirement est biaxiale, avec une quasi uniformité pour la composante radiale et une concentration vers le sommet de la calotte pour la déformation ortho radiale ; l'amincissement, qui doit compenser ces étirements si l'on considère le film comme inextensible (et/ou dans le même temps incompressible) au plan du volume, est donc corrélativement aussi maximal vers le sommet de la calotte sphérique.

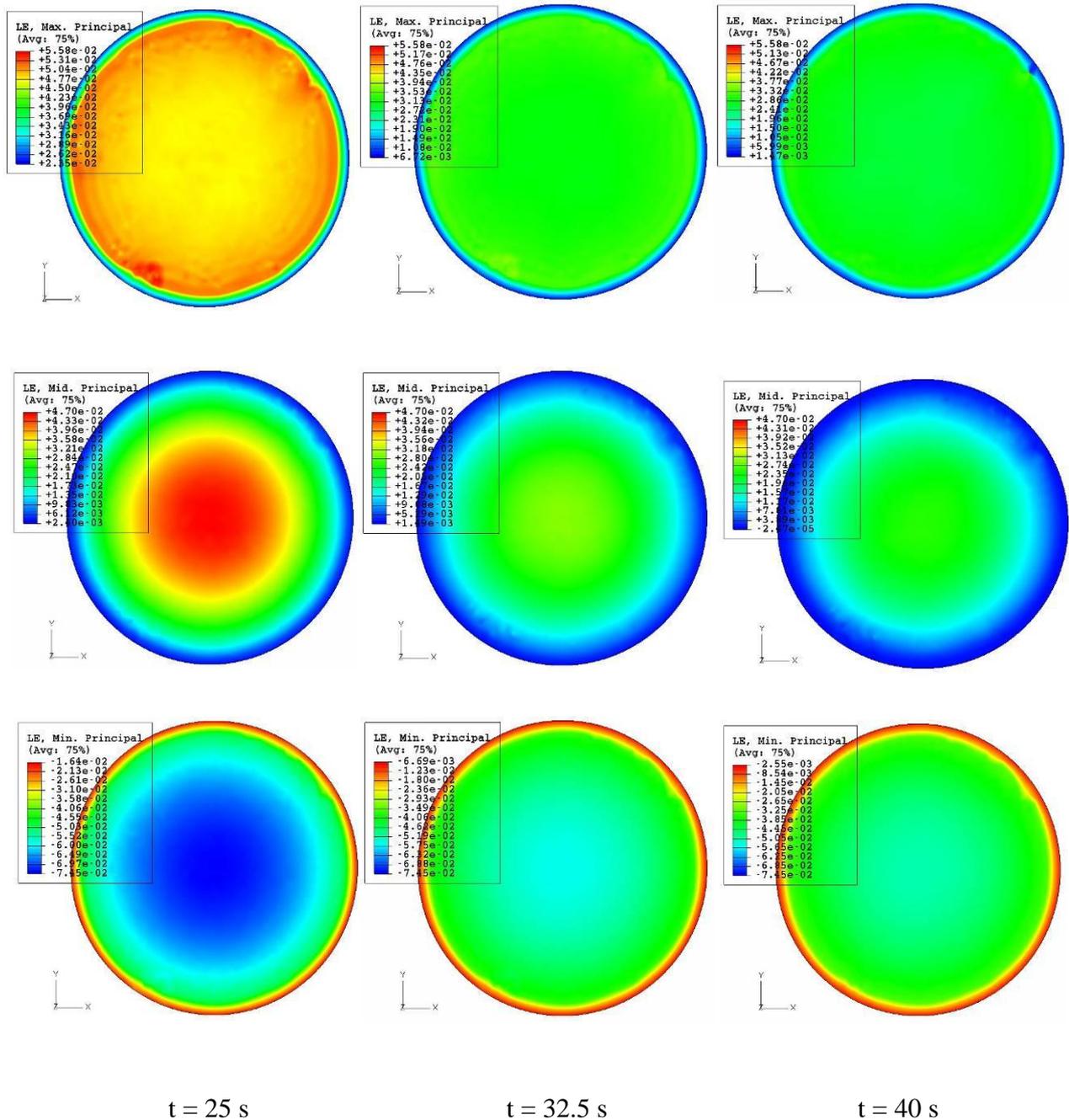


Figure V-10 : Déformations principales max, intermédiaire et minimale

Enfin, les niveaux de ces déformations décroissent bien évidemment en même temps que l'amplitude du gonflement, et nous pouvons aussi observer qu'ils sont du même ordre de grandeur que les valeurs obtenues lors de la simulation du seul régime élastique à la température ambiante que nous avons brièvement présentée dans le second chapitre.

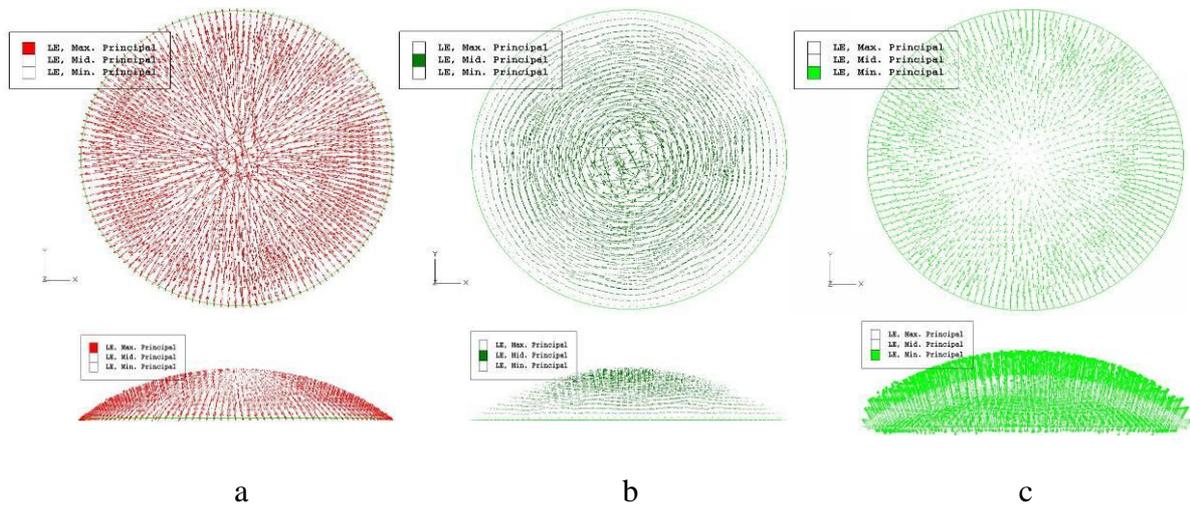


Figure V-11 Représentation vectorielle des déformations maximale (a), intermédiaire (b) et minimale (c) relevées à $t = 25$ s

- **Séquence de commande n°2 : chauffe du film suivi de la mise sous pression**

Ici, dans cette seconde simulation dont la séquence est décrite par la Figure V-12, c'est la consigne de chauffe du film à préformer qui est d'abord maintenant activée à $t = 1$ s. La pression est ensuite mise progressivement, de manière linéaire aussi sur une seconde, à partir de 15 s. Toutes les phases de la séquence précédente, à savoir le refroidissement qui a lieu à $t = 25$ s et la redescente aux pressions de 0,2 et 0 bar à 30 et 35 s respectivement, sont inchangées.

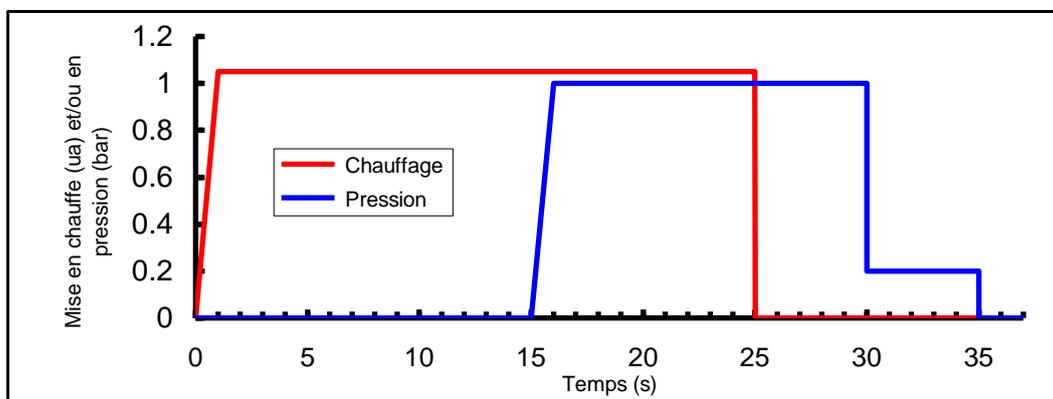


Figure V-12 : Séquence de commande de type 2

Les Figure V-13 et Figure V-14 reproduisent respectivement les évolutions des températures et des déplacements dans la direction z du gonflement. Le plateau de chauffe à 140 °C est plus long que précédemment puisque ici, dans cette séquence, la phase de

chauffage démarre à $t = 0$ s. Pour ce qui concerne les amplitudes du gonflement à 1, 0.2 et 0 bar, il apparaît que celles-ci correspondent exactement à ce qui a été observé précédemment au cours de la séquence du premier type. C'est que, comme on doit l'attendre, dans ce domaine des petites déformations régies essentiellement par le mécanisme de viscoélasticité linéaire, le choix de l'initiation par le chauffage avant toute mise en pression, ou bien par le gonflement à froid n'a aucune incidence sur l'état du film en fin de préformage, lorsque la pression a été réduite et le chauffage coupé.

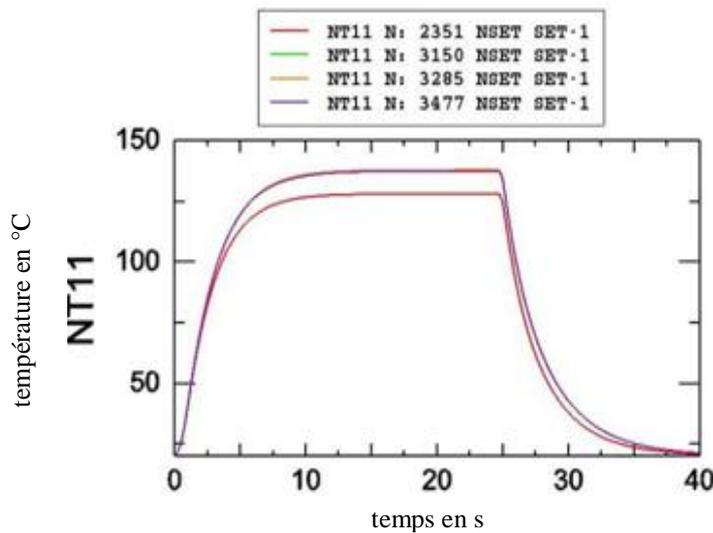


Figure V-13 : Réponse thermique du film à un chauffage de 140 °C dans la séquence opératoire de type 2

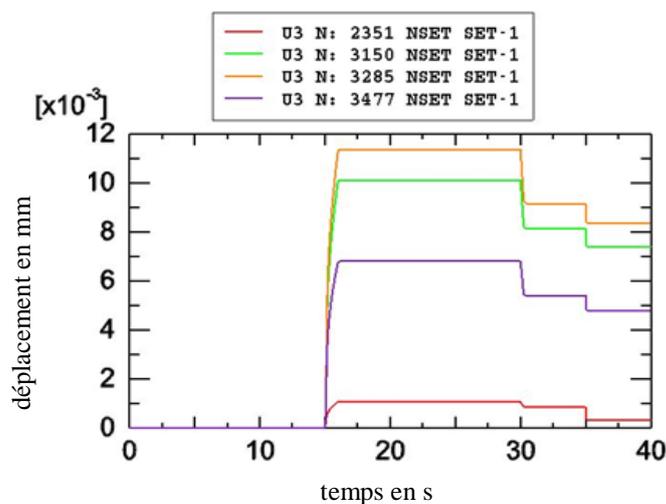


Figure V-14 : Déplacements dans la direction z (niveau de gonflement) dans la séquence opératoire de type 2

- **Relation « pression de gonflement – rayon de courbure » :**

Dans la troisième étude, et toujours pour une simulation du chauffage du film à 140 °C, nous avons examiné les évolutions des rayons de courbure relevés au moment du préformage et après relâchement de la pression à 0,2 et à 0 bar en fonction de la pression de préformage. La Figure V-15 montre les résultats obtenus ainsi que leur confrontation aux relevés de l'expérience pour les mêmes conditions opératoires. Hormis pour la plus faible des valeurs de la pression de gonflement explorées, qui est de 0,4 bar, la confrontation « théorie-expérience » montre un écart que l'on peut considérer comme relativement faible au regard de la diversité des processus physiques mis en jeux. Bien que nous n'ayons pas cherché à rapprocher ces courbes en modifiant les paramètres thermophysiques pré-caractérisés par les méthodes que nous avons décrites dans le chapitre précédent, cette confrontation corrobore de manière relativement satisfaisante notre interprétation du comportement rhéologique observé expérimentalement en considérant, pour notre domaine d'intérêt des petites déformations, le seul régime viscoélastique linéaire. Cette relative concordance justifie implicitement dans le même temps le bien fondé de l'approche de description comportementale de ce régime par le modèle d'équivalence « temps-température » dit de « WLF ».

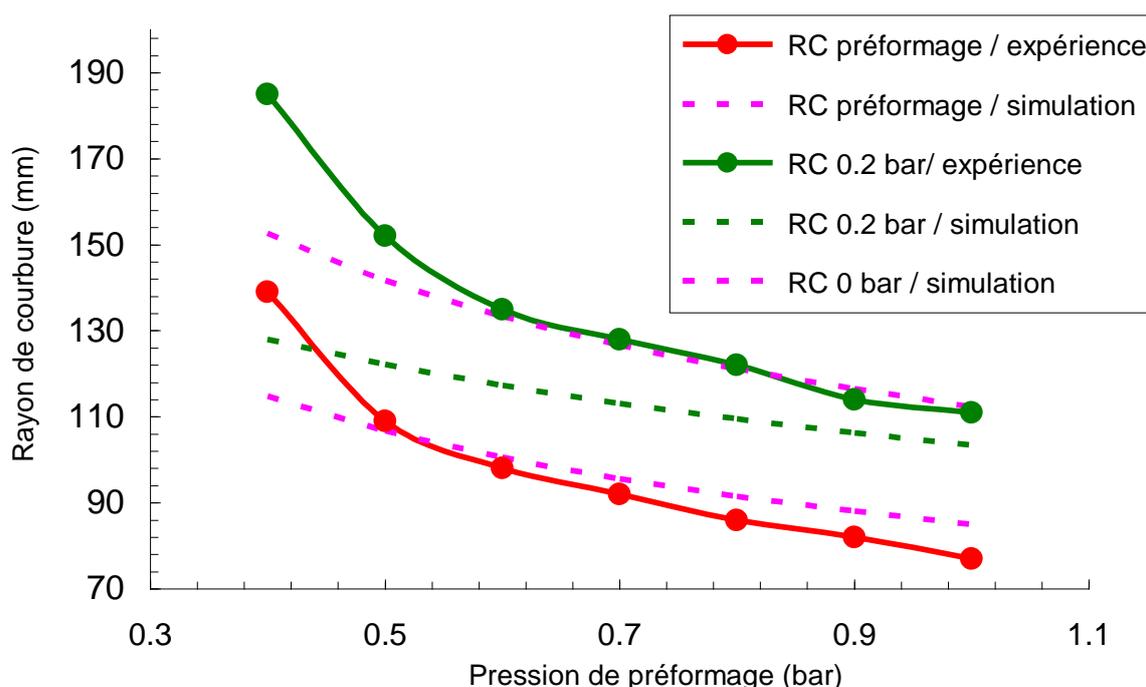


Figure V-15 : Evolutions des rayons de courbure relevés au moment du préformage et après relâchement de la pression à 0,2 bar (ou 0 bar pour la simulation) en fonction de la pression de préformage ; comparaison « simulation numérique-expérience ».

- **Conclusion**

Les résultats de simulation que nous venons de présenter confirment bien qu'il devrait être permis de pré-thermoformer, avant le report proprement dit, un film fragile fonctionnalisé par la méthode du gonflement. La forme ainsi obtenue doit être sphérique ou quasi sphérique. Si l'on sait s'affranchir d'un chauffage éventuel du verre hôte, qui pourrait être résiduel et non souhaité, alors on pourra faire le report à température ambiante et ainsi éviter le piégeage de contraintes inhérentes à un hétéro-assemblage réalisé à une température plus élevée.

L'outil de simulation que nous avons développé, bien qu'il ne puisse pas être rigoureusement prédictif, au moins pour la raison évidente que le modèle structurel est pour l'instant simplifié et approché, devrait toutefois nous aider dans la pré-évaluation des procédés et leur optimisation. Nous verrons en particulier que les estimations des déformations à attendre de ces procédés seront cruciales pour cette optimisation.

Enfin, comme nous le verrons dans le sixième et dernier chapitre, ce modèle sera adapté et étendu pour le principe de thermoformage dit PIXIS D qui est une évolution du procédé que nous venons de simuler.

3. Détermination des paramètres de report sur deux géométrie de verre ophtalmiques

3.1. Mode opératoire

Nous cherchons ici à mettre au point le report du film ARclear-8796 sur les verres stylis de puissance +0.00 et +6.00 avec la séquence du mode PIXIS-A1, c'est-à-dire le gonflement du film à chaud pour approcher le rayon de courbure du verre suivi du collage avec une légère surpression. Le chauffage utilisé ici est la céramique infrarouge *Infraline*. Rappelons que les verres +0.00 ont un rayon de courbure de 133 mm et une base de 75 mm de diamètre, les verres +6.00 un rayon de courbure de 67 mm et toujours une base de 65 mm de diamètre. La bague de maintien utilisée est le modèle de 77 mm. Les différents reports sont réalisés avec les paramètres de chauffage, proches ou supérieurs à la température de transition vitreuse, fixés à 80°C, 100°C et 120°C, à pression atmosphérique. Après un temps de chauffe déterminé, la chambre est mise sous pression de façon à gonfler et étirer le film de façon sphérique. Tout en maintenant cette pression, nous laissons le film se refroidir naturellement jusqu'à la température ambiante, puis la pression dans l'enceinte est ramenée à la pression de

collage de 0,1 bar. En actionnant la remontée progressive du vérin support, le rayon de courbure du film étant légèrement plus grand que celui du verre, le collage du film s'amorce au centre du verre et progresse jusqu'à son bord. Après le report, la pression de l'enceinte est coupée. La Photo V-1 ci-dessous reproduit un exemple de l'assemblage ainsi réalisé.



Photo V-1 : film ARclear reporté sur un verre ophtalmique.

Le film qui débord du verre est alors découpé. À notre niveau, cette étape est réalisée manuellement à l'aide d'un cutter.

3.2. Les défauts de collage observés

Les collages ne sont pas toujours parfaits et nous rencontrons des défauts de quatre natures :

- des décollements du film depuis la périphérie du verre et dirigés en direction du centre, illustrés sur la Photo V-2-a. Ce genre de défaut peut provenir soit d'un collage réalisé alors que le film n'a pas été assez étiré – le film se plie pour épouser la forme du verre au moment du collage – soit d'un film suffisamment déformé pour épouser la surface du verre lors du collage mais dont la composante élastique n'a pas été relaxée avant le collage ;
- des bulles d'air, visibles sur la Photo V-2-b, dues au piégeage d'une bulle d'air par « sur-gonflement » du film : le rayon de courbure du film est plus petit que celui du verre et lors de la mise en contact de l'air est emprisonné dans cette cavité ;

- des poussières, visibles indirectement et révélées par la présence de petites bulles d'air comme illustré sur la Photo V-2-c. Nous avons constaté qu'une poussière de quelques dizaines de microns peut empêcher l'adhésif de coller sur une surface de plusieurs millimètres carrés. Il est donc très important de travailler dans un environnement exempt de poussières ;
- enfin, nous avons observé (Photo V-2-d) des défauts de forme circulaire au centre du report. Il s'agit d'un problème rencontré lors d'une mise en contact du film et du verre trop rapide.

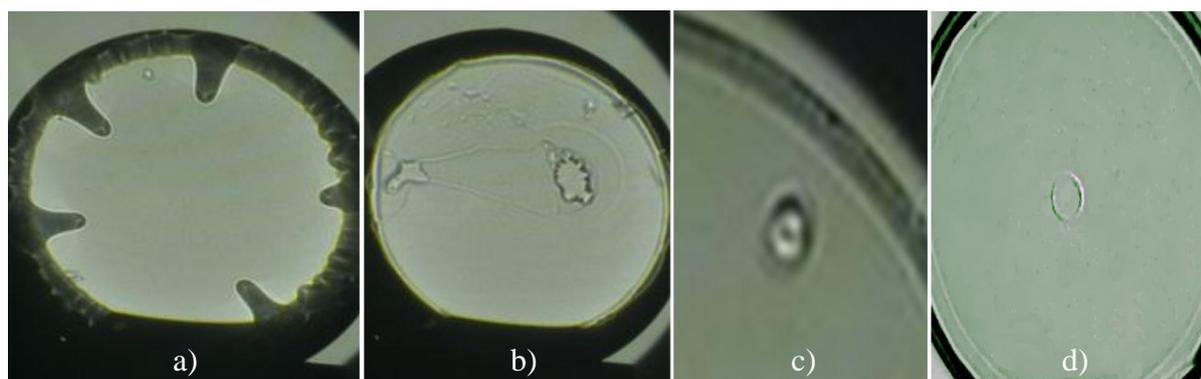


Photo V-2 : les défauts constatés lors des reports

À l'issue de cette expérience, nous avons rejeté tous les verres qui présentaient des poussières et nous avons reconduit la manipulation pour obtenir des échantillons sains.

3.3. Évolution dans le temps des reports effectués

Certains reports se décolle dans le temps sur une période qui peut aller de quelques secondes à plusieurs jours. Pour étudier ce phénomène, nous avons réalisé une série de reports en jouant sur les paramètres de mise en œuvre que sont la température et la pression de déformation. Nous avons observé l'évolution des reports dans le temps après le transfert, à 7 jours, 1 mois et 1 an au moyen du banc optique constitué de la lampe à arc (décrit dans le paragraphe « le contrôle cosmétique des reports » du chapitre 3). Les photos que nous présentons, sur les Figure V-16 Figure V-17 illustrent l'état des reports 7 jours après le transfert sur les gabarits +0.00 et +6.00 pour des températures de 80 °C, 100 °C et 120 °C. La pression de thermoformage est indiquée en bas à gauche de chaque cliché. Les planches présentées ci-après sont des photos prises 7 jours après le report. Sur chaque photo sont

indiquées les données suivantes : le numéro du verre, la date du report, la température de chauffage utilisée, la pression de déformation, la durée du chauffage avant la mise sous pression, le temps du chauffage avec le maintien de la pression, la vitesse de collage et la pression pendant le collage.

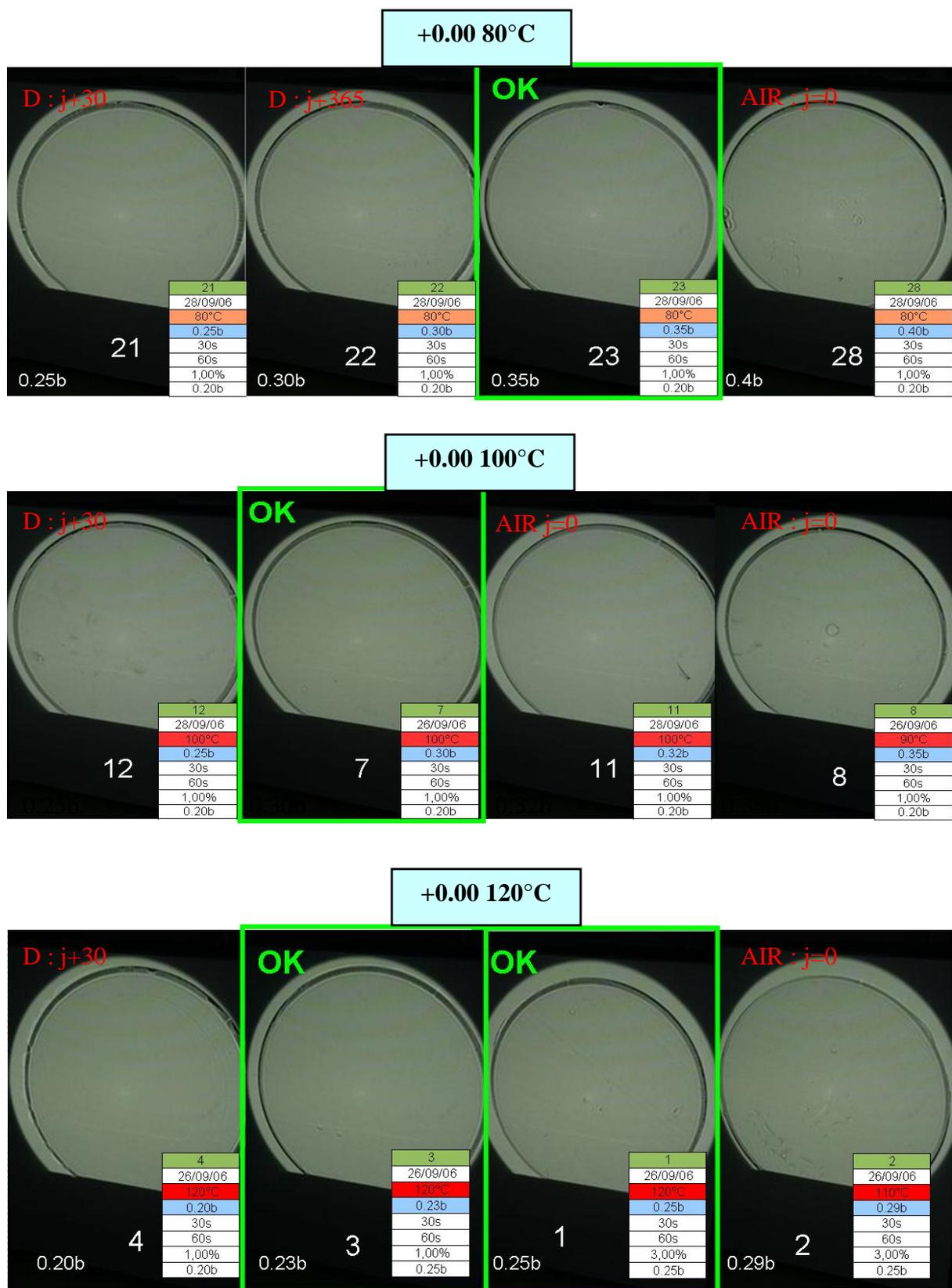


Figure V-16 : Reports du film ARclear-8796 sur verre +0.00 en fonction de la température et de la pression appliquées

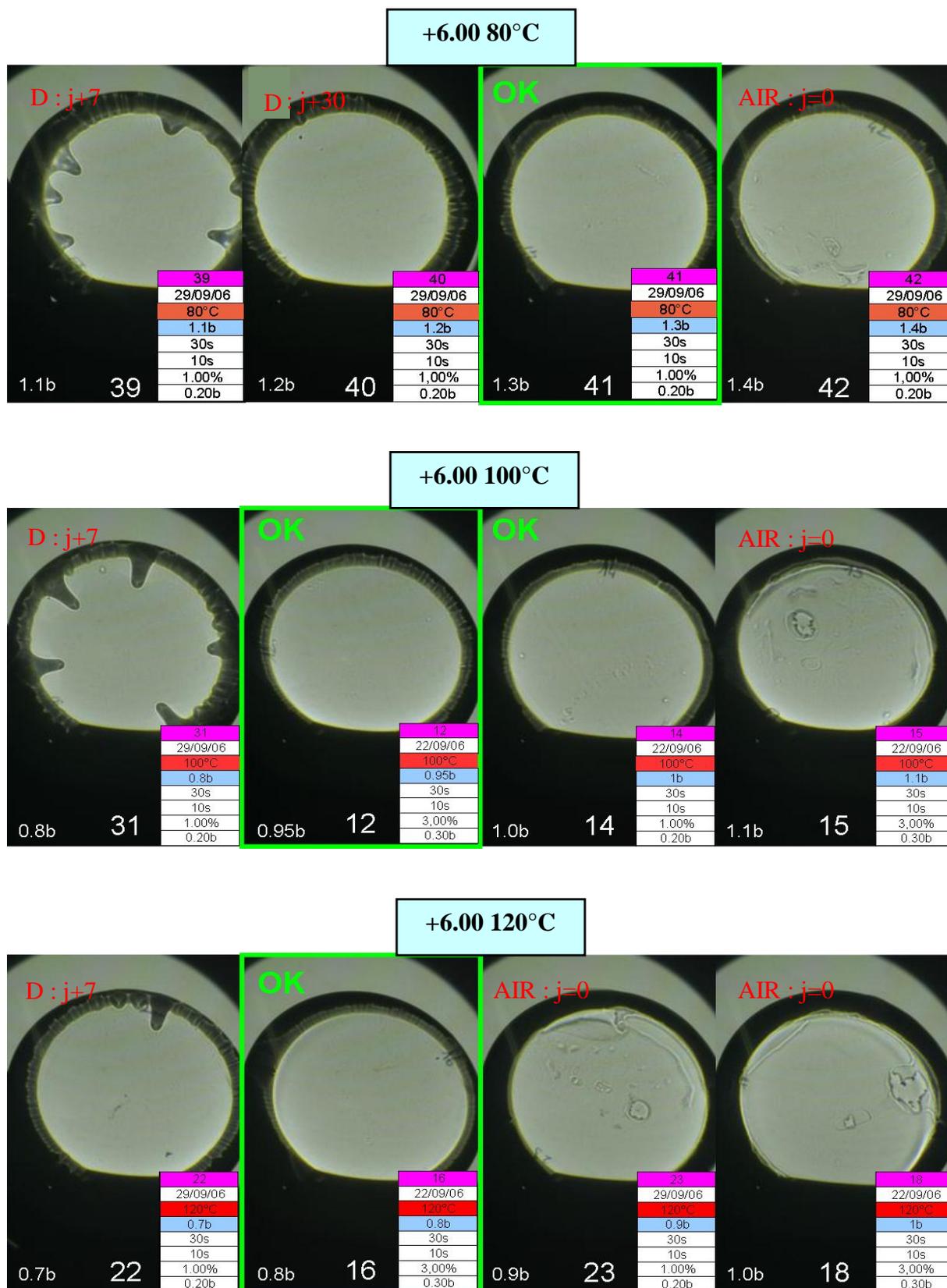


Figure V-17 : Reports du film ARclear-8796 sur verre +6.00 en fonction de la température et de la pression appliquées

3.4. Analyse des reports.

À $j=0$, les reports ne présentent généralement aucune amorce de décollement sur les bords. Nous observons des défauts sur les échantillons les plus déformés que nous interprétons comme un emprisonnement d'air entre le verre et l'adhésif du film lors de l'étape de collage. Nous avons choisi de conserver ces échantillons car ils constituent pour nous la limite supérieure du rayon de courbure à ne pas dépasser (et à ne pas atteindre d'ailleurs) selon les paramètres de mise en œuvre imposés.

7 jours après le report, nous observons que les films des reports 22, 31 et 39 se sont décollés. Ces films sont issus des reports sur les gabarits les plus bombés, les +6.00, et qui ont été déformés avec la pression la plus basse. Les films des verres +0.00 sont toujours en place.

30 jours après le report, nous constatons que d'autres films se sont décollés. Il s'agit cette fois des reports sur la base +0.00 aux pressions de gonflement les plus basses et ce quelque soit la température de thermoformage, c'est-à-dire les échantillons 4, 12, 21. Pour les gabarits +6.00, l'échantillon 40 qui était légèrement plus déformé que l'échantillon 39 avec une pression supplémentaire de 0,1 bar s'est décollé à son tour. Les reports ayant commencé à se décoller à compter du 7^{ème} jour ont vu le phénomène s'accroître au cours de la période qui a suivi.

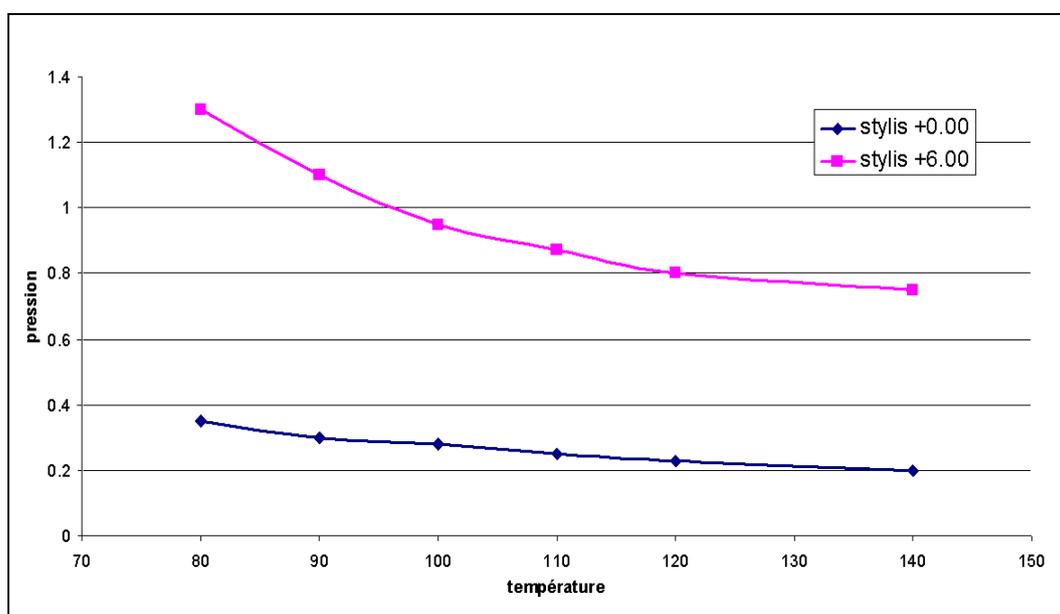


Figure V-18 : Pression de déformation à appliquer au film en fonction de la température et du gabarit du verre

Finalement, après 1 an de stockage, les reports n'ont pour ainsi dire plus évolué. Dans tous les cas, il est clair que le report de film plus courbé que le verre engendre l'emprisonnement de bulles d'air qui ne disparaissent pas avec le temps. Même si ce type de report n'entraîne jamais de décollement du film sur les bords, la qualité optique de l'objet final n'est pas acceptable.

Nous sommes donc parvenus à réaliser des reports stables dans le temps et ce même pour les gabarits les plus exigeants. La marge de manœuvre étant assez étroite, nous avons complété les résultats précédents par l'optimisation du report aux températures de 90°C, 110°C et 140°C. Nous avons reporté sur la Figure V-18 les pressions qui ont donné les meilleurs reports d'un film de PET sur des verres stylis +0.00 et +6.00 en fonction de la température de chauffage du film pour les températures allant de 80 °C à 140 °C. Ces nouveaux résultats nous permettent de proposer un modèle de la pression à appliquer en fonction de la température d'un film chauffé de 80°C à 140°C et selon le gabarit du verre.

3.5. Mesure des déformations par la méthode des mouchetis, comparaison des procédés MARS et PIXIS

Après avoir déterminé les conditions des couples « température – pression » autorisant les reports pour les gabarits +0.00 et +6.00, nous avons mesuré et cartographié les déformations subies par les films lors de leur mise en œuvre. Pour ce faire, nous avons utilisé la méthode du mouchetis décrite dans le chapitre III avec les procédés PIXIS et MARS. Pour les reports réalisés avec PIXIS, nous avons utilisé le collage par retournement de concavité (mode PIXIS-A2) pour ne pas emprisonner d'air entre le film et le verre. Nous avons opté pour une température de thermoformage de 110 °C afin de dépasser légèrement la température de transition vitreuse du PET. Les reports avec MARS ont été réalisés par l'équipe du centre de recherche d'ESSILOR de Saint-Maur, avec une température de chauffage du film de 140 °C. En deçà de cette température, les reports réalisés avec MARS ne sont pas stables et se décollent. La déformation tertiaire, correspondant à l'amincissement du film dans son épaisseur, n'est pas représentée car elle découle du calcul de la déformation primaire et secondaire, et non d'une mesure.

Les premières mesures proviennent d'une série de reports réalisés avec MARS. Le but de ces mesures est de déterminer la nature des déformations induites lors du report du film par

ce procédé. La figure suivante présente les cartographies des déformations d'un film lors de son report avec le tampon de pré-étirage sur un verre +0.00 – soit 133 mm de rayon de courbure – et sur un verre +6.00 – soit 65 mm de rayon de courbure – et lors de son report sans tampon sur un verre +6.00.

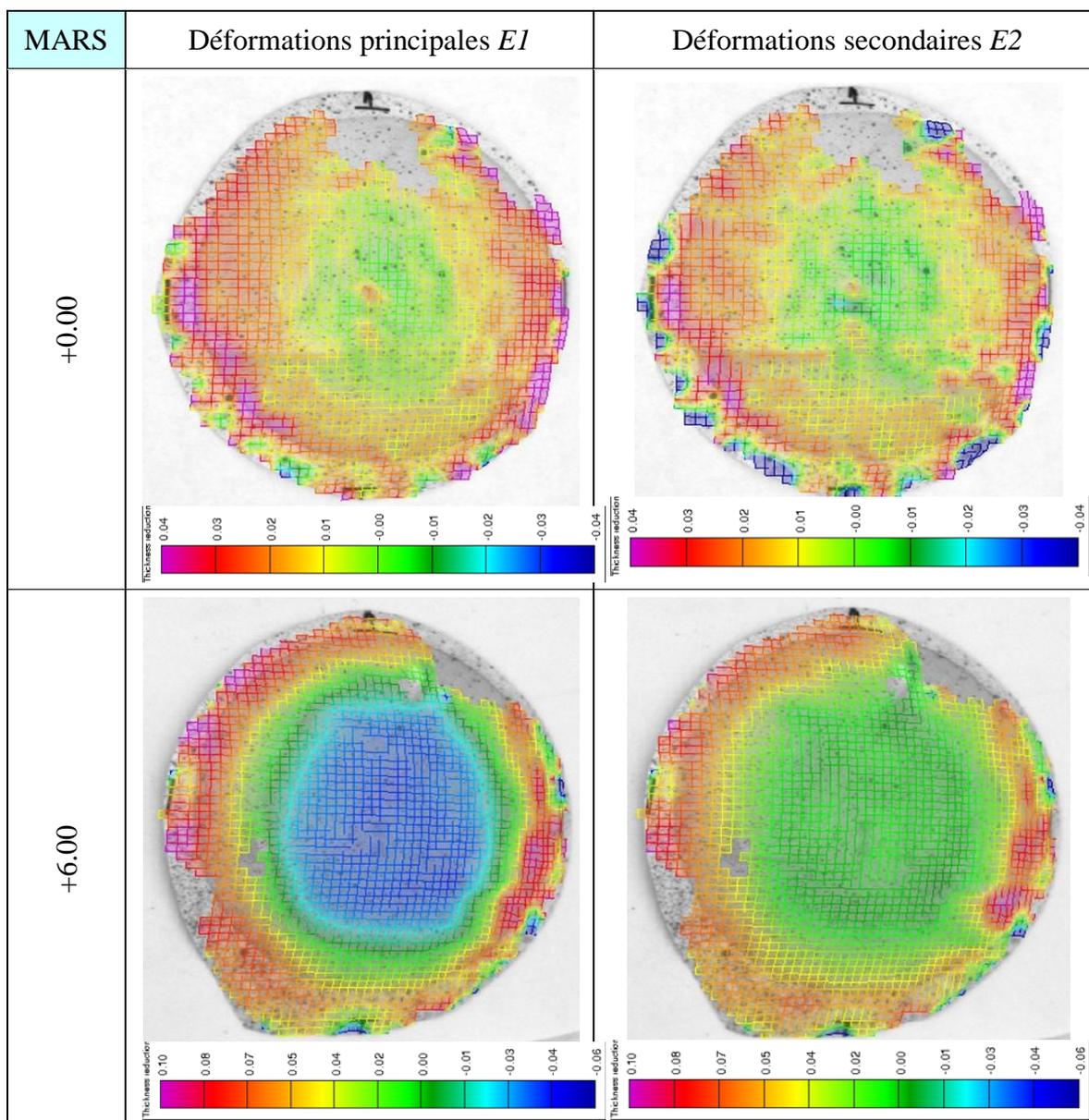


Figure V-19 : Cartographie des déformations principales et secondaires du film PET reporté par MARS sur des verres +0.00 et +6.00

Pour enrichir ces cartographies, les composantes des déformations ont été mesurées et reportées sur la figure suivante. On peut y retrouver les composantes des déformations du film

lors de son report sur un verre +0.00 tandis que la seconde provient de son report sur un verre +6.00. L'allure des courbes est identique : la déformation principale $E1 - I$ sur les courbes – est presque nulle au centre du verre et elle est maximum au bord. Les déformations maximales mesurées sont de 1,7 % et de 7,6 % respectivement pour les verres +0,00 et + 6,00. En comparant ces valeurs à nos premières estimations, nous vérifions que nos résultats, respectivement de 2 % et 6,5 %, n'étaient pas si éloignées de la réalité.

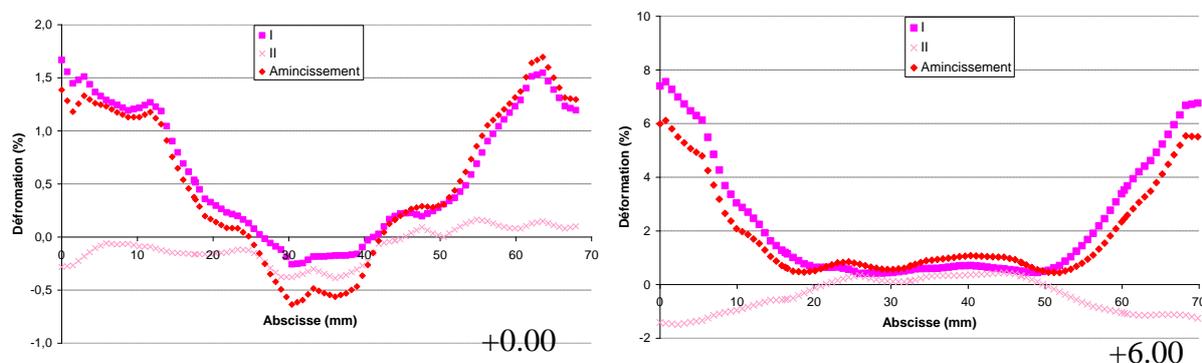


Figure V-20 : Composantes des déformations d'un film de PET lors de son report avec le procédé MARS sur verre +0.00 et +6.00

La courbe notée *amincissement* sur les figures correspond à l'amincissement du film dans son épaisseur. C'est ici l'opposé de l'élongation secondaire et c'est aussi le cas pour les cartographies des déformations secondaires. Enfin la déformation $E3$ correspond à la déformation du film orthogonale à $E1$, il s'agit également d'un amincissement mais plus faible que l'amincissement dans l'épaisseur. On voit ici que la déformation principale est égale à l'opposé de la somme des deux autres composantes. Cela signifie que la déformation est uniaxiale et dépend essentiellement de la déformation principale qui elle est radiale.

Nous avons réalisé les reports sur les mêmes verres à partir de PIXIS. Les cartographies sont représentées en Figure V-21 et les composantes de ces déformations en Figure V-22. La déformation principale est homogène sur la plus grande partie du film. Elle est de l'ordre de 3 % pour le verre +0.00 et de 7,5 % pour le verre +6.00. Sur le bord du film cette déformation devient nulle. Cela qui peut s'expliquer par le fait que dans cette zone le film est en contact avec la bague de maintien et a une température plus faible que le reste du film, le matériau se déformant préférentiellement où il est le plus chaud. La déformation secondaire est la composante orthogonale à la déformation principale. Dans le cas de PIXIS cette déformation n'est pas négligeable : l'allongement est maximum au centre du film avec

respectivement 2,2 % et 6,5 % de déformation, ce qui est de l'ordre de la déformation principale. Le profil de cette déformation est radial maximum au centre en s'atténuant au fur et à mesure de l'approche du bord du film. La déformation engendrée par le report PIXIS est équilibrée : le gonflement du film étire le film de façon biaxiale. Notons cependant que l'amincissement du film dans son épaisseur est plus important qu'avec MARS ; il correspond ici à la somme des deux composantes et est de l'ordre de 5 % pour le verre +0.00 et 14 % pour le verre +6.00.

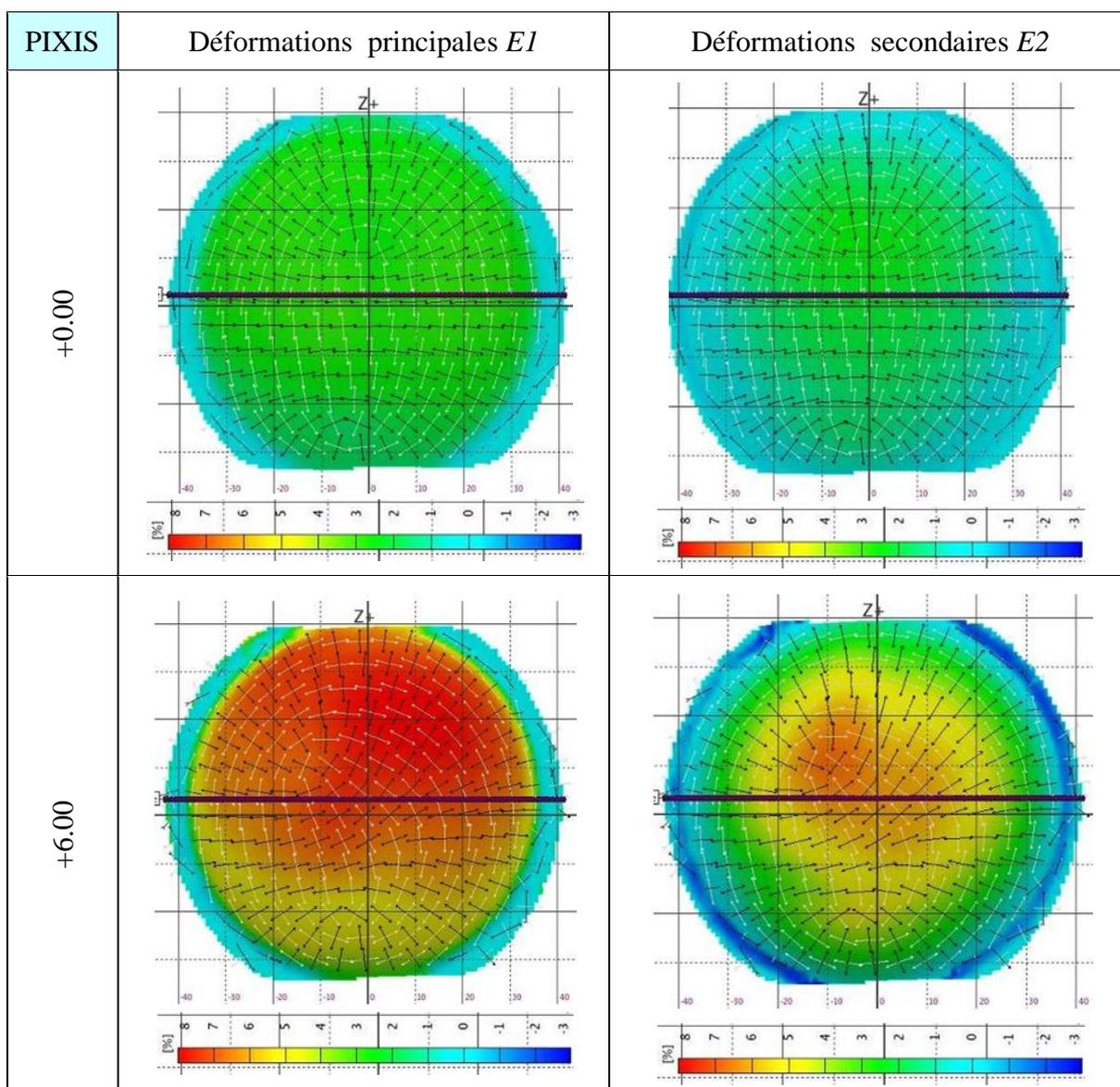


Figure V-21 : Cartographie des déformations principales et secondaires du film PET reporté par PIXIS sur des verres +0.00 et +6.00

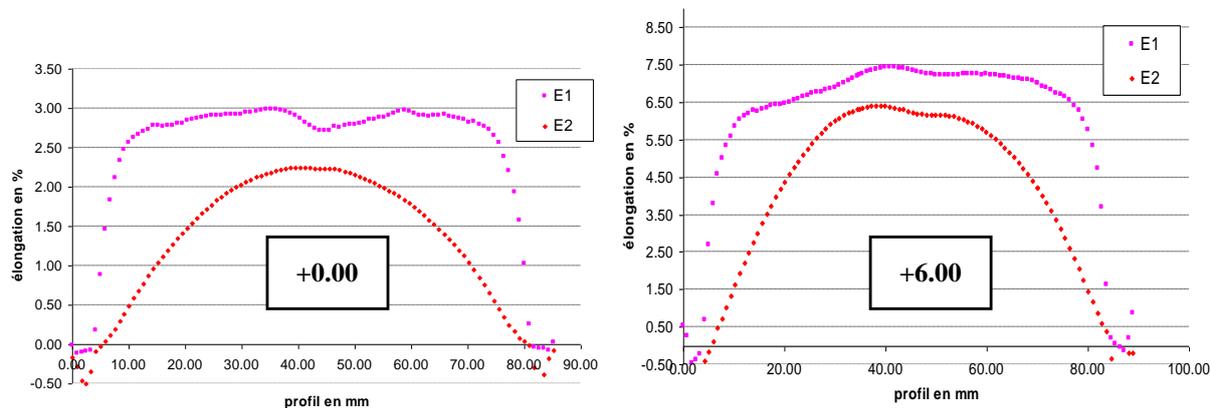


Figure V-22 : Composantes des déformations d'un film de PET lors de son report sur avec le procédé PIXIS sur verre +0.00 et +6.00

Si nous nous référons à notre analyse préliminaire du chapitre 2, les résultats que nous venons de commenter nous permettent de dire que le procédé MARS s'approche bien du report de type 3 et que le procédé PIXIS-A s'apparente plutôt à celui du type 2. En effet, MARS engendre une déformation qui est uniaxiale, minimum au centre et maximum au bord, alors que dans PIXIS-A la déformation est biaxiale avec un étirement quasi uniforme dans toute la région centrale et presque nul à la périphérie.

4. Conclusion

L'étude du procédé de mise en forme dit de « grande surface » – PIXIS-A – que nous venons de présenter a bien démontré l'intérêt, sur le plan de la tenue du collage après report, de la séparation des phases de déformation et de report proprement dit qui est inhérente au principe même du gonflement préalable. Cette séparation autorise d'une part la relaxation d'une partie de la contrainte, la part relative à la composante élastique, et permet d'autre part de minimiser aussi vraisemblablement l'effet de trempe. Ces deux effets conjugués ont conduit à une meilleure tenue du collage dans le temps comparativement à ce qui est obtenu avec le procédé MARS dans le cas de reports les plus exigeants (lentilles +6.00 de rayon de

courbure égal à 65 mm). Nous avons montré par ailleurs que ce procédé permettant de bien contrôler la phase de thermoformage a permis de réaliser des reports stables en mettant en œuvre des températures plus faibles de l'ordre de 120 °C contre 140 à 150 °C dans le cas de MARS.

La confrontation des deux procédés PIXIS-A et MARS sur le plan de la forme et du niveau des déformations a mis en évidence des résultats aussi différents. Les conclusions que l'on peut en tirer sont cependant ici plus mitigées dans la mesure où l'on n'a pas encore une connaissance précise de l'ensemble des exigences à satisfaire. Les points importants à retenir et à commenter sont les suivants :

- la déformation est biaxiale dans le cas des reports réalisés sous PIXIS-A alors qu'elle est radiale avec MARS ;
- comme attendu, la caractérisation de cette déformation fait apparaître aussi globalement une région plus homogène dans la zone centrale de la calotte où elle y est maximale dans le cas du procédé PIXIS-A, alors qu'elle est pratiquement nulle au centre et croît lorsque l'on s'éloigne du centre dans le cas de MARS ;
- l'ensemble de ces résultats montre que pour le cas des structures de lentilles les plus exigeantes au plan de la déformation du film fonctionnalisé induite après report, autrement dit celles qui auront un rayon de courbure le plus élevé, les deux procédés de report de grandes surfaces montrent leurs limites. En effet, l'un et l'autre pourraient engendrer de trop grandes déformations. On ne connaît pas aujourd'hui la limite de la déformation qui sera admissible pour la structure en microcuves remplies, et ce, aussi bien sur le plan de la tenue purement mécanique que celui de la détérioration, par cette déformation, de la fonction optique à assurer. Mais on sait bien aujourd'hui que l'intégration de couches fonctionnelles comme les électrodes conductrices en ITO (« Indium Tin Oxide »), ou les structures antireflets dans l'évolution du film pixellisé sera problématique car la résistance à l'allongement de tels matériaux est limitée à quelques pourcents. A titre d'illustration, la photographie suivante, représentant des relevés par microscopie électronique à balayage (MEB), montre très nettement la fracture d'une multicouche antireflets de type Sol-Gel déposée sur la surface d'un film de PET, à partir d'une déformation de 4 %.

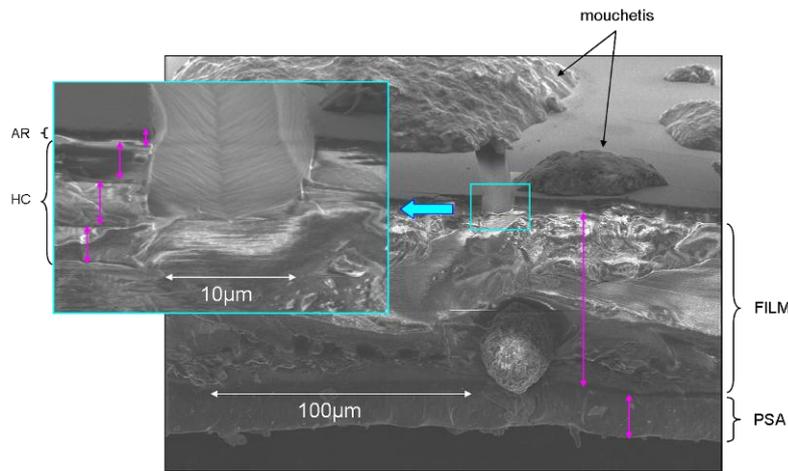


Photo V-3 : Cliché MEB d'un film et du mouchetis

Enfin, à cette étape de l'étude du report, le retour sur l'ensemble des exigences à satisfaire et plus particulièrement la prise en compte des aspects de coût de fabrication nous a conduits à reconsidérer cette opération de report sur lentille brute. Le film pixellisé commençait à être fabriqué de façon pré-industrielle sur des surfaces plus grandes pour abaisser les coûts de fabrication. Le support de fabrication du film pixellisé initial - le wafer en silicium de 10 cm de diamètre - a été remplacé par une dalle en verre d'écran LCD de 19 pouces de diagonale ce qui permet de fabriquer le film pixellisé à plus grande échelle. Pour ce premier procédé PIXIS, les disques de film pixellisé adaptés au prototype de report sont donc découpés au diamètre de la bague de maintien choisie (de 80 à 90 mm) dans la surface de la dalle, et les parties débordantes des lentilles après report sont détournées et perdues.

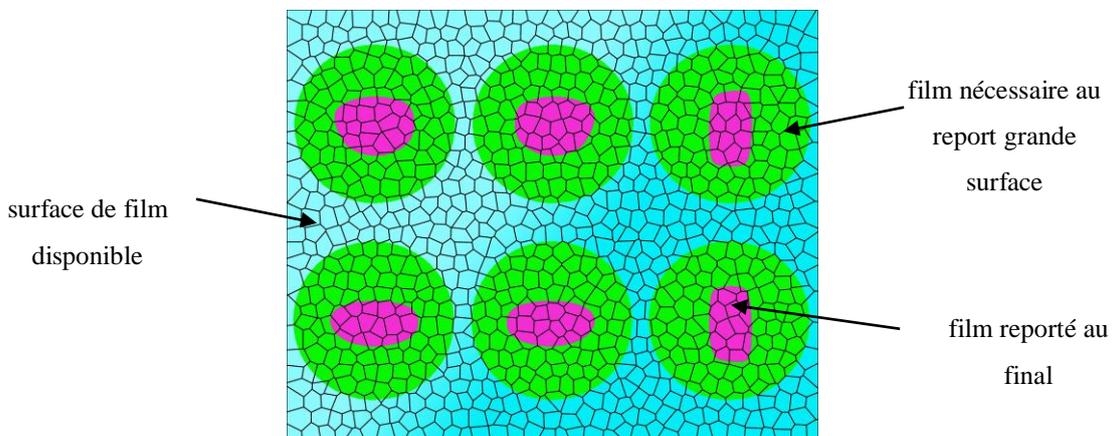


Figure V-23 : Surface de film pixellisé utilisé avec le procédé « grande surface »

Dans ces conditions, continuer à consommer beaucoup de film fonctionnalisé à très

forte valeur ajoutée, avec ce principe de report sur lentille brute avec ensuite détournage au gabarit du verre souhaité, constituait un gaspillage manifeste qu'il fallait éviter. Pour donner un ordre d'idée, une dalle de 19 pouces ne permet de réaliser que six reports de type "grande surface" (voir Figure V-23), autrement dit, elle ne fournit de matière que pour trois paires de lunettes. Dès lors, l'un et l'autre des inconvénients du report dit de « grande surface » que nous venons de mentionner et qui valent aussi bien pour le procédé PIXIS-A que pour MARS, à savoir le coût prohibitif et la grande déformation incompatible avec les verres à petits rayons de courbure (approchant les 8 % pour la correction de +6.00), nous ont tout naturellement obligés à nous fixer un nouvel objectif : il s'agissait pour nous de nous lancer le défi de reporter directement des patchs de film pixellisé maintenant prédécoupés au gabarit de la surface du verre détourné, autrement dit de mettre au point le report dit de « petite surface ». L'exposé de ce travail fait l'objet du sixième et dernier chapitre qui suit.

Chapitre VI

Le report de deuxième génération dit de « petite surface »

Ce dernier chapitre présente une amélioration du procédé consistant à reporter non plus un disque de 10 cm de diamètre mais un patch de film pixellisé qui est prédécoupé au gabarit du verre de lunettes. Nous verrons que, dans cette évolution, la complexification du procédé pourra être largement compensée par un avantage induit très intéressant au plan de la minimisation de la déformation du fonctionnalisé après l'étape du report.

1. Le film pixellisé prédécoupé sous forme de patch

Le film pixellisé est issu de technologies sophistiquées et représente un composant à forte valeur ajoutée. Face aux exigences en termes de coûts de production qui sont aussi renforcées par la recherche de la minimisation du taux de déformations, il apparaît que le report de première génération, dit de « grande surface », n'est pas satisfaisant.

Une solution pourrait être de parvenir à reporter un film aux dimensions proches de celles du verre déjà détourné. En effet, travailler à partir d'un film pixellisé prédécoupé au gabarit du verre nous donnerait tout d'abord la possibilité d'économiser une grande partie du

film fabriqué : il suffit de comparer la Figure V-23 avec la Photo VI-1 suivante pour se rendre compte qu'il serait possible de réaliser entre 5 et 10 fois plus de reports pour une même surface de film pixellisé initiale produite.

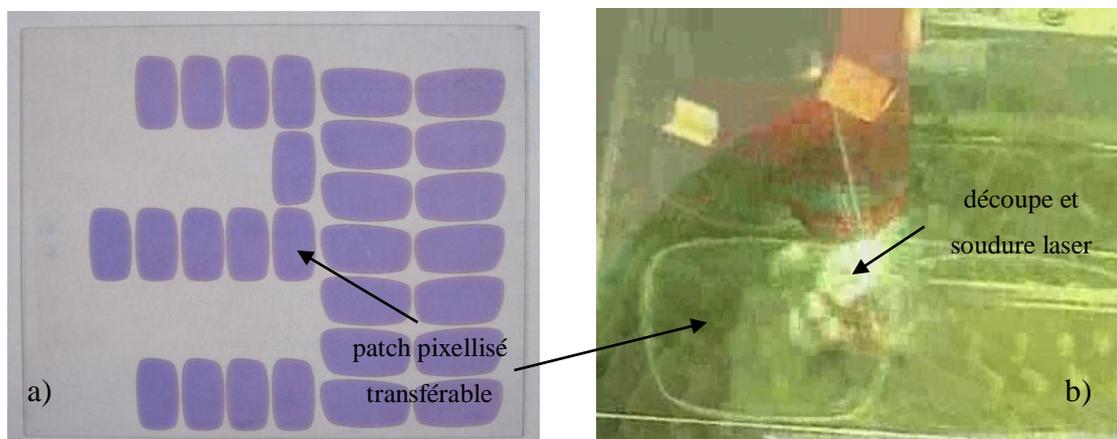


Photo VI-1 : a) Dalle de verre de 19 pouces et patches « petite surface » de film pixellisé prédécoupés

Photo VI-2 : b) Découpe laser du film pixellisé en patch au gabarit du verre hôte

La mise en place d'un procédé laser, représenté en Photo VI-2, permet de façon simultanée la découpe du patch au gabarit souhaité et son renforcement par la soudure de sa périphérie.

Réduire les dimensions du film permettrait également de réduire d'autant les déformations et de sauvegarder ses propriétés intrinsèques. Pour réussir à procéder au report d'un tel patch, autrement dit un report « petite surface », nous avons été amenés à faire évoluer notre procédé de mise en forme et à faire subir certaines adaptations au prototype PIXIS.

1.1. Adaptations nécessaires du prototype PIXIS au report petite surface

Avec la volonté de reporter des patches de petites dimensions sur des verres détourés, nous nous sommes heurtés à deux difficultés. La première concernait le maintien et le centrage d'un verre détouré sur le support de verre du prototype. Ce support est prévu pour accueillir des verres ronds de diamètres fixes de 75 mm, 70 mm ou 65 mm or ici le verre qui doit recevoir le film fonctionnalisé est un verre détouré. Le nombre de modèles existants sur le marché est illimité. Le prototype PIXIS n'est pas adapté pour maintenir ce type de verres. Nous avons donc du concevoir un adaptateur « universel » qui s'adapte au support de PIXIS

et qui maintient le verre pendant le procédé de report. La base de ce support est constituée d'un verre classique de 65 mm de diamètre – compatible avec PIXIS – sur lequel nous avons fixé une ventouse de 20 mm de diamètre. Nous avons vu que le collage du verre contre le film est amorcé au centre du verre et film en se propageant vers leur bord. Il est donc important de placer le centre du verre et celui du film sur le même axe. Pour cela nous avons inscrit une croix sur la ventouse en guise de repère d'alignement. La même croix est marquée sur la face concave du verre avant son détournage de façon à conserver le centre du verre d'origine qui ne correspond pas à celui du verre détourné. De cette manière, le verre détourné peut être positionné de façon simple sur son nouveau support.

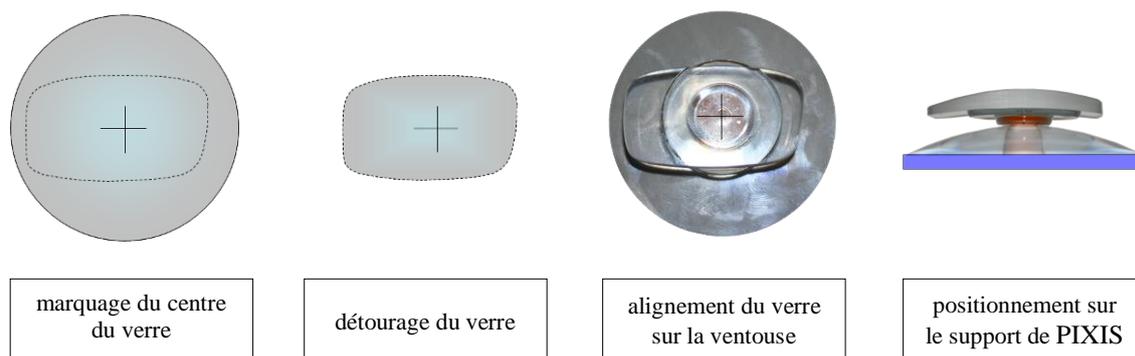


Figure VI-1 : Principe et dispositif de montage du verre détourné sur le prototype PIXIS

La seconde difficulté était le maintien du patch entre l'enceinte d'étanchéité et la bague, car le prototype étant prévu pour reporter des films aux dimensions du wafer en forme de disque initial. Le report d'un film fonctionnalisé détourné au gabarit du verre n'est pas possible directement par la méthode « grande surface » décrite dans le chapitre précédent : En effet le patch à reporter est trop petit et surtout avec une géométrie qui n'est plus celle d'un disque régulier pour être maintenu de façon étanche avec les outils de thermoformage existants. Il est clair aussi que le très grand nombre de gabarits disponibles (ou possibles) ne permet pas d'imaginer un support adapté à chaque modèle.

1.2. Propositions de nouveaux procédés de mise en œuvre

Nous avons donc pensé à maintenir le patch et conserver les outils de thermoformage existant en utilisant une membrane auxiliaire comme adaptateur.

1.2.1. Une membrane auxiliaire complémentaire

Nous avons tout d'abord greffé sur le bord du patch un film complémentaire dans le but de reconstituer la surface de 10 cm de diamètre nécessaire au procédé de thermoformage développé précédemment. Le film support est de même nature que le substrat du film pixellisé afin d'obtenir un assemblage possédant la même propriété thermomécanique d'un film pixellisé de grande surface. Ce film auxiliaire est découpé en son centre à la forme du patch puis ils sont collés entre eux à l'aide d'une colle époxy sur une zone de contact d'environ 1 mm (voir Figure VI-3). Par ce moyen, il devient possible de reporter un patch avec PIXIS et les différents reports que nous connaissons jusqu'à présent. Par la suite le patch doit encore être découpé à la forme du verre. L'intérêt de ce système réside dans le fait que très peu de film pixellisé est perdu lors du report : seule la partie détournée ayant servi pour le collage avec le film de support est jetée.

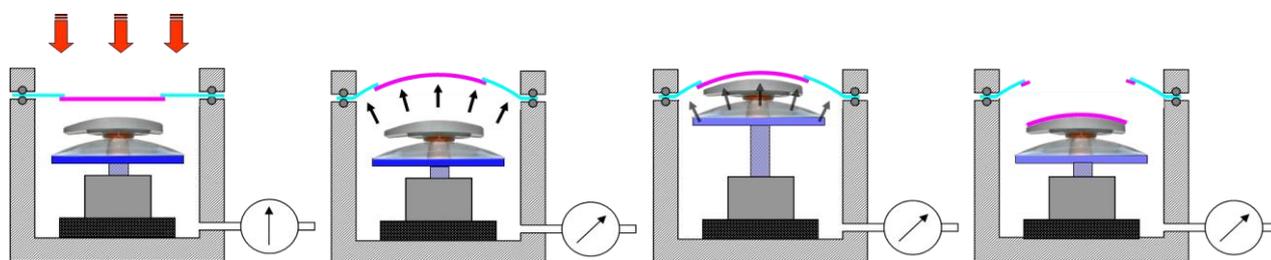


Figure VI-2 : Les étapes du report d'un patch à l'aide d'un film complémentaire

Mais ce procédé présente des inconvénients :

- les mesures de déformations ne montrent pas d'amélioration du taux de déformation qui, par gonflement, sont similaires aux mesures de déformations d'un film pixellisé de grande surface. L'étirement de l'assemblage est de même nature biaxiale.
- il présente des difficultés de préparation de l'assemblage film support / patch. L'assemblage du patch sur le film avant le report n'est pas évidente (découpage du film support et son collage sur le patch). Il pourrait être intéressant de prolonger cette étude en développant le principe de maintien du patch sur ses bords, en particulier avec l'utilisation de films supports de natures différentes et avec l'étude de l'influence de la rigidité et/ou de l'élasticité des films sur la déformations du patch. Cependant, la complexité qui subsisterait dans la mise œuvre de cette technique ne nous a pas incité à poursuivre dans cette voie.

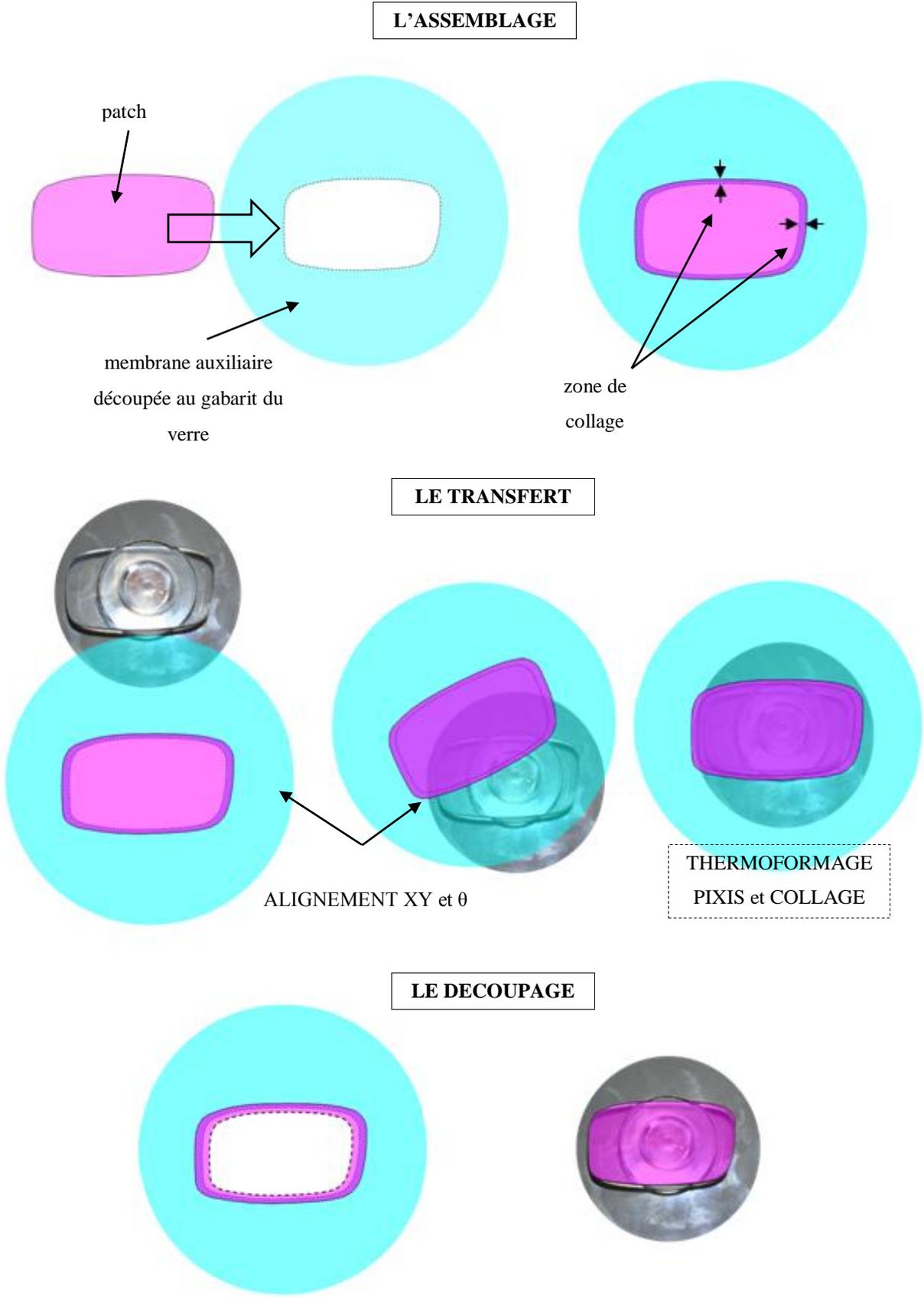


Figure VI-3 : Les étapes du report petite surface avec une membrane auxiliaire complémentaire

1.2.2. Une membrane auxiliaire composée de deux films

Nous avons cherché à nous affranchir des étapes de découpage du film auxiliaire et du collage du patch contre celui-ci en plaçant le patch entre deux films déformables puis de thermoformer l'ensemble. Le système présenté en Figure VI-4 consiste plus précisément à placer le patch entre l'adhésif PSA (sous le film bleu) et le film de protection en PET (en vert) d'un film ARclear 8796. Cette opération est conduite en retirant le film protecteur du ARclear, puis en laminant le patch sur le film protecteur et la partie PET/PSA du ARclear sur l'ensemble.

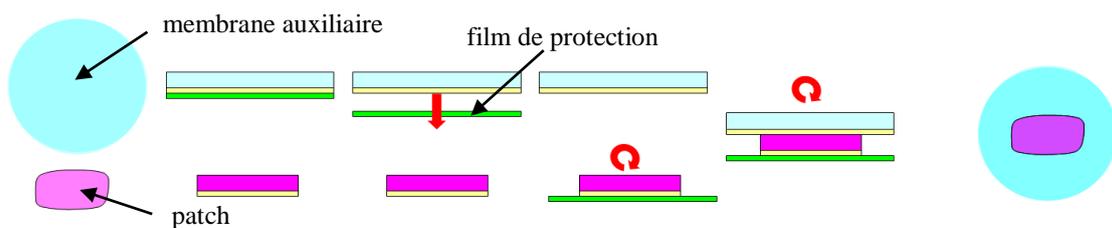


Figure VI-4 : Mise en place du patch entre les membranes de déformation

L'épaisseur du film bleu est choisie pour avoir une rigidité au moins égale à celle du patch. Ainsi, l'ensemble est thermoformable par gonflement tel qu'il est décrit dans le procédé PIXIS-A. Avant le collage du patch sur le verre, il faut encore enlever le film de protection qui, rappelons le, n'adhère que très légèrement.

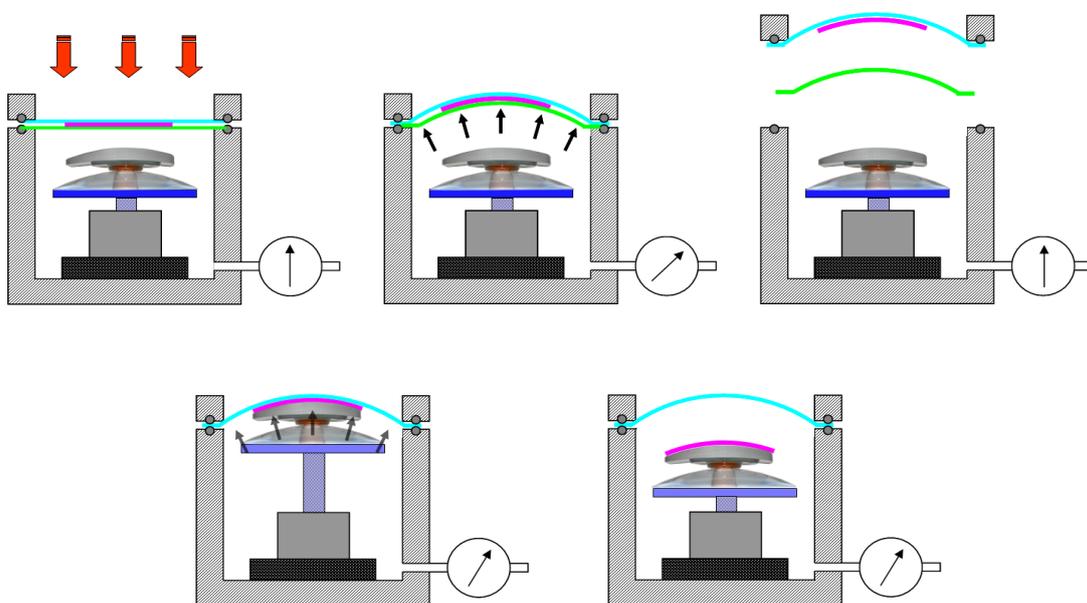


Figure VI-5 : Les étapes du report d'un patch placé entre deux films déformables.

Cette méthode nous a effectivement permis de procéder au report de patches au gabarit du verre détourné. Cependant ce procédé a un inconvénient majeur : celui du retrait du film inférieur entre l'étape de gonflement et l'étape de collage. Le retrait du film inférieur alors qu'il est bombé a tendance à plier voire à retourner le film supérieur et le patch. Ces plis laissent alors des marques irréversibles à la surface de l'adhésif qui doit assurer le collage conformal du patch sur le verre. Le retrait du film inférieur n'est compatible qu'avec les procédés de mise en œuvre qui dissocient la déformation du collage. Les procédés qui regroupent ces deux étapes – comme le report par emboutissage – ne sont bien évidemment pas compatibles car il n'est pas possible d'enlever le film inférieur.

N'étant pas parvenus à reporter correctement le patch à la surface du verre, nous n'avons pas mesuré ses déformations du patch et des films auxiliaires qui sont similaires à un report de type « grande surface ». Nous n'avons donc pas retenu ce procédé de report.

1.2.3. La membrane auxiliaire de maintien

Nous avons alors cherché à maintenir le patch uniquement par le film supérieur, de façon provisoire tout en lui laissant la liberté de glisser en cisaillement, à l'interface sphérique pendant le gonflement entre le patch et le dispositif support qui est donc le film supérieur. Un tel maintien peut s'obtenir en plaçant une couche intermédiaire entre le patch, ce que nous appellerons la membrane auxiliaire afin de permettre le déplacement du patch par rapport à son support. Ce type de report correspond au type PIXIS D que nous avons détaillé dans le chapitre 2. Dans la Figure VI-6 nous reprenons le procédé en y ajoutant l'interface de glissement, représentée en bleu entre le patch et le film de déformation.

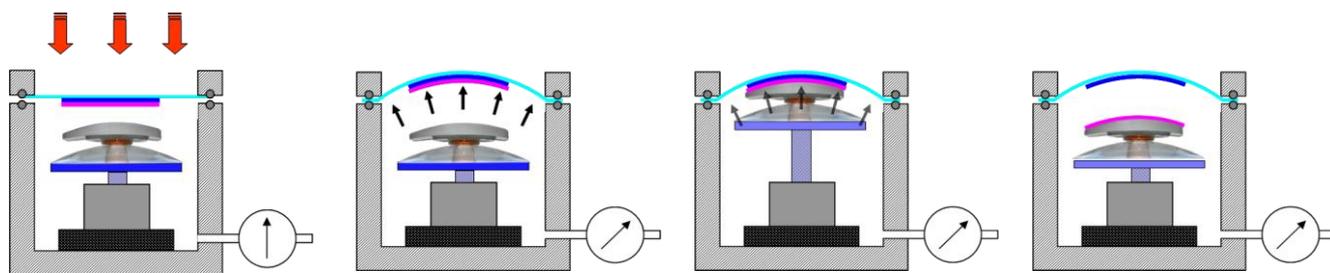


Figure VI-6 : Les étapes du report d'un patch par glissement sur un film déformable.

Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre consacré aux propositions de procédés de

reports, deux possibilités s'offrent à nous pour le maintien du patch sur la membrane auxiliaire dans le cas du report petite surface : soit l'utilisation d'une interface liquide directement entre le patch et la membrane – l'adhésion étant assurée par les force capillaires qui s'exercent sur le liquide – soit le recours à une interface solide mais qui donc, si elle n'est pas suffisamment résiliente n'autorise qu'un glissement faible.

C'est ce procédé qui nous a paru le plus prometteur et que nous avons retenu, pour les raisons que nous aborderons par la suite.

1.3. Préparation du patch avec recours à une interface

1.3.1. L'interface liquide

Les simulations du chapitre 2 montrent que l'utilisation d'un film liquide semble plus avantageuse en termes de déformations. Nous avons utilisé le Melinex 506 comme film de support, car nous connaissons bien désormais ses propriétés mécaniques, et de l'huile comme liquide de maintien pour sa température d'ébullition compatible avec le procédé de thermoformage et sa viscosité relativement élevée. La mise en œuvre d'un tel assemblage est relativement simple car il suffit d'étaler, l'huile entre le patch et la membrane par laminage comme le montre la Figure VI-7.

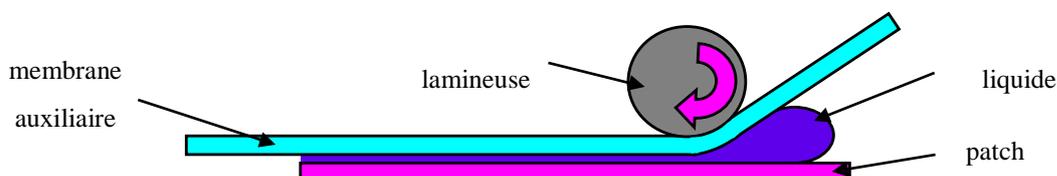


Figure VI-7 : Préparation de l'assemblage patch/matrice avec une interface liquide

En pratique, l'utilisation d'un liquide n'est cependant pas très satisfaisante pour deux raisons :

- Le plus souvent nous salissons les verres et l'adhésif PSA situé entre le verre et le patch lors des reports.
- le maintien du patch contre le film peut s'avérer être aléatoire lors du thermoformage, ceci en particulier dans les cas où le film liquide n'a pas parfaitement mouillé (bulles,

poussières) mais aussi lorsque les géométries les plus bombées sont utilisées ce qui peut provoquer un décollement spontané du patch de la membrane.

1.3.2. L'interface solide

L'interface solide que l'on veut aussi « glissante » que possible doit être un film qui présente les caractéristiques suivantes :

- la face inférieure doit adhérer provisoirement au patch pendant l'étape de report et doit pouvoir se décoller du patch sans l'endommager,
- la face supérieure doit permettre un équilibre entre tenue en traction et glissement en cisaillement avec le film auxiliaire déformable de report,
- ses propriétés mécaniques doivent minimiser autant que possible la déformation du patch, l'objet dont on veut préserver les caractéristiques initiales.

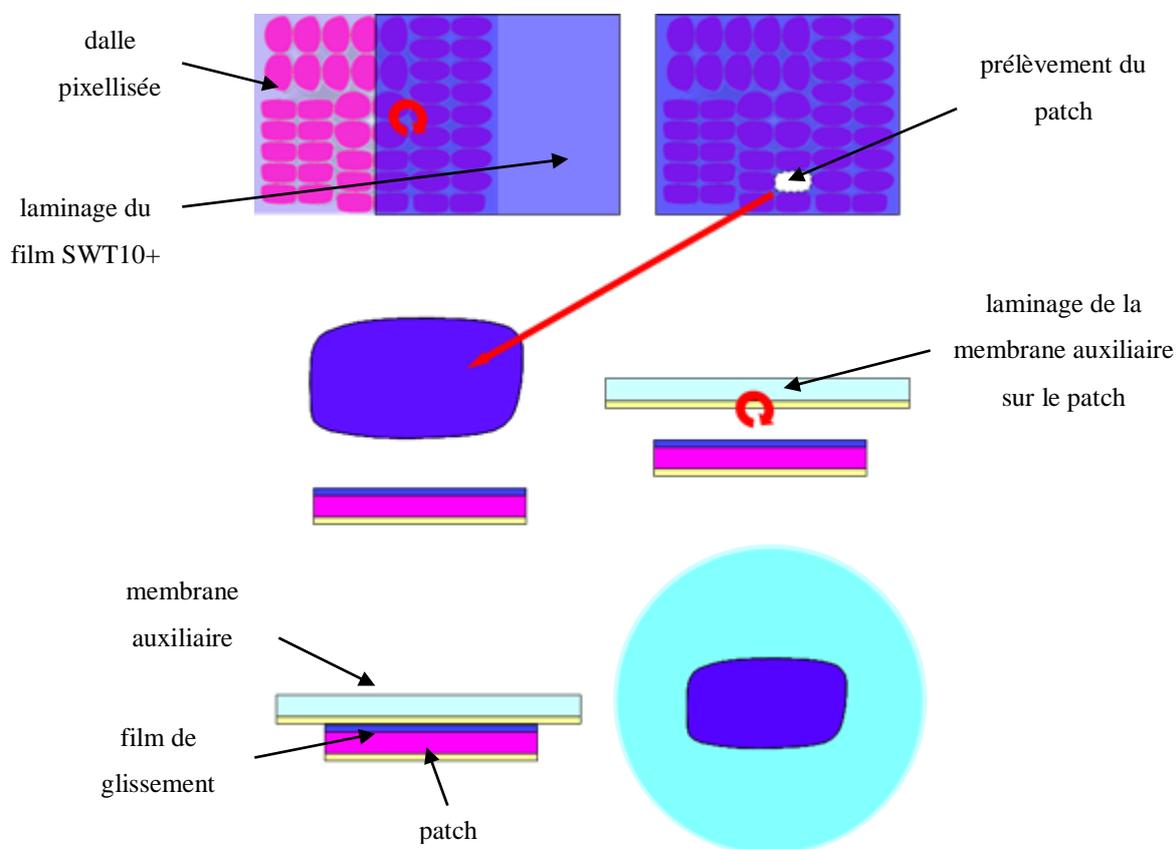


Figure VI-8 : La mise en place de l'assemblage permettant le glissement du patch.

Le film SWT10+ de la société *NITTO DENKO* répond à ces impératifs. Ce film est en

général utilisé pour la protection de composants électroniques lors de l'étape de découpe. D'une épaisseur de 70 μm , il est composé de PVC sur lequel est enduit un adhésif PSA.

L'utilisation d'un tel film adhésif a pour avantage, par rapport au liquide, de pouvoir être laminé sur l'ensemble du film pixellisé et d'être découpé au même moment que le patch. Une dernière étape est alors nécessaire pour obtenir un assemblage compatible avec PIXIS : le laminage d'un film ARclear-8796 sur le patch.

1.4. Récapitulatif des différentes étapes du procédé retenu

Pour illustrer la procédure de report de patches dans son ensemble, nous avons choisi de montrer les différentes étapes du report d'un patch en PET à la géométrie du logo *ESSILOR*. Ces étapes sont représentées sur la Figure VI-9 :

- L'étape 1 du report « petite surface » consiste à coller, de façon provisoire, le film de glissement PVC par laminage à la surface du film à reporter (photo a) ;
- L'étape 2 est la découpe du film au gabarit souhaité (ici le logo *ESSILOR*). La membrane auxiliaire est positionnée dessus (photo b) ;
- L'étape 3 est le report du patch par le thermoformage selon PIXIS D avec le thermoformage et le collage de l'ensemble patch et matrice (photo c) ;
- L'étape 4 est le retrait de la membrane auxiliaire par simple pelage. Selon la géométrie du patch et du verre, il peut s'en suivre une étape de détournage du verre ou de l'ensemble du système.

Nous montrons, par la même occasion, que le report d'un patch sur le verre de lunettes tel qu'il est maintenant envisagé ne se réduit pas au seul report d'un patch sensiblement identique à la géométrie du verre ; il offre en effet dans le même temps la possibilité de reporter des patches de formes originales.

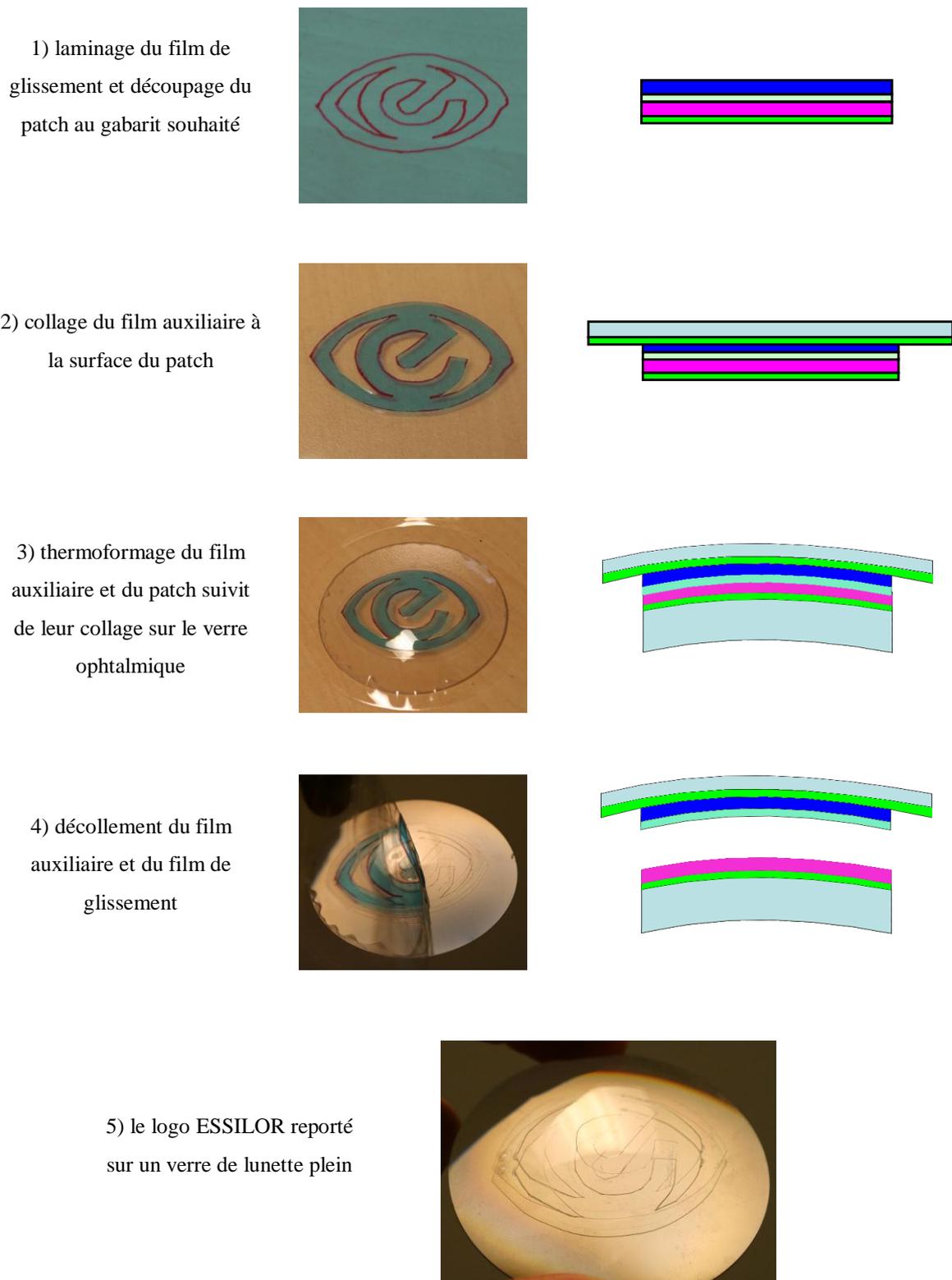


Figure VI-9 : Illustration des étapes du procédé de report « petite surface » : report du logo *ESSILOR*

1.5. Le phénomène de glissement entre la membrane auxiliaire et le patch

L'utilisation d'huile comme interface entre le patch et le film auxiliaire ne nous permet pas d'observer directement le phénomène de glissement. Nous verrons plus tard que ce glissement liquide existe en étudiant la déformation du patch et de la matrice. En revanche, en réalisant les reports avec un glissement solide, nous observons directement ce phénomène car le PSA de la membrane auxiliaire garde la marque de la position initiale du patch.

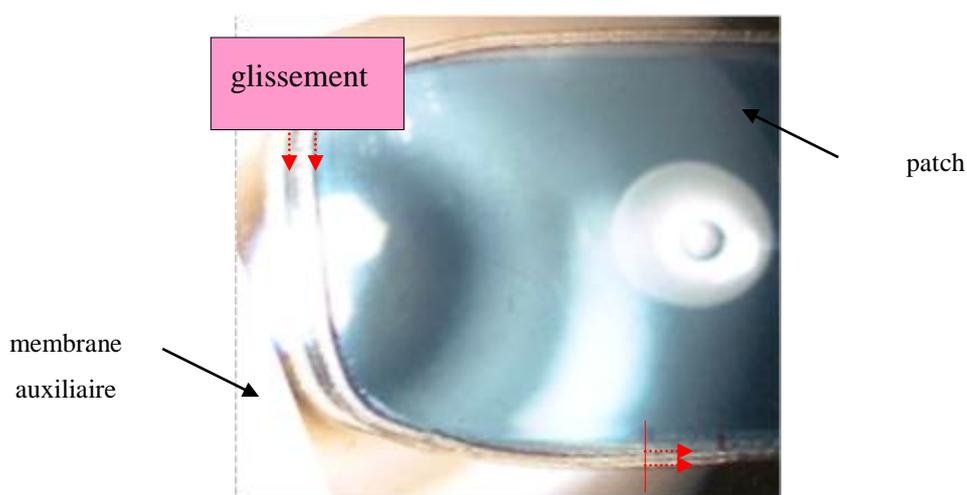


Photo VI-3 : Observation du glissement du patch par rapport au film auxiliaire.

La photo ci-dessus représente le report d'un patch de 55 mm de longueur pour 32 mm de largeur sur un verre +6.00 plein. On distingue clairement une zone d'environ 2 mm sur la longueur et 1 mm sur la largeur qui correspond à un glissement. Cette zone apparaît lors de l'étape de thermoformage du patch et de sa matrice. Plus le gonflement de la matrice est important et plus cette zone est étendue. Si cette zone de glissement apparaît cela signifie que la matrice et le patch ne sont pas étirés de façon cohésive et donc qu'ils ne se sont pas déformés de la même façon. Par ailleurs on voit bien à partir d'une mesure simple et rapide que ce glissement estimé à 2 mm de part et d'autre du patch reporté représente une différence d'élongation de l'ordre de 8 %. Or nous avons vu dans le chapitre précédent que la déformation « grande surface » d'un même film était de cet ordre de grandeur. Il semble donc bien que le patch ne se soit pratiquement pas étiré malgré une mise en forme sphérique. Afin de mieux comprendre ce phénomène de glissement, nous avons réalisé une campagne de reports et de mesures des déformations du patch et de son support.

1.6. Les défauts observés des reports « petites surfaces »

Nous observons différents défauts provenant du report « petite surface ». Les mêmes défauts que nous avons rencontré avec le report « grande surface » réapparaissent avec le report « petite surface » tels que l'emprisonnement de poussières entre le patch et l'adhésif. Nous sommes aussi toujours confronté à l'emprisonnement de bulles d'air lorsque le patch trop déformé est collé à la surface du verre. De même si le patch reporté n'a pas été assez déformé ou si le patch n'a pas été assez chauffé de façon à relaxer sa composante élastique avant le report, l'assemblage tiendra un certain temps avant de se détacher du bord vers le centre de la lentille. Nous avons également recensé de nouveaux défauts propres au report « petite surface » :

- *la dentelle*

Les patches de très grand gabarit ont tendance à se détacher spontanément de la membrane auxiliaire au moment du gonflement. La Figure VI-10 est une mesure des déformations principale et secondaire d'un patch déformé avant d'être reporté sur un verre stylis +6.00. Le patch s'est décollé de sa membrane auxiliaire en formant des plis en plusieurs endroits. Ces plis correspondent aux zones qui ressortent nettement sur la déformation secondaire du patch. Ces mesures montrent que le patch s'est allongé de façon homogène d'environ 0,5 % sur sa déformation principale. La déformation secondaire est une contraction qui est de -0,5 % au centre et de -1,5 % au bord, et atteint la valeur de -3 % dans les zones où se sont formés les plis.

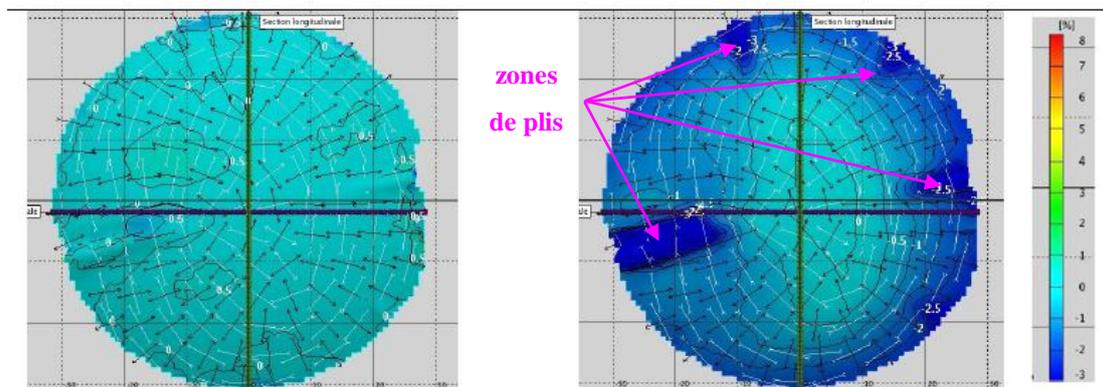


Figure VI-10 : Mesures de déformations principale et secondaire d'un patch plissé.

La déformation de patch de grand gabarit semble imposer au film une compression limite située autour de 2 % qu'il ne peut encaisser et le patch aurait tendance à flamber plutôt qu'à se comprimer.

- ***bulles en périphérie du report***

Un autre défaut apparaît avec le report « petite surface ». Des petites bulles sont emprisonnées et visibles à la périphérie du report. Ces défauts sont observables sur la Photo VI-4 qui est une vue du patch reporté avec la membrane avant le retrait de cette dernière.

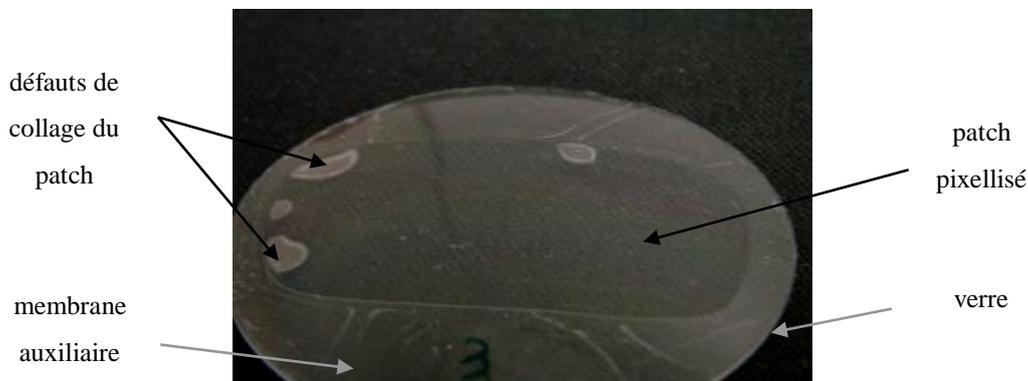


Photo VI-4 : Défauts de collage observés au bord de l'assemblage.

La présence de ces bulles pourrait être causée par la découpe et soudure simultanée par laser du patch au gabarit du verre. Cette étape engendre un petit bourrelet au bord du patch et empêche peut-être localement une bonne déformation et/ou un bon collage du patch sur la lentille. Une solution technique existe pour faire disparaître ces bulles et consiste à imposer des hautes pressions à l'assemblage en autoclave.

- ***le délaminage du film pixellisé***

Un dernier défaut que nous n'avons pas remarqué lors d'un report « grande surface » est un phénomène de délaminage du film pixellisé au bord du patch.

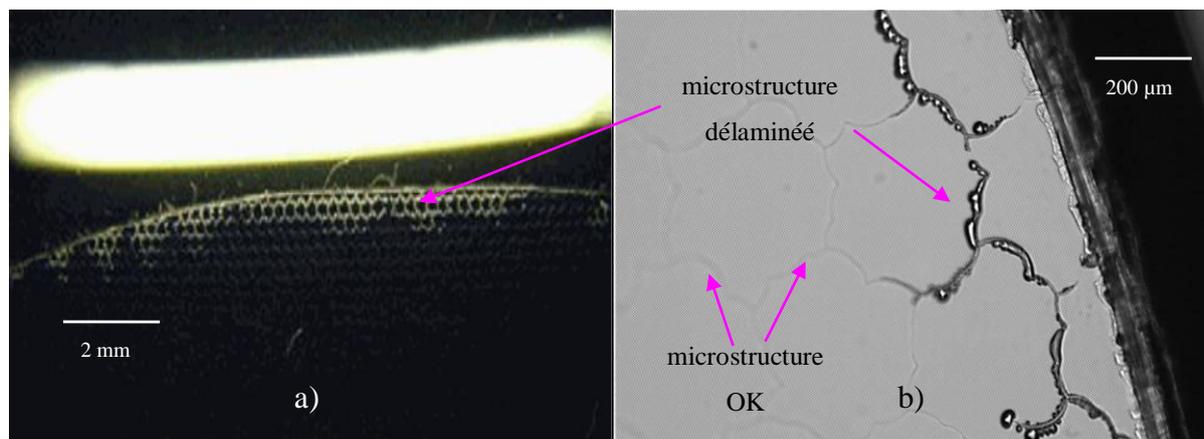


Photo VI-5 : Observations du phénomène de « délaminage », a) référentiel 17 et b) microscope x10

Cette délamination intervient dans le cas où le patch est simplement découpé et non soudé. L'adhésion entre les parois des cuves et les films optiques ne semble alors plus suffisante au bord du patch : le dispositif n'est plus étanche et de l'air se propage depuis le bord.

2. Simulation numérique du report « petite surface »

L'outil de simulation que nous avons mis en œuvre pour analyser le processus de thermoformage de la première génération, dit "de grande surface" (PIXIS-A), a été complété pour tenter d'approcher une transcription aussi fine que possible du processus plus complexe de report de patches prédécoupés. Le principe de l'enchaînement séquentiel des deux phases de simulation thermique et thermomécanique a été bien évidemment conservé : la réponse thermique spatio-temporelle du système complet, composé du patch de la membrane auxiliaire et du joint de maintien lorsque celui-ci est considéré, à un flash de chauffage est prise en compte comme paramètre d'entrée dans la simulation du gonflement. Les spécificités nouvelles que nous avons dû considérer concernent essentiellement les deux points suivants :

- S'agissant du modèle thermique, nous avons, tout comme précédemment, décrit le chauffage des films par une absorption volumique uniforme de la puissance IR irradiée. Notre objectif restait en effet de rendre compte du comportement réellement observé de manière globale au cours du régime transitoire. Pour ce faire, nous avons considéré un contact thermique parfait entre le film auxiliaire matrice et le patch à reporter (conductivité interfaciale très grande égale à $10^6 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$), et des conditions de refroidissement par conduction vers la bague de maintien, par convection et par rayonnement inchangées. Pour approcher le comportement que nous avons observé expérimentalement, nous avons été amenés à considérer une densité de puissance absorbée dans la couche inférieure (correspondant au patch) plus faible que celle définie pour la couche supérieure (matrice). Il est à noter que cet arrangement reste toutefois en accord avec le principe d'une absorption par deux couches empilées présentant des épaisseurs équivalentes. A titre indicatif, pour les exemples de simulation qui seront présentés, les densités de puissance que nous avons mises en jeu pour chauffer l'empilement à $140 \text{ }^\circ\text{C}$ sont respectivement de $2,25 \cdot 10^7$ et de $0,6 \cdot 10^7 \text{ W/m}^3$ dans la membrane auxiliaire et dans le patch.
- En ce qui concerne la description du modèle mécanique et donc du principe même du

gonflement de la structure à deux composantes empilées, les contraintes de notre outil de résolution numérique par éléments finis (logiciel ABAQUS) nous ont obligés à adopter un chargement mécanique selon trois composantes, à savoir un même niveau de pression appliquée sur trois surfaces différentes comme cela est illustré sur la Figure VI-11. En effet, la zone inférieure de la membrane auxiliaire qui est découverte et donc exposée à la surpression de gonflement n'est pas spécifiquement délimitée dans la description géométrique de la structure. Par ailleurs, la frontière qui définit cette zone peut se déplacer au cours du gonflement en raison du glissement du patch sur sa matrice. Dans ces conditions, l'adjonction d'une composante de correction appliquée sur la face arrière du patch (pression opposée) suffit pour neutraliser la pression appliquée sur la zone masquée de la membrane. Ceci n'est bien évidemment autorisé qu'en vertu de l'hypothèse selon laquelle, dans ce niveau de modélisation, les deux objets – matrice et patch – sont inséparables même s'ils peuvent glisser l'un sur l'autre : le contact est intime, la surface de contact est toujours bien définie puisqu'elle correspond à la face arrière du patch. La réponse au chargement mécanique du système ainsi décrit est bien donnée par la solution d'équilibre entre, d'une part, la pression appliquée sur toute la surface inférieure exposée (matrice + patch) et, d'autre part, la réaction de la matrice, seule à être maintenue sur son bord, au gonflement. Le patch est quant à lui plaqué sur la matrice par la pression de gonflement.

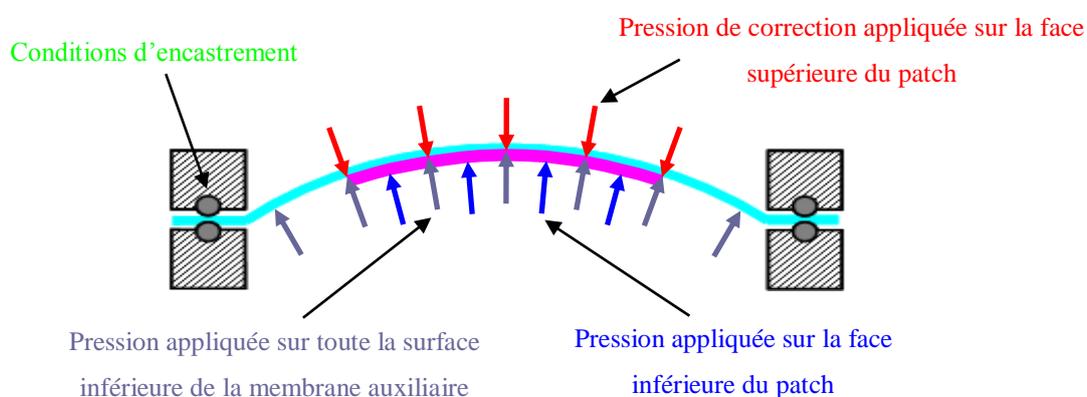


Figure VI-11 : Représentation schématique du chargement en pression dans le modèle de simulation du procédé de thermoformage de "petite surface" (ici, cas particulier du cas du collage par film d'huile c'est-à-dire du contact glissant supposé idéal).

A cette étape de la simulation des principes de thermoformage que nous avons mentionnés et décrits précédemment, nous avons donc été amenés à considérer les deux modes du cas "petite surface", qui se différencient par les moyens de collage mis en œuvre pour maintenir le patch sur la matrice dans la phase initiale de préparation avant la mise en pression de l'enceinte. Le premier suppose un maintien assuré par les forces de capillarité dans un joint liquide de type huile par exemple. Le second est obtenu grâce à un collage sec à température ambiante tel que le permet, par exemple, la présence d'un film intermédiaire PVC / PSA.

- *Cas du collage par film d'huile :*

Comme énoncé précédemment, l'avantage mis en avant d'emblée pour ce type de collage est de permettre de minimiser au mieux les déformations du patch à reporter, puisqu'il autorise le glissement sur la matrice. Compte tenu du niveau des forces en présence au cours de la mise en forme, il ressort qu'en pratique les forces de frottement lors du glissement sont alors beaucoup plus petites que les contraintes en cisaillement imposées, de telle sorte qu'elles peuvent être négligées. Dans la description logicielle du modèle, nous avons donc opté pour le choix d'un contact glissant "sans frottement".

L'exemple de résultats de simulation que nous rapportons ici concerne la mise en forme du modèle du patch CK 533 que nous décrirons avec précision ci-après. Pour les raisons déjà invoquées lors de la description de la simulation numérique du procédé de thermoformage des dispositifs de grande surface (PIXIS A), nous avons à nouveau choisi de ne considérer ici que le film de PET. Ce film est, rappelons le, le support de microcuves contenant des matériaux plus résilients, et de la couche de colle PSA qui, bien que servant à la fixation sur le substrat hôte lors du report, elle présente également une beaucoup plus faible rigidité mécanique et peut être négligée.

Le diamètre de la membrane auxiliaire est ici de 90 mm et son épaisseur est de 75 μm ; l'épaisseur du patch est elle aussi de 75 μm . Les deux films sont composés du même matériau, le PET, présentant les caractéristiques du régime viscoélastique décrites dans le chapitre IV. Les Figure VI-12 et Figure VI-13 rassemblent les résultats numériques obtenus dans le cas d'une déformation réalisée sous assistance thermique à 140 °C et au moyen d'une pression de gonflement de 1 bar :

- Comme attendu, l'amplitude du gonflement de 12,23 mm conserve pratiquement la valeur qui a été relevée dans le cas de la simulation "grande surface" dans les mêmes conditions (chapitre V – paragraphe 2). Ceci démontre que la membrane auxiliaire produit seule la réaction au gonflement (résistance à la tension). Le patch est simplement plaqué contre cette matrice, épouse la forme sphérique qu'elle prend en n'absorbant que très peu d'énergie. Le glissement étant sans frottement, cette énergie correspond au juste nécessaire pour assurer la déformation minimale du patch ;

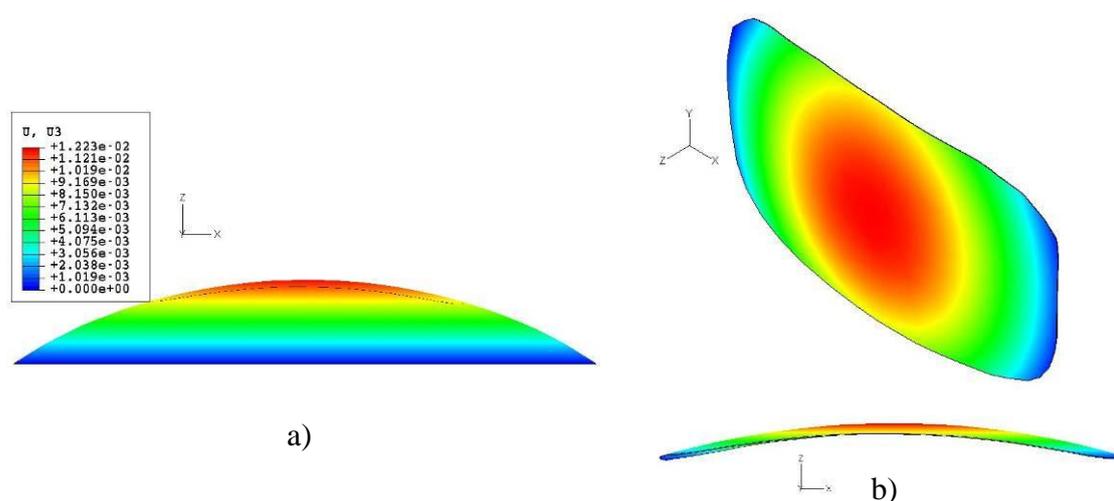


Figure VI-12 : Simulation du thermoformage par gonflement d'un patch prédécoupé au gabarit d'un verre dans le cas du collage glissant ; vues de déformation en z sur la matrice (a) et sur le patch (b).

- Le différentiel entre les déformations de la matrice – de l'ordre de 5,6 % sur pratiquement l'ensemble de la calotte sphérique – et du patch – égale au maximum à 0,36 % – reste aussi équivalent à celui que nous avons déjà observé lors de la simulation simplifiée qui supposait une déformation à froid et ne considérait que le régime de déformation élastique (chapitre II – paragraphe 3.4). Les déformations maximale, intermédiaire et minimale relatives au patch sont, en amplitude, toujours inférieures à 1 %. Les distributions spécifiques de ces paramètres montrent un étirement radial qui est privilégié dans l'axe de la grande dimension du patch, avec un maximum à 0,36 % au centre, un amincissement qui n'excède pas 0,1 % sur la majeure

partie centrale, et enfin une contraction ortho-radiale plus marquée à la périphérie et approchant la valeur de 0,6 % sur les deux bords opposés les plus longs. Ce dernier point est à rapprocher du défaut mentionné précédemment, que nous avons appelé « dentelle » parce qu'il est observé à la périphérie des patches de grandes dimensions. Les simulations correspondantes montrent en effet un accroissement sensible de la contraction ortho-radiale du film à la périphérie qui peut être, dans les conditions spécifiques de notre collage à base de PSA, à l'origine de processus de décollements et de flambements localisés à la périphérie.

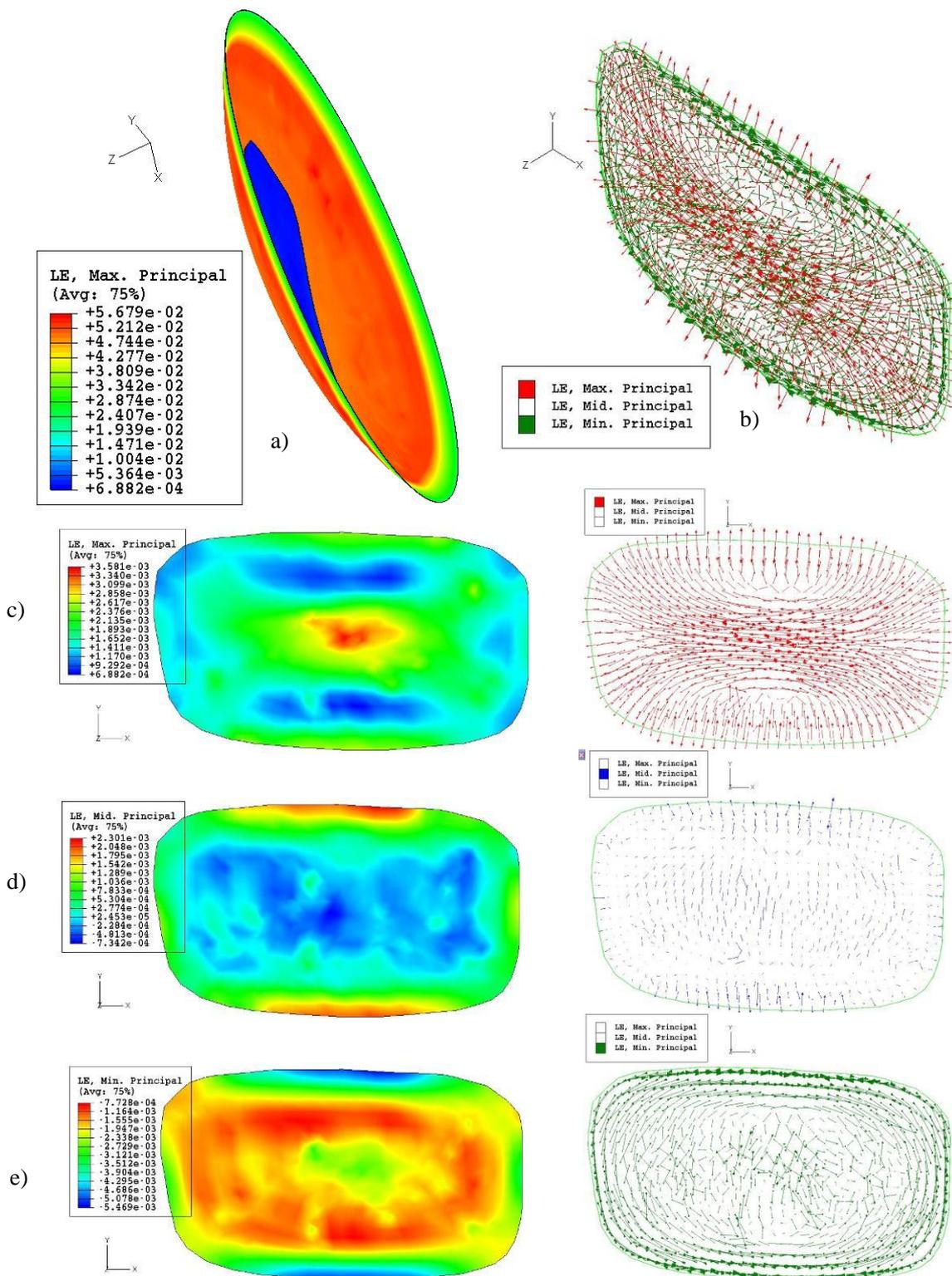


Figure VI-13 : Simulation du thermoformage par gonflement d'un patch prédécoupé au gabarit d'un verre dans le cas du collage glissant ; a) et b) amplitude de déformation maximale sur le patch et sur la matrice ; c), d) et e) représentations des amplitudes et vectorielles des déformations maximale, intermédiaire et minimale respectivement.

- *Cas du collage par film sec :*

Pour la modélisation de la procédure qui met en œuvre un collage par adjonction d'un film intermédiaire, de type PSA par exemple, nous avons rajouté physiquement la couche mince correspondante dans la géométrie qui décrit la structure. La difficulté pour nous ici est la description du comportement rhéologique réel de ce matériau supplémentaire que nous n'avons pas caractérisé. Toutefois, les expériences que nous avons menées utilisant ce principe de collage PSA nous ont suggéré qu'aux températures relativement élevées, de l'ordre de 120 à 140 °C, le matériau atteint la phase liquide qui permet un écoulement aisé facilitant le glissement. Comme nous le verrons dans les prochains paragraphes, les résultats expérimentaux montrent que, dans ce cas également, on se rapproche des conditions du collage "huile" autorisant le glissement sans frottement déjà simulé.

Pour montrer toutefois l'intérêt de notre approche de modélisation pour l'aide à l'optimisation des procédés, nous avons réalisé quelques simulations qui permettent de prévoir le niveau de déformation résiduelle sur le patch auquel on doit s'attendre, ce en fonction du degré de compliance du joint de colle qui sera mis en œuvre. A titre d'illustration ici nous avons considéré des matériaux qui ne diffèrent que par la valeur du module de cisaillement à la température ambiante ; l'impact de la température sur le comportement viscoélastique, qui est traduit par les modulations relatives des modules de conservation G' et de pertes G'' , reste donc lui calé sur celui qui affecte le PET.

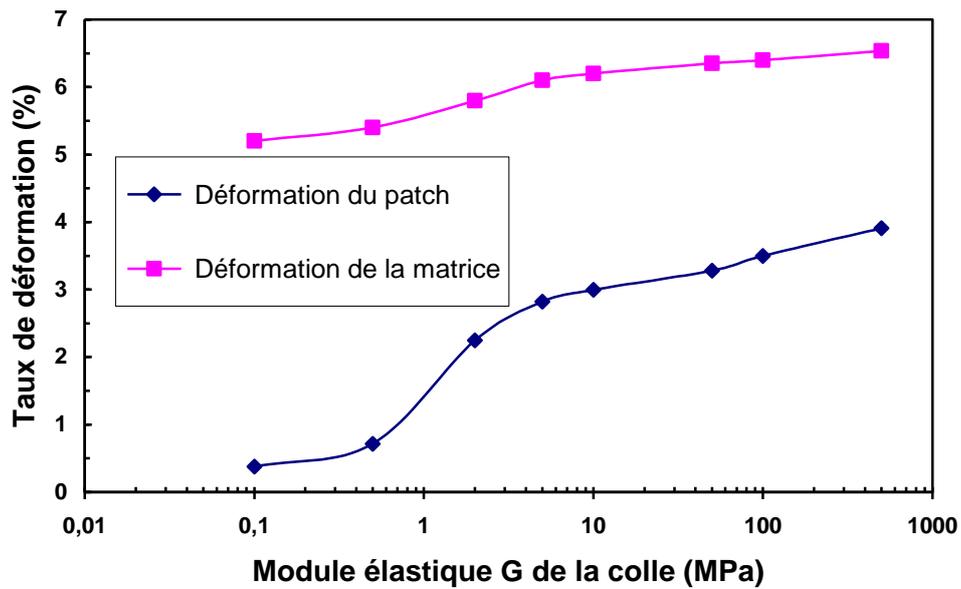
Les temps de calculs maintenant nécessaires pour ce modèle thermomécanique comportant une fine couche supplémentaire susceptible de se déformer très fortement sont très largement augmentés ; ils peuvent dépasser la trentaine d'heures lorsque l'on utilise le même ordinateur de bureau défini précédemment et présentant une CPU fonctionnant à 3,2 GHz et une RAM de 3 Go.

Les Figure VI-14 Figure VI-15 comparent les résultats que nous avons obtenus dans le cas d'un film de colle de 50 μm d'épaisseur et présentant un module de cisaillement dont la valeur à la température ambiante varie entre 0,1 MPa et 500 MPa. Nous avons considéré toutes les autres choses égales par ailleurs (même loi de comportement WLF et mêmes autres couples de paramètres g_i et τ_i décrivant les différents modes de relaxation). Il est très clair que le taux de déformation maximale du patch décroît de manière très sensible dès lors que la résilience du joint croît : on observe en effet que ce taux de déformation est divisé par un

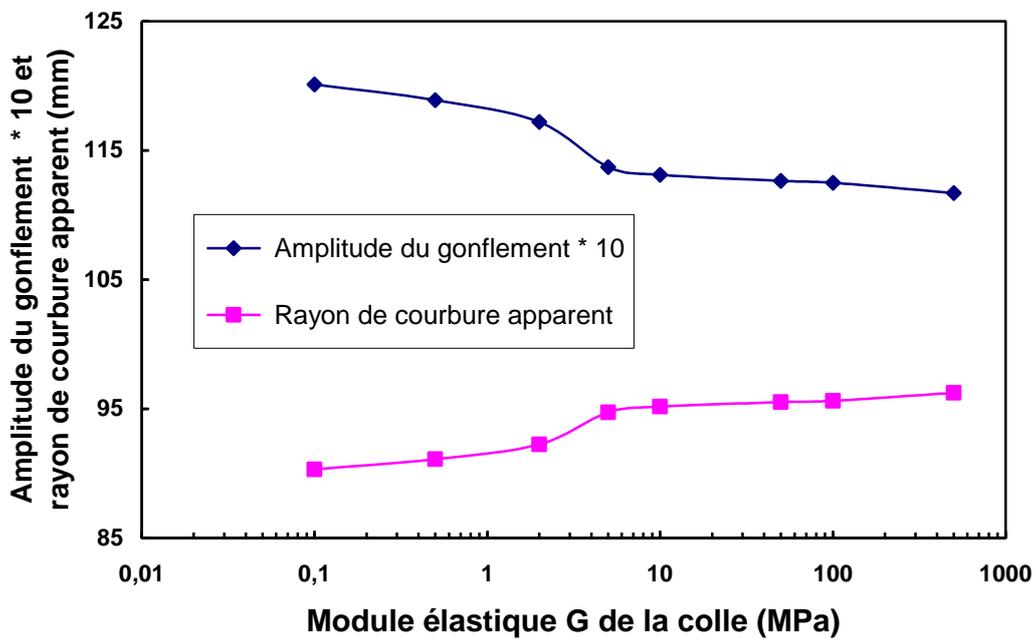
facteur 11 dans le domaine de sensibilité exploré puisqu'il passe d'une valeur de 3,9 % pour $G_{\text{colle}} = 500 \text{ MPa}$ à 0,36 % pour $G_{\text{colle}} = 0,1 \text{ MPa}$. Les diagrammes reportés sur les Figure VI-14 et Figure VI-15 montrant la distribution du taux de déformation maximale sur à la fois la matrice et le patch à reporter permettent de bien observer la présence de la zone de glissement entre les deux films – bande périphérique grise – dans le cas du collage le plus résilient ($G = 0,1 \text{ MPa}$).

Par ailleurs, compte tenu de ce que pour cette étude nous sommes restés dans les mêmes conditions opératoires pour ce qui concerne la pression de gonflement et la température de déformation, on vérifie bien aussi dans cette étude de sensibilité l'impact de la modification concomitante de la réaction de l'empilement "membrane auxiliaire-patch" sur la mise en forme proprement dite : en effet, lorsque le niveau du couplage en cisaillement entre patch et membrane auxiliaire est suffisant (et ceci particulièrement lorsque le module élastique de conservation G' de la colle approche celui du film en PET), nous observons que :

- d'une part l'inhomogénéité structurelle de l'empilement dans la grande dimension (celle de la surface) du disque conduit à une perte de sphéricité,
- et d'autre part le renforcement mécanique qui en résulte induit une amplitude du gonflement moindre. Le rayon de courbure reporté sur la Figure VI-14-b) est ici un rayon apparent calculé simplement à partir du relevé de l'amplitude du gonflement (relation V-3).



a)



b-

Figure VI-14 : Simulation du thermoformage par gonflement d'un patch prédécoupé au gabarit d'un verre dans le cas du collage par film sec ; influence de la valeur à la température ambiante du module élastique du joint de colle : a) amplitudes de la déformation maximale sur le patch et sur la matrice et b) amplitude du gonflement et rayon de courbure apparent.

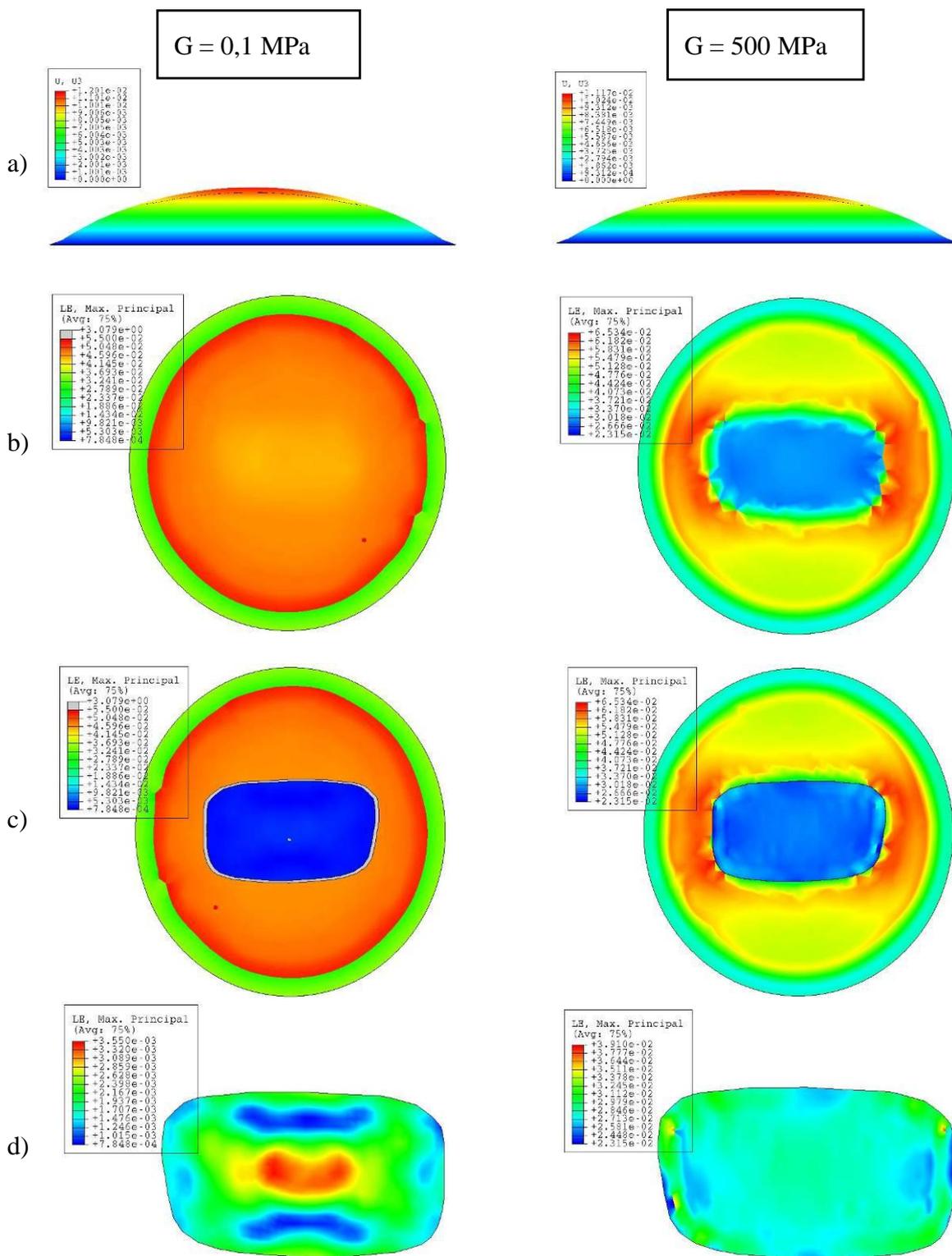


Figure VI-15 : Simulation du thermoformage par gonflement d'un patch prédécoupé au gabarit d'un verre dans le cas du collage par film sec ; influence de la valeur à la température ambiante du module élastique du joint de colle ($G = 0,1 \text{ MPa}$ et $G = 500 \text{ MPa}$) : a) déformations en z, b) amplitudes de la déformation maximale sur la matrice (vues de dessus) ; c) amplitudes des déformation maximales sur le patch et sur la matrice (vues de dessous) et d) amplitudes des déformation maximales sur le patch.

3. Mesures des déformations du patch et de film support

Cette étape de caractérisation nous permet de valider le phénomène de glissement entre la membrane auxiliaire et le film fonctionnel à reporter. Nous avons cherché à mesurer les déformations de la membrane et du patch par la méthode du mouchetis. La mesure simultanée de la déformation de la membrane et du film n'est pas possible car le logiciel de mesure optique n'est pas capable d'interpréter la superposition de deux films mouchetés. Aussi avons-nous procédé à la mesure des déformations en mesurant dans une première expérience les déformations de la membrane auxiliaire lors du report d'un patch sur un verre de 67,8 mm de rayon de courbure, puis la mesure des déformations du patch après son report sur un verre de même type. Le modèle du verre hôte qui a été retenu est le gabarit commercial CK-533 (Figure VI-16). Une fois encore, nous retenons le rayon de courbure extrême de 67,8 mm pour réaliser nos mesures car c'est avec cette géométrie que les déformations seront les plus importantes.

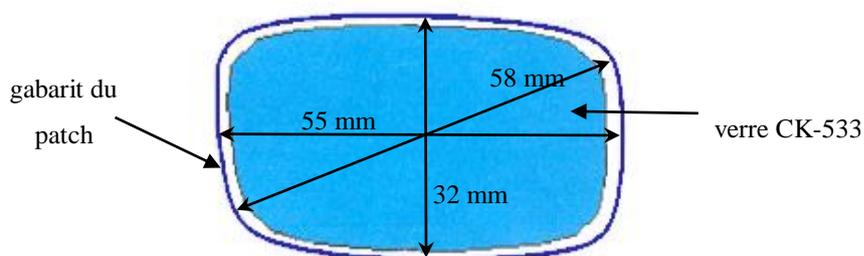


Figure VI-16 : Géométrie du gabarit à partir du verre CK-533

La série de mesures suivante correspond aux mesures des déformations d'un patch de simple épaisseur et de sa membrane – de même épaisseur – et du mode de glissement utilisé.

3.1. Mesure des déformations de la membrane auxiliaire

Nous avons réalisé un assemblage entre la membrane et le patch par contact liquide et un autre assemblage avec l'interface de contact solide. La lecture des mesures est réalisée juste avant l'étape de collage et donne des résultats identiques pour les deux modes de glissement. De même, les déformations obtenues sont comparables aux déformations mesurées lors d'un report « grande surface ». Nous avons réalisé la mesure des déformations de la membrane de maintien lors d'un assemblage par glissement liquide et lors d'un

assemblage par glissement solide.

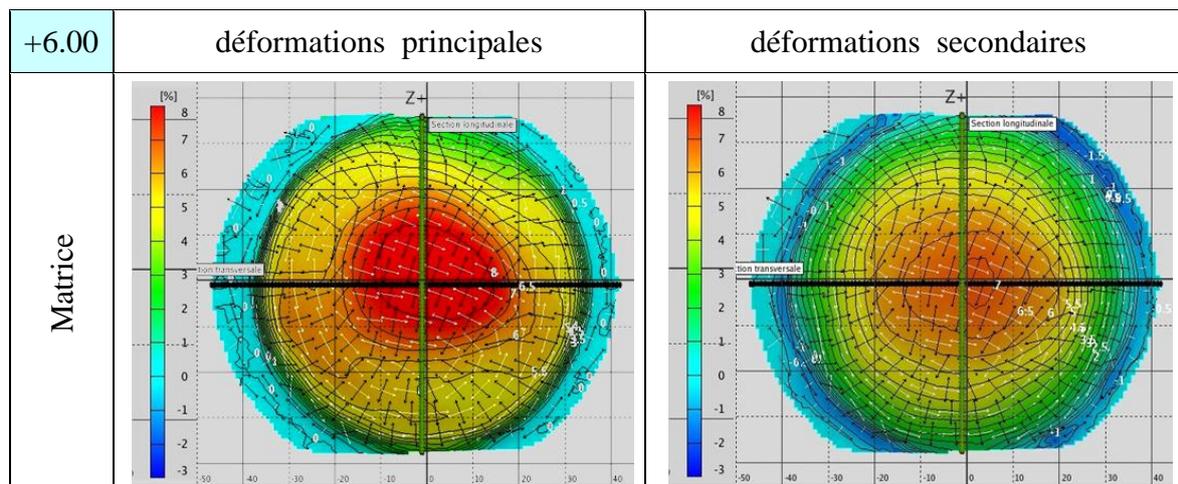


Figure VI-17 : Déformations principales et secondaires de la membrane de PET auxiliaire lors d'un report « petite surface » d'un film pixellisé sur un verre de 67mm de rayon de courbure

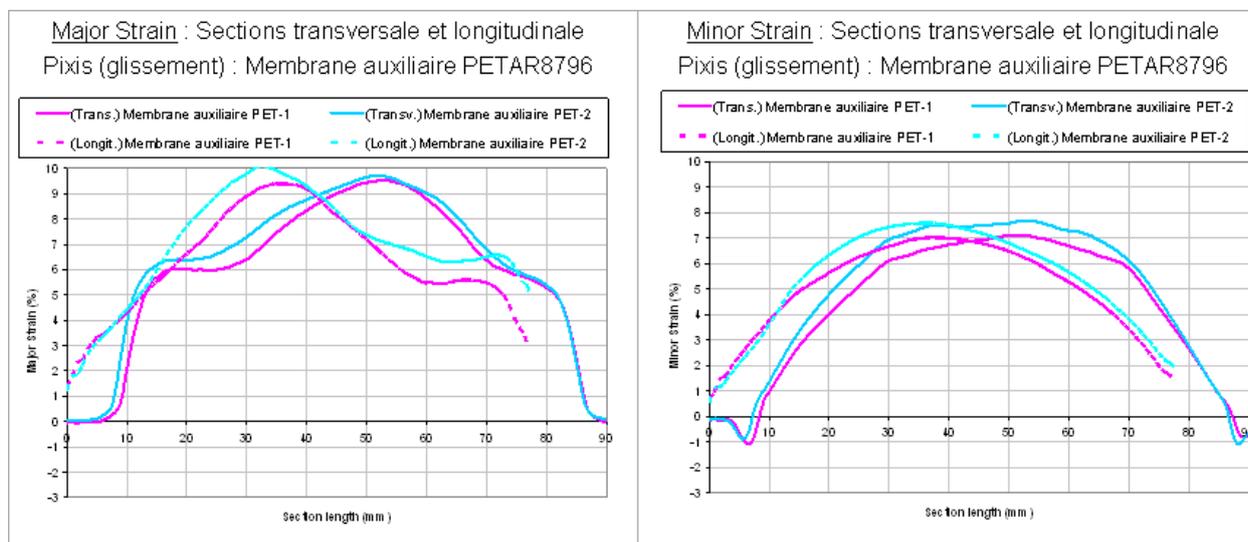


Figure VI-18 : Courbes des déformations principale et secondaire de la membrane de PET dans deux directions perpendiculaires

Nous obtenons des déformations similaires à la déformation d'un film par le report « grande surface » : pour un verre dont le rayon de courbure est de 67mm, la déformation principale mesurée est de l'ordre de 10% et la déformations secondaire de 8%.

Nous pouvons noter que les déformations de la membrane auxiliaire de déformation sont identiques qu'il s'agisse du report d'un patch à l'aide du liquide ou du report mettant en œuvre un film spécifique de glissement.

3.2. Mesure des déformations du patch

Dans un second temps nous mesurons les déformations du patch. Cette fois ci le mouchetis doit être réalisé sous la surface du patch pour ne pas empêcher le glissement.

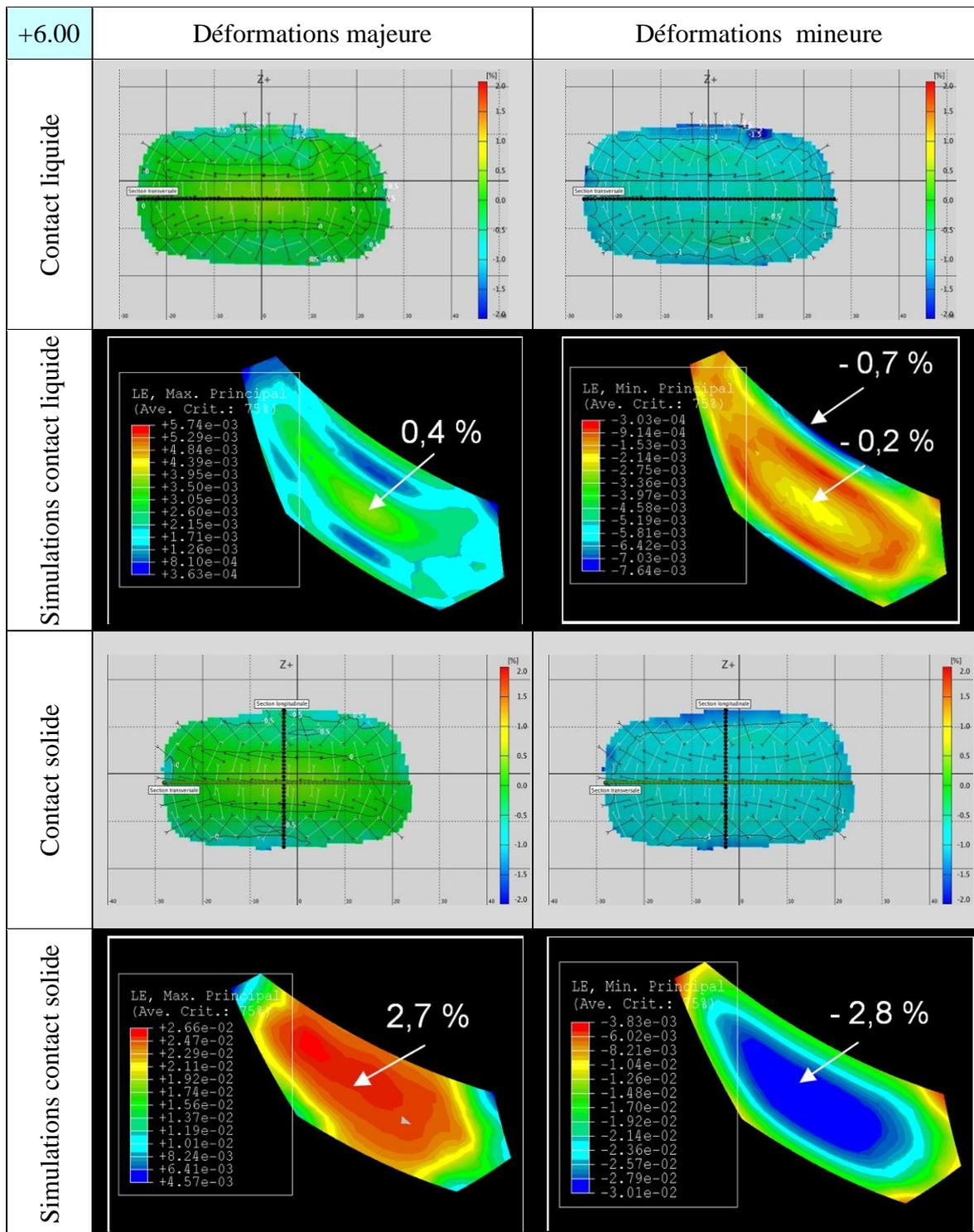


Figure VI-19 : Comparaison des mesures et des simulations de la déformation d'un patch selon le type de glissement utilisé

Or le film que nous utilisons comme patch pour la caractérisation des déformations est le film ARclear-8796 qui a sa face interne recouverte de l'adhésif sensible à la pression et qui ne peut pas recevoir le mouchetis sans altérer ses propriétés. Nous avons reconstitué un assemblage équivalent en plaçant un mouchetis entre le film de PET et l'adhésif PSA. Il est alors possible de reporter le patch moucheté par glissement tout en mesurant ses déformations. Dans le cas de contact liquide, le mouchetis que nous plaçons d'habitude à la surface du film empêche ici la bonne adhérence du patch sur la membrane. Nous avons contourné ce problème en effectuant le mouchetis à l'intérieur du patch et reconstitué l'équivalent du film ARclear-8796 à partir du Melinex 506 et d'un adhésif acrylique PSA de 25 μm .

Le mouchetis de l'expérience glissement solide a été placé entre la surface supérieure du patch et le PSA du film *NITTO*. Dans le cas du second assemblage, le mouchetis a été réalisé à la surface du patch, de sorte que la déformation du film peut être mesurée après le report du patch sur le verre et le retrait de la membrane auxiliaire et du film de glissement. Les mesures obtenues sont conformes aux simulations.

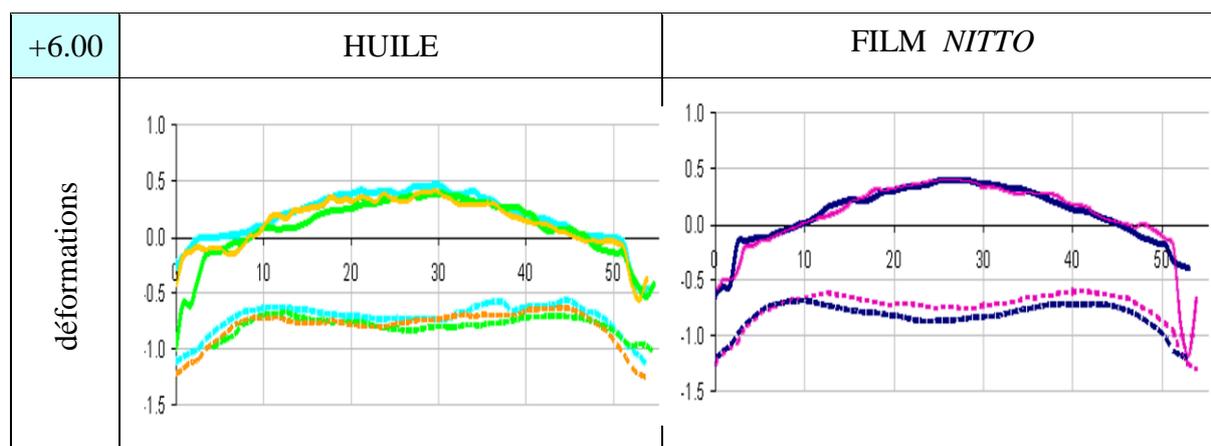


Figure VI-20 : Courbes des déformations selon les type d'interface de glissement utilisé

4. Comportement de films fonctionnalisés au report

Le film pixellisé est un produit haut de gamme et il doit disposer, en tant que tel, de couches antireflets à sa surface. Plus tard, il embarquera aussi une source d'énergie et donc des couches conductrices. Les paragraphes suivants présentent les premiers essais de reports « petites surfaces » de films antireflets ainsi que d'un film conducteur d'électricité.

4.1. Le report de films antireflets

Les reports ont porté sur un film commercial, conçu en particulier pour la fabrication d'écrans plats, et sur le film PET Melinex 506 sur lequel un antireflets *ESSILOR* a été déposé. Les reports ont été réalisés en utilisant une membrane auxiliaire de PET Melinex 506. Les paramètres de mise en œuvre sont similaires, à savoir, une température de chauffage de 120 °C et une pression de déformation qui est fonction de la courbure du verre hôte.

- *antireflets NOF ReaLook®*

Ce film antireflets de la série X4000 est fabriqué par la société *NOF Corporation*. Il est composé d'un film polymère de TAC (triacétate de cellulose) de 80 µm sur lequel sont déposés un revêtement « hard-coat », un anti reflets et une couche antisalissures. Il possède également un adhésif PSA optique de 25µm.

Nous avons reporté deux patches de ce film sur un verre rond stylis de correction +6.00. Le premier patch est découpé au gabarit CK-533 et le second est un disque de 65 mm de diamètre. Les déformations que nous avons mesurées sont décrites sur les figures suivantes.

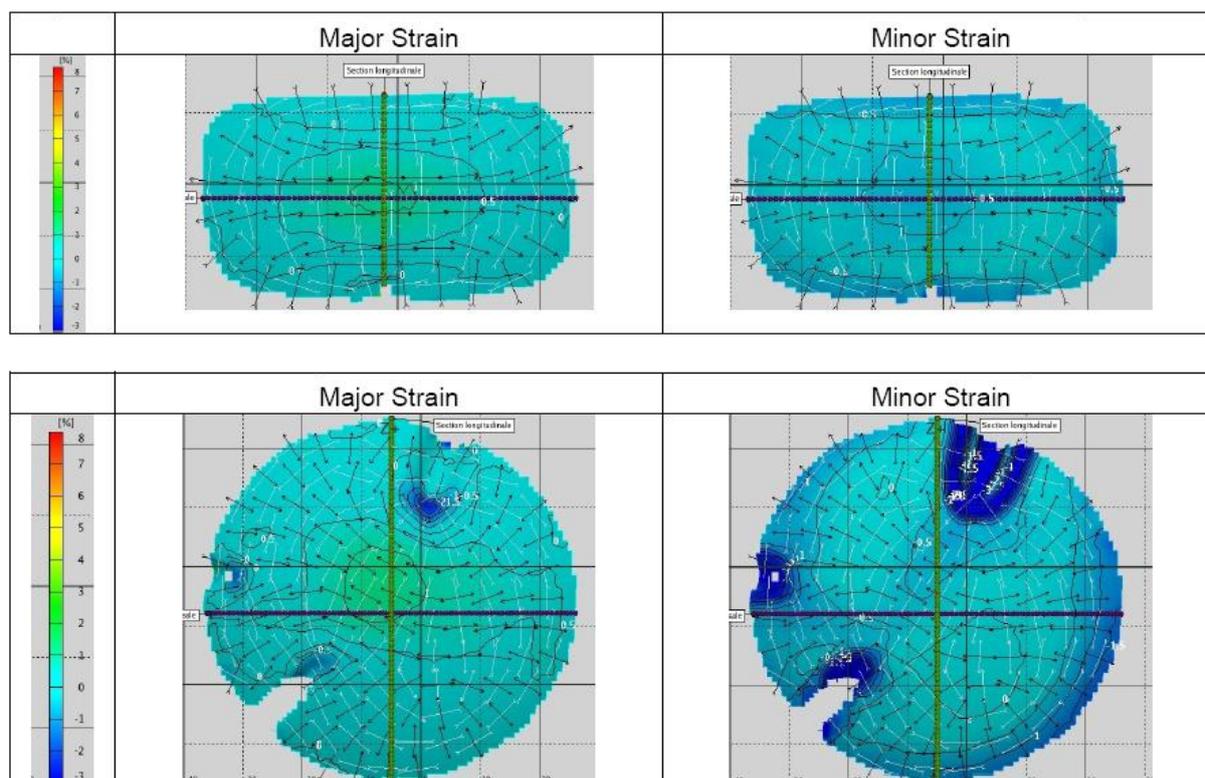


Figure VI-21 : Cartographies des déformations majeures et mineures du report d'un patch au gabarit CK-533 et du report d'un patch de 65 mm de diamètre sur un verre stylis +6.00

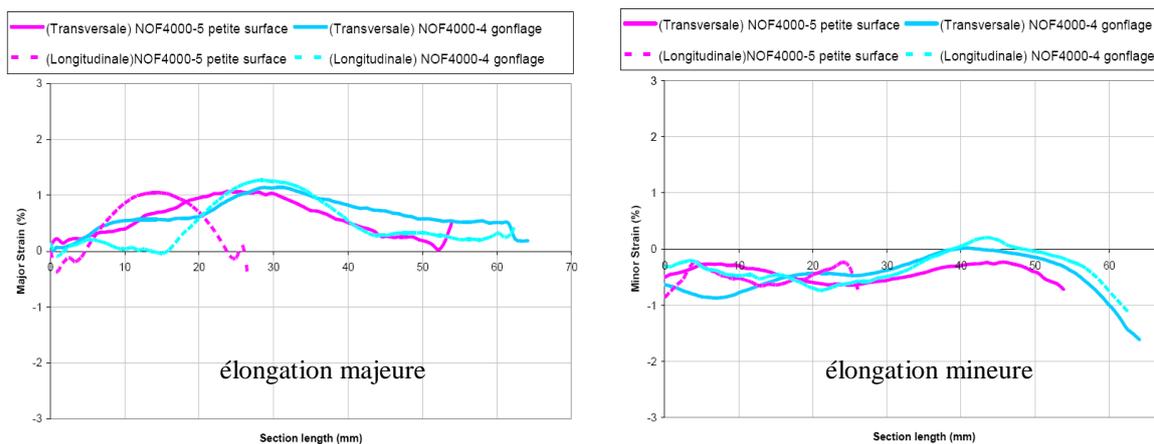


Figure VI-22 : Déformations transversales et longitudinales des reports de *NOF 4000* sur stylys +6.00

Le report du film antireflet *NOF 4000* engendre d’avantage de déformations que le film de PET : le taux de déformation principale mesuré est d’environ 1 % au centre du patch alors que le Melinex ne se déforme que de 0,5%. Cette différence provient de la nature du matériau qui est un amorphe et dont la température de transition vitreuse est plus basse que celle du PET. Le défaut de dentelle sur le bord apparaît dans le cas du patch de 65 mm de diamètre. Les observations cosmétiques sont acceptables et celles qui sont faites au microscope ne révèlent pas de fissures.

- ***Antireflets maison ESSILOR***

La qualité des antireflets *ESSILOR* n’étant plus à démontrer, il est envisagé de réaliser de tels dépôts sur des films de grande surface sur le substrat, désormais bien connu, de PET Melinex 506. Ces antireflets sont constitués d’une sous couche de vernis Sol-Gel d’une épaisseur de 3,5 μm (enduite par spin-coating et réticulée en étuve) et de multicouches inorganiques de 200 nm d’épaisseur pulvérisées sous vide par canon à électron dans une enceinte non chauffée.

Nous avons réalisé le report de deux types de films antireflets. Le premier film est appelé, en interne chez *ESSILOR*, Antireflets-A (Altius+Nsd). Il est constitué d’un empilement d’indice de réfraction 1,5. Le second, appelé antireflets-B (Noria+Nsd), a un indice de réfraction 1,6.

Les mesures, réalisées pour des reports sur des verres de 133, 107 et 88 mm de rayons de courbure qui correspondent aux corrections respectives de +0.00, +2.00 et +4.00 pour le verre Stylis, sont présentées sur les figures suivantes :

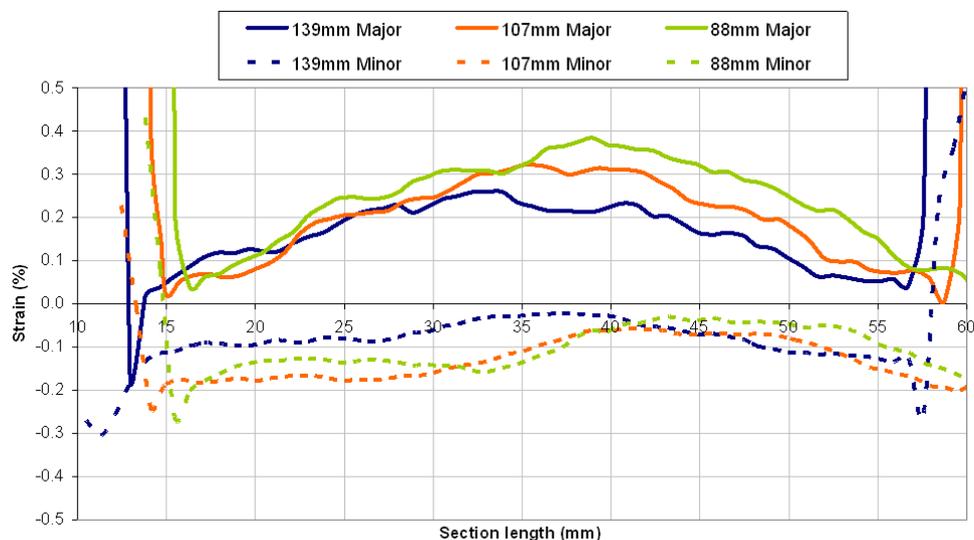


Figure VI-23 : Déformations transversales et longitudinales des reports réalisés à partir de l'antireflets-A

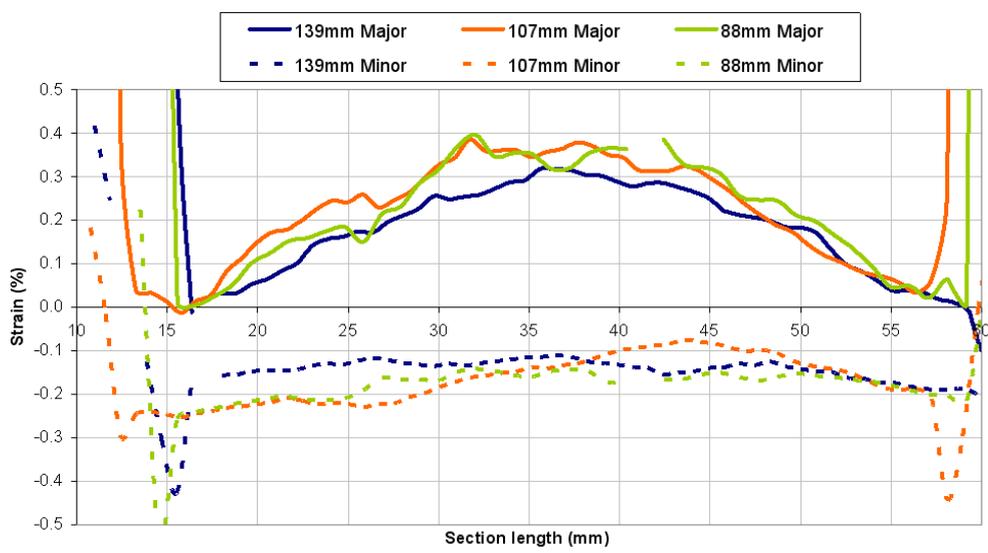


Figure VI-24 : Déformations transversales et longitudinales des reports réalisés à partir de l'antireflets-B

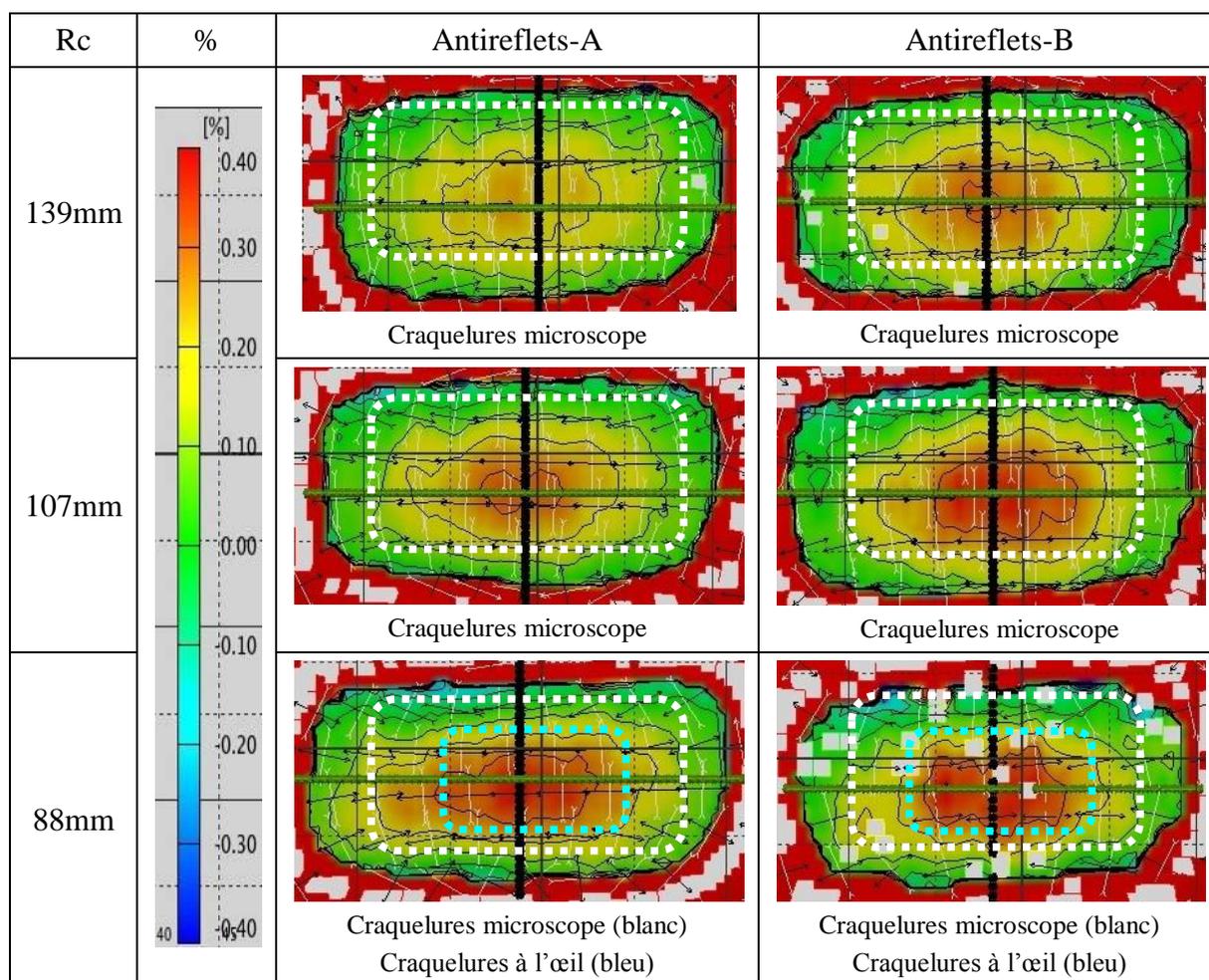


Figure VI-25 : Cartographies des déformation majeures du report d'un patch au gabarit CK-533 en fonction du type d'antireflets et du rayon de courbure du verre hôte.

Les déformations mesurées sont similaires pour les deux films antireflets : les déformations majeures maximales relevées sont d'environ 0,4 % pour le verre +4.00, 0,3 % pour le verre +2.00 et 0,2 % pour le verre +0.00. Les déformations majeures sont nulles en périphérie des patches reportés. Les déformations mineures montrent une tendance à être homogènes sur toute la surface des patches et ne dépassent pas les 0,3 % d'amincissement. Les films de PET Antireflets-A et Antireflets-B semblent se déformer de la même façon que le film de PET seul. Notons tout de même que les déformation mesurées sont très petites (inférieures à 1 %). La méthode de mesure atteint alors ses limites lorsqu'il s'agit de mesurer et surtout de comparer des déformations inférieures à 0,1 %.

L'expertise cosmétique des reports montre des craquelures des antireflets à partir d'un rayon de courbure de 90 mm et pour les rayons de courbures inférieurs ce qui correspond à un seuil de déformation d'environ 0,35 %. Nous avons représenté cette zone de craquelures par

des pointillés bleu sur la Figure VI-25. L'observation microscopique des échantillons montre des fissures plus fines sur tous les antireflets reportés, cette fois représentées par des pointillés blancs. Ces fissures apparaissent dès 0,1 % d'élongation et leur origine peut être expliquée par la nature des empilements qui n'ont pas le même comportement thermomécanique. La Photo VI-6 est un cliché obtenu par microscopie, avec un grossissement de x 100, où l'on peut voir les fissures visibles à l'œil et celles visibles uniquement au microscope.

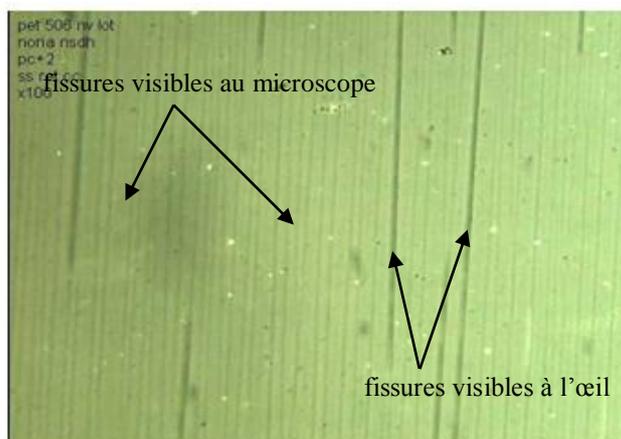


Photo VI-6 : Cliché microscopique des fissures des antireflets

4.2. Le report de film conducteur

Le film pixellisé dédié à l'application de l'optique ophtalmique n'en est qu'à ces débuts. Très vite l'évolution du dispositif fera certainement intervenir des composants optiques et/ou électroniques actifs et avec eux viendra la nécessité d'utiliser des films conducteurs transparents. Aujourd'hui l'ITO (Indium Tin Oxyde) est le conducteur le plus utilisé dans le domaine des écrans plats ou tactiles car il combine une bonne transmission optique et une faible résistivité [71]. Le plus souvent l'ITO est déposé sur PET par DC magnetron sputtering [72] (pulvérisation cathodique en mode DC). Les résistivités de feuilles couramment obtenues sont dans la gamme $50 \Omega/\square$ - $500 \Omega/\square$ ce qui correspond à une épaisseur d'ITO comprise en 5 nm et 150 nm. Une étude spécifique [73] montre que l'allongement d'un film de PET recouvert d'ITO provoque des déchirures microscopiques de ce dernier qui ont un effet dégradant significatif sur la résistivité. Étant confronté à cette problématique des conséquences éventuelles des déformations produites lors de reports, nous avons donc cherché pour évaluer la viabilité de nos procédés à mesurer l'impact de nos reports sur la conductivité du matériau. Le film que nous avons utilisé provient de la gamme

Accentia de la société *SHELDAHL*. Il correspond à un film de PET de 70 μm d'épaisseur sur lequel est déposé une couche conductrice d'ITO de $120 \Omega/\square$. Le collage sur petite surface – au gabarit du verre CK - est sans défaut, et la déformation principale ϵ_1 est comprise entre 0 et 0.5 %. Elle est maximale au centre du verre (~ 0.5 %). La déformation secondaire ϵ_2 est de - 1 %.environ. Aucune craquelure n'est détectable à l'œil, mais au microscope, nous pouvons observer de fines craquelures se propageant le long des vecteurs ϵ_2 . Sur une plus grande surface – patch sous forme de disque de diamètre 65 mm - le collage n'est pas parfait : on observe la présence de dentelle. Les mesures de déformation sont perturbées par cette dentelle, mais elles donnent des valeurs du même ordre de grandeur.

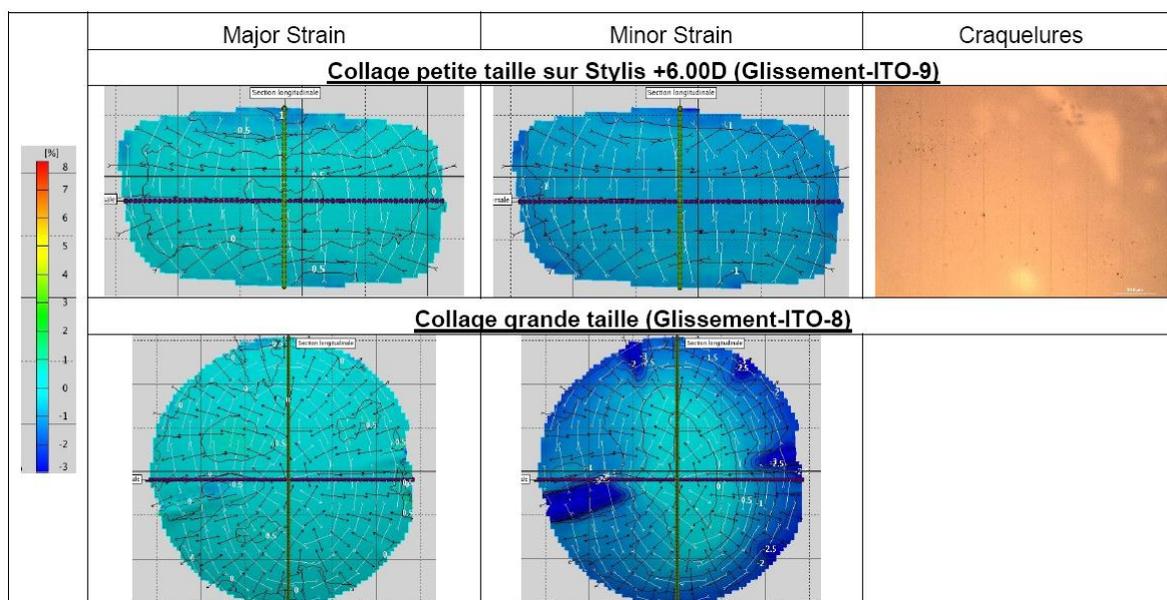


Figure VI-26 : Cartographie des déformations de patches PET/ITO

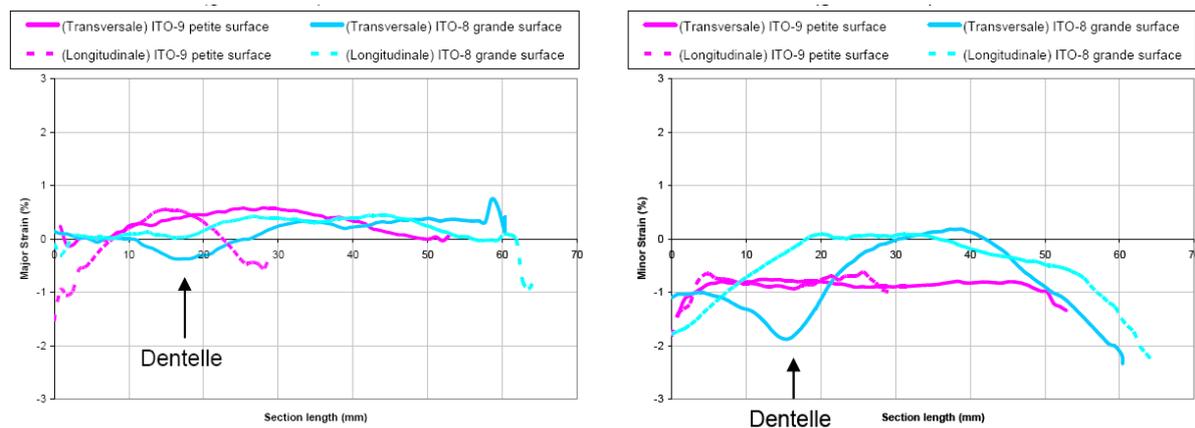


Figure VI-27 : Déformations transversales et longitudinales des reports de film PET/ITO sur une base +6.00

Une mesure basique de résistance effectuée au multimètre permet d'évaluer l'accroissement de la résistance du substrat lié au formage des films PET/ITO. Nous avons fixé, pour chaque mesure, une distance de 1 cm sur le film entre les deux sondes. Le film initial non formé présente une résistance d'environ 120 Ω ce qui est conforme avec les données du fabricant. Les films formés présentent respectivement une résistance de 200 Ω pour le patch au gabarit CK et 2000 Ω pour le du film de 65mm de diamètre. Ces augmentations de résistivité peuvent être attribuées à l'apparition de micro fractures (cf image microscope).qui dégradent la résistance globale du film. A titre de comparaison, le thermoformage de film PET/ITO effectué par la méthode « grande surface » pour le report sur un verre de même courbure induit une augmentation de la résistance telle qu'elle n'est plus mesurable par le multimètre.

5. Conclusion

Partant du principe de report étudié au cours de la première phase de notre travail et pour économiser le film préfonctionnalisé, nous avons mis au point un procédé qui permet le report de patches dont les surfaces correspondent exactement aux gabarits des verres de lunettes. Pour ce faire, nous avons conservé le principe initial de la prédéformation par emboutissage pneumatique avant report en faisant jouer maintenant au film initial le rôle d'une matrice : celle-ci est gonflée sous l'effet de la pression et prend une forme sphérique, et le patch qui est quant à lui plaqué sur cette matrice auxiliaire par cette même pression de gonflement prend rigoureusement la même forme. Deux solutions pour maintenir le patch et son positionnement sur la matrice avant gonflement ont été proposées ; la première consiste à utiliser les forces de capillarité développées sur un film d'huile mis à l'interface, et la seconde correspond simplement à un collage du patch sur le film auxiliaire au moyen d'un film sec de type PSA par exemple.

Dans cette évolution du procédé de report visant la réduction des coûts, la complexification des opérations à réaliser apporte toutefois un avantage considérable avec la minimisation de la déformation des films fonctionnalisés. Nous avons pu en effet vérifier que la suppression au cours du gonflement de la contrainte radiale au niveau du patch, qui est apportée par le glissement de celui-ci sur la matrice, permet de réduire le taux de déformation de 8 % à 0,5 % dans le cas des verres les plus bombés. Cette amélioration permet alors d'envisager le report de films comprenant des couches fragiles telles que les multicouches

antireflets ou encore les électrodes conductrices qui seront indispensables pour les fonctionnalités actives. Le développement de structures antireflets *ESSILOR* sur le film de PET Melinex 506 a été entrepris à la suite de ce travail et permet aujourd'hui d'obtenir une technologie capable de supporter des taux d'élongations de 0,7 %. Dès lors, le report du film pixellisé intégrant des antireflets est maintenant possible et a été réalisé sur les verres les plus exigeants en termes de rayon de courbure.

En passant de la technique initiale de report de grande surface à celle beaucoup plus économique de report de patches prédécoupés, cette évolution permet donc d'ouvrir la voie à une industrialisation plus rationnelle du procédé.

Conclusion générale et perspectives

1. Conclusion

Le report d'un film plan, de nature hétérogène et fragile – composé d'une microstructure cellulaire remplie de liquides fonctionnels et scellée par deux substrats transparents – à la surface de verres de lunettes sphériques constituait un des verrous importants à lever pour la réussite du projet « optique ophtalmique digitale ». Il faut en effet garantir l'intégrité fonctionnelle des films, autrement dit le maintien de l'ensemble des propriétés optiques et mécaniques désirées après l'étape de report. Pour cela, qui constituait notre objectif au démarrage de notre étude, il convenait de mettre au point un procédé de thermoformage spécifique répondant aux trois exigences suivantes :

- i) la minimisation de la déformation du film avec aussi l'impératif d'uniformisation ;
- ii) la réduction des contraintes résiduelles d'origine thermomécanique ;
- iii) et la mise en œuvre d'une assistance thermique aussi réduite que possible.

Dans notre recherche d'un procédé optimal nous nous sommes orientés vers le principe de « l'emboutissage pneumatique ». Ici en effet, dans notre cas particulier où il s'agit de conformer un film plan, souple et fragile, à la surface d'un support sphérique ou quasi sphérique, ce principe offre, en séparant les phases de déformation et de report proprement dit, des avantages intéressants par rapport à la méthode de thermoformage classique :

- l'emboutissage pneumatique, autrement dit par gonflement, du film avant tout contact avec la surface permet une déformation plus homogène que ne le permet la méthode de thermoformage classique ;
- les possibilités d'un gonflement préalable progressif et d'un chauffage concomitant minutieusement contrôlé permettent d'aboutir aux meilleurs compromis notamment

pour la minimisation des contraintes résiduelles piégées – grâce à la relaxation de la contrainte avant report – et pour la mise en œuvre de températures aussi faibles que possible.

Ce principe de base pour le report très spécifique que nous avons à optimiser, qui consiste donc à déformer d’abord le film par gonflement sous assistance thermique et à le reporter ensuite, a été décliné selon deux variantes. La première qui correspond à la description directe qui vient d’être faite suppose une découpe du film de grande taille en forme de disque. La seconde met elle en œuvre un film auxiliaire qui sert de matrice au patch maintenant prédécoupé au gabarit du verre détourné. Bien que plus complexe dans sa mise en œuvre, ce second procédé, qui visait à l’origine la minimisation des coûts de fabrication, s’est par contre d’emblée avéré beaucoup plus performant sur le plan de la déformation post-report. En effet, en s’affranchissant de la tension radiale du film lors de sa conformation à la surface courbe, ce procédé permet de réduire le taux d’étirement radial à la valeur minimale.

Au plan des réalisations, nous avons conçu et fait construire une machine prototype automatisée dédiée permettant cette séparation des étapes de mise en forme par thermoformage et de collage du film sur le verre. Nous avons opté pour le principe de chauffage par rayonnement infrarouge et choisi plus particulièrement l’émetteur de type « Infraline » qui possède un large spectre IR et permet le chauffage du film de façon homogène en une dizaine de secondes.

La caractérisation du film « Melinex 506 » en PET, qui constituait le substrat et l’armature du film pixellisé au moment de notre étude, par analyse thermomécanique dynamique a permis de vérifier le caractère viscoélastique attendu pour ce matériau et de situer aussi idéalement sa plage de thermoformage entre 100 et 120 °C. L’analyse de ce comportement viscoélastique sur une large gamme de fréquence et de température nous a notamment permis d’identifier les paramètres pertinents du modèle dit de MAXWELL généralisé et du modèle comportemental nommé WLF décrivant le principe d’équivalence « temps-température ». Nous avons retenu en première analyse ces modèles pour mener des simulations numériques des procédés proposés s’appuyant sur la méthode des éléments finis et ce, grâce au logiciel commercial *ABAQUS*.

La première campagne de reports a consisté à mettre au point les modes opératoires du report « grande surface » du film de PET seul. Nous sommes avons montré que la tenue des

collages dans le temps est optimale pour des températures de thermoformage de 120 °C. Les mesures des elongations par la méthode des mouchetis concordent avec nos simulations numériques : la déformation principale est radiale et homogène sur la surface du film ; elle atteint au maximum 8 % pour les gabarits les plus exigeants. La déformation secondaire est orthoradiale, elle est maximale au centre du film, avec 6 % pour les gabarits les plus exigeants, et pratiquement nulle à son bord. Bien que nous ayons pu vérifier que ce premier procédé permet bien de reporter le film pixellisé en conservant l'intégrité de sa fonction optique, il est cependant clair qu'il n'est pas souhaitable pour des raisons économiques et qu'il montrera ses limites dans les cas des forts rayons de courbure lorsqu'il faudra intégrer des couches fragiles comme les couches antireflets par exemple.

La deuxième campagne de reports a mis en évidence des résultats remarquables obtenus à partir du procédé « petite surface » :

- ce procédé permet de réaliser les économies souhaitées en matière de consommation du film à haute valeur ajoutée ; en prédécoupant le patch au gabarit du verre nous obtenons un gain d'un facteur 10 ;
- dans ce mode d'emboutissage, le glissement du patch sur la membrane auxiliaire qui fait office de matrice permet de supprimer la tension radiale, et nous diminuons ainsi considérablement le taux de déformations qui est amené à un taux aussi faible que 0,5 % pour les lentilles les plus exigeantes à faibles rayons de courbures.

Nous mentionnerons enfin que l'ensemble des travaux que nous avons menés sur la mise au point de ces deux procédés de report spécifiques de films fonctionnalisés sur surface courbe a fait l'objet du dépôt de deux brevets [74].et [75]

2. Evolutions et perspectives

Depuis la fin de cette étude, qui a montré les avantages du principe de thermoformage préalable par gonflement suivi du report, le procédé a fait l'objet d'optimisations successives.

Le report de films composés de matériaux fragiles tels que les structures antireflets à la surface de verres ophtalmiques sont désormais envisagés en dehors du seul projet d'optique pixellisée. Pour cela, les efforts de développement produits chez *ESSILOR* ont en particulier

permis de faire évoluer le procédé de fabrication de ces structures pour qu'elles puissent supporter le procédé de report dit de « grande surface ». En réalisant technique de dépôt de ses antireflets par PVD (Physical Vapor Deposition) à chaud, la cohésion des couches, leur densité et leur résistance à la température ont été améliorées.

La soudure du patch au moment de sa découpe au gabarit du verre n'a pas donné entière satisfaction. Le bourrelet formé par la soudure empêche parfois le bon collage du patch sur le verre et dépasse de la surface du patch. La découpe laser du patch est maintenant réalisée en plusieurs passes pour éviter tout échauffement du film. Le renforcement du patch sur sa périphérie est aussi réalisée après le report en déposant de la colle sur son bord [76]. Celle-ci pénètre dans les cuves vidée lors de la découpe.

La première amélioration de la machine de report prototype concerne la mise en place d'un dispositif de positionnement du film prédécoupé par rapport au verre qui est désormais intégré au prototype PIXIS. Les déplacements XY du verre sont possibles grâce à deux platines disposées à l'intérieur de l'enceinte actionnées par deux vis micrométriques via des passages étanches.. La correction de l'angle θ est apportée par un dispositif permettant la rotation du film par rapport à l'enceinte. L'alignement est assuré manuellement par l'opérateur qui dispose désormais d'une caméra et de son objectif télécentrique.

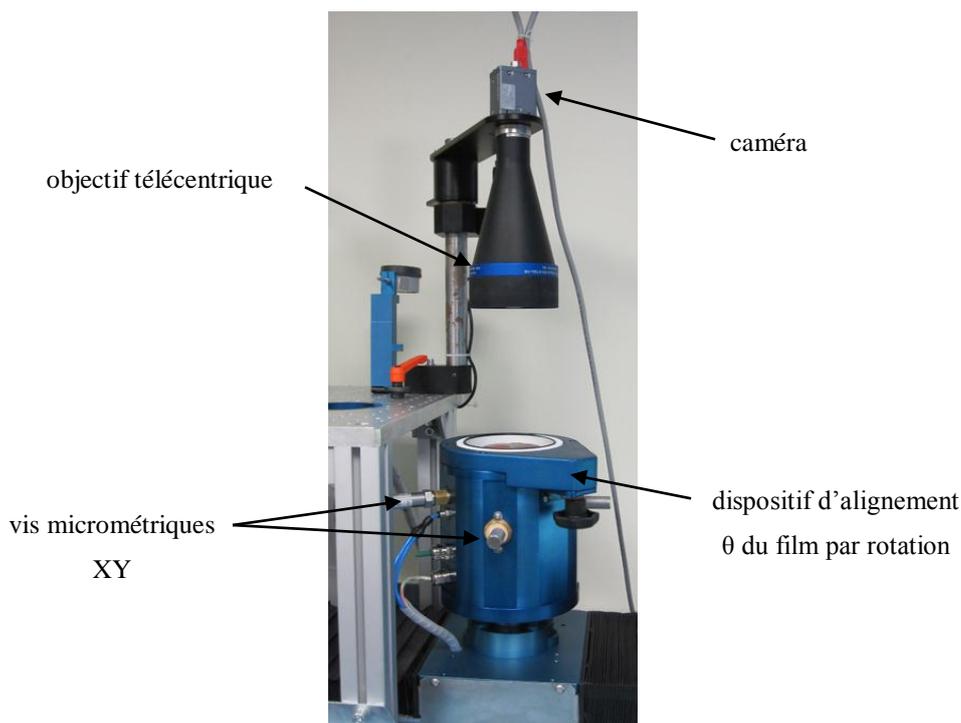


Photo VII-1 : Evolution du prototype à la suite de ce travail de thèse

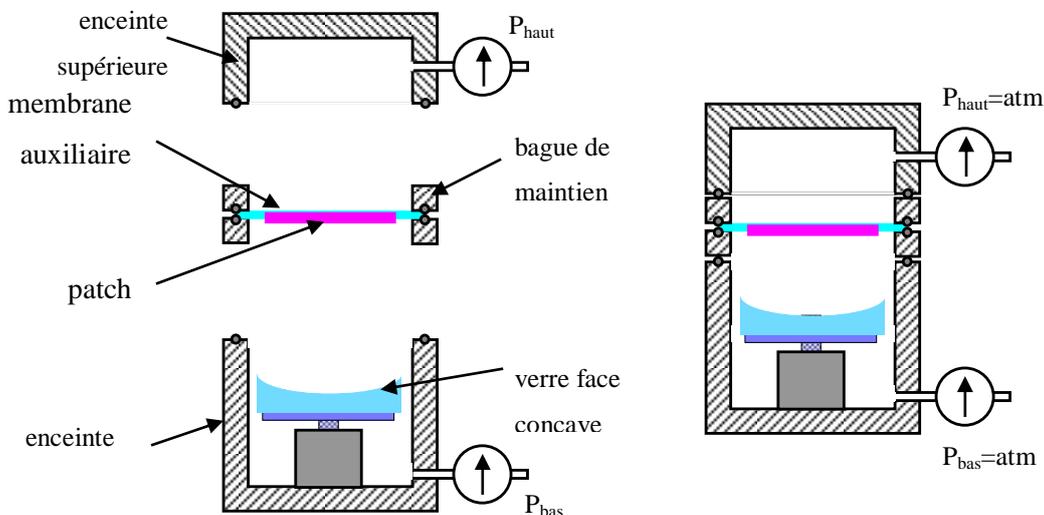
Certains aspects restent à approfondir pour améliorer la qualité des reports de films. L'optimisation plus poussée des paramètres pertinents tels que le temps et la température de chauffage mis en œuvre, la vitesse d'approche du vérin, devrait permettre d'améliorer encore la tenue des reports « petite surface » dans le temps. Ce travail n'a pas pu être mené au cours de cette thèse car la production de dalles complètes de films fonctionnalisés venait de démarrer. Par ailleurs le défaut de dentelle et le décollement spontané du patch qui surviennent généralement sur les plus grands gabarits feront l'objet d'optimisations plus poussées. Il sera en particulier intéressant d'augmenter la rigidité de la membrane auxiliaire en utilisant un autre type de film ou bien encore en augmentant son épaisseur.

Enfin, d'autres voies doivent encore être explorées afin de pouvoir généraliser notre procédé de report. Ainsi, il sera essentiel de rendre le report de films compatibles avec les verres progressifs Varilux[®] afin de couvrir la plupart des géométries de verres produites par *ESSILOR*. Il faudra alors de nouveau faire évoluer le prototype pour trouver le point géométrique le plus haut de ce type de verre et l'aligner avec le patch.

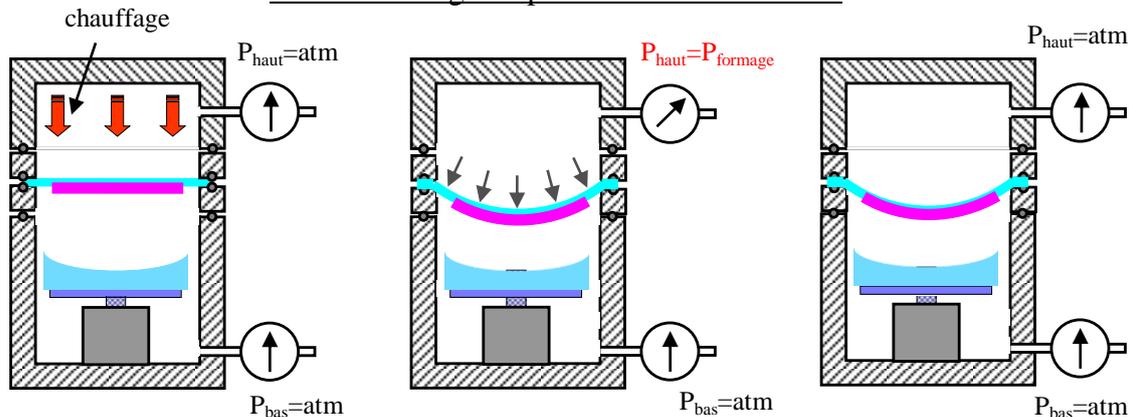
Annexes

ANNEXE 1 : PROCÉDÉ DE REPORT D'UN PATCH EN FACE CONCAVE D'UNE LENTILLE.

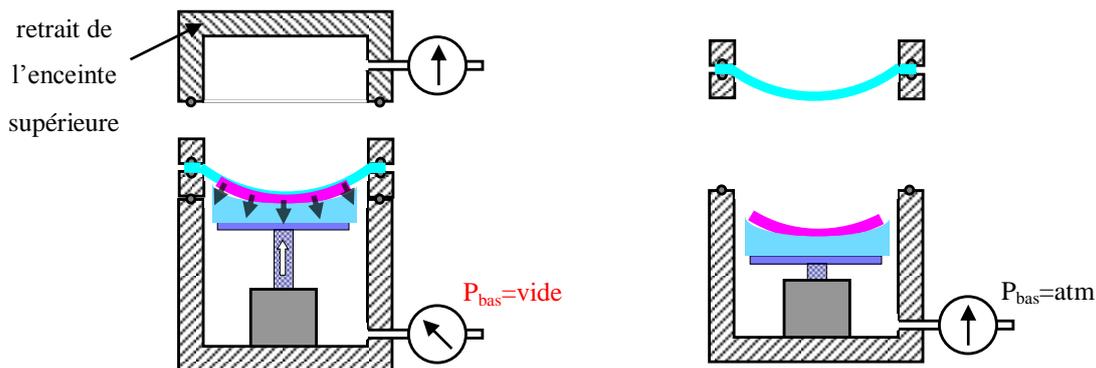
Mise en place du patch et de la membrane



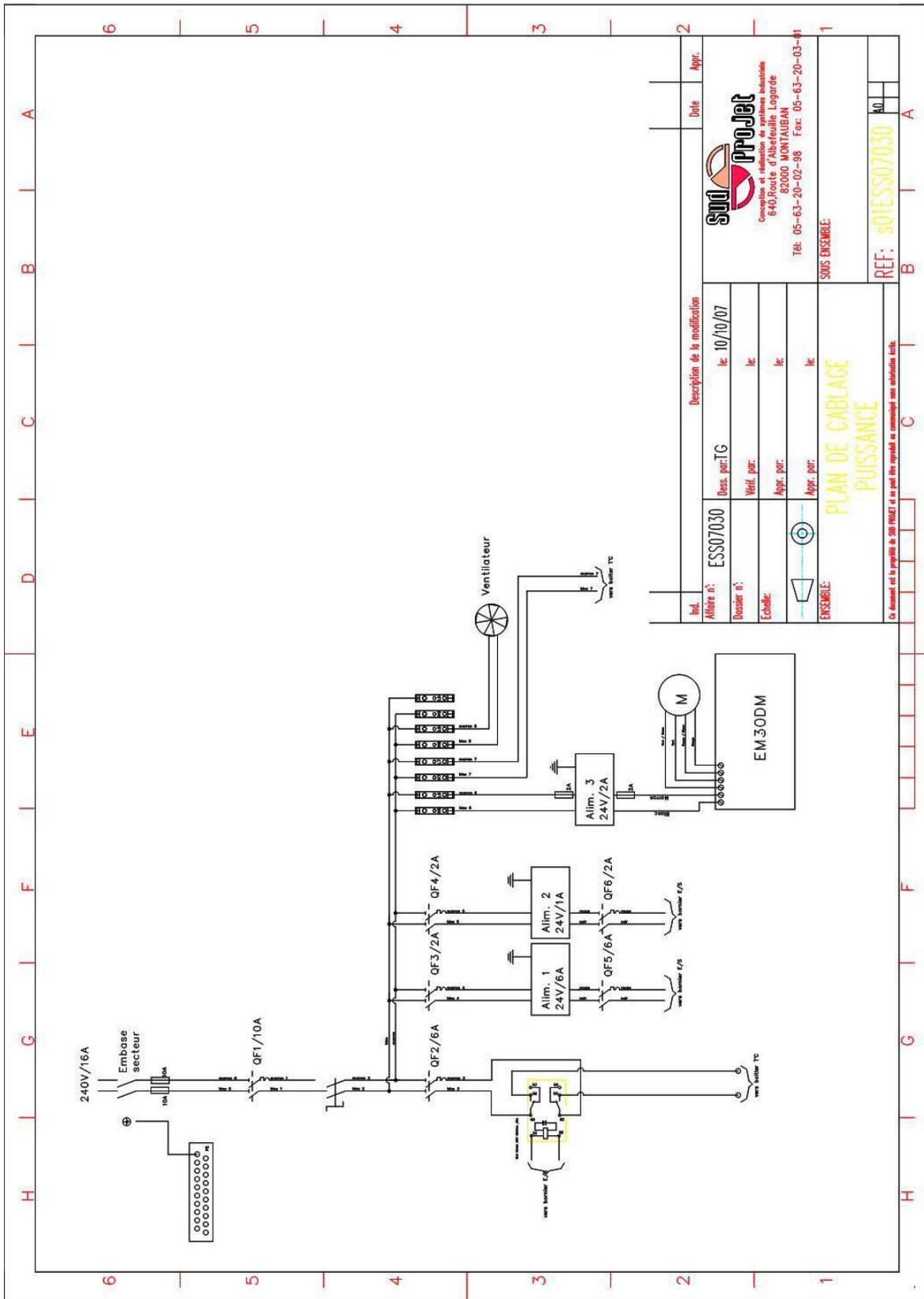
Thermoformage du patch et de la membrane



Collage du patch sur le verre



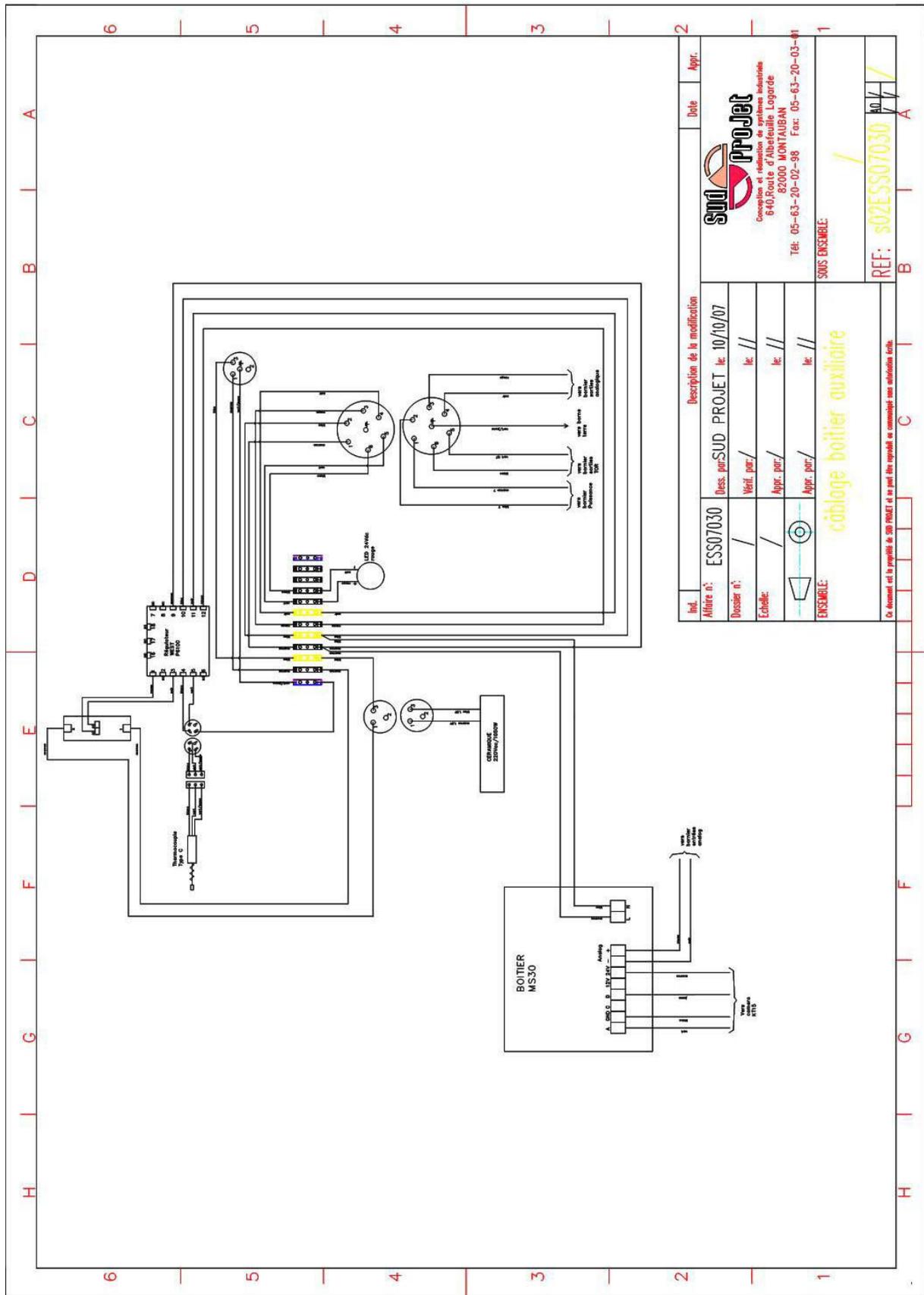
ANNEXE 2 : PLANS ÉLECTRIQUES ET PNEUMATIQUES DU PROTOTYPE PIXIS.



Ind.	Alim. n°	Ess07030	Des. par: TG	10/10/07	Date	Appr.
	Doc. n°:					
	Echelle:					
	Appr. par:					
	Appr. par:					
SOUS ENSEMBLE:						
PLAN DE CABLAGE PUISSANCE						
REF: SOIES07030						

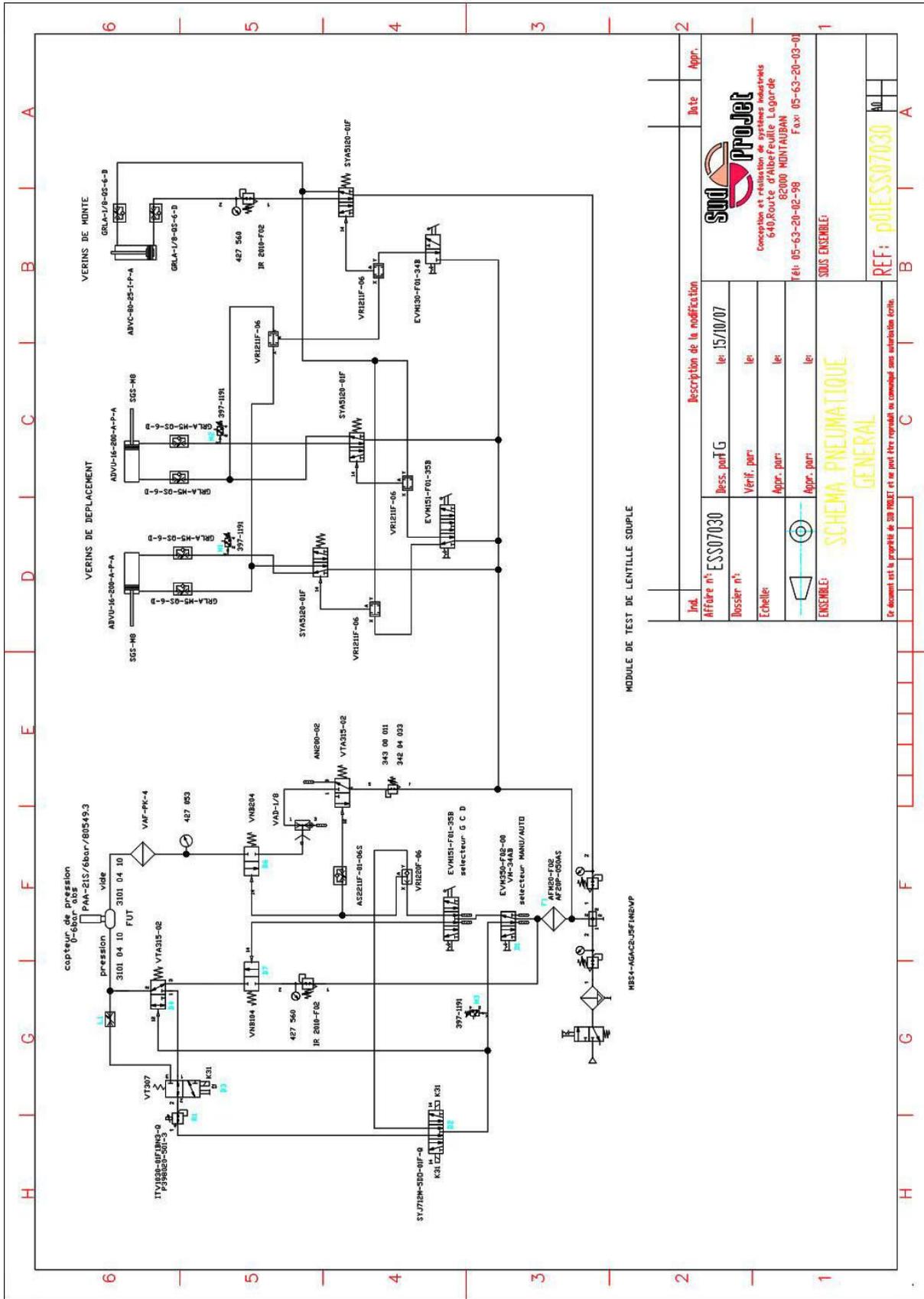


On reconnaît la propriété de SUD PROJET et se peut être repris ou communiqué sans autorisation écrite.



Ind.	Description de la modification	Date	Appr.
ESS07030	Des. par SUD PROJET le: 10/10/07		
Dossier n°:	Verif. par: /	le: / /	
Echelle:	Appr. par: /	le: / /	
ENSEMBLE:	Appr. par: /	le: / /	
SOUS ENSEMBLE:			
cablage boîtier auxiliaire			
REF: SOZESS07030			

Ce document est la propriété de SUD PROJET et ne peut être réutilisé ou communiqué sans autorisation écrite.



MODULE DE TEST DE LENTILLE SOUPLE

Ind.	Description de la modification	Date	Appr.
Affaire n° ESS07030	Dess. part G	le 15/10/07	
Bossier n°	Verif. part	le	
Echelle:	Appr. part	le	
ENSEMBLE:	Appr. part	le	

SCHEMA PNEUMATIQUE GENERAL
 SOUS ENSEMBLE:
 REF: PNESS07030

De document est la propriété de SUD PROJET et ne peut être reproduit ou communiqué sans autorisation écrite.

Conception et réalisation des machines-outils
 640, Route de Calles Feuilles, LIGUR DE
 82000 MONTAUBAN
 Tél: 05-63-20-02-98 Fax: 05-63-20-03-00

ANNEXE 3 : GRAFCET DE L’AUTOMATE INTÉGRÉ AU PROTOTYPE PIXIS.

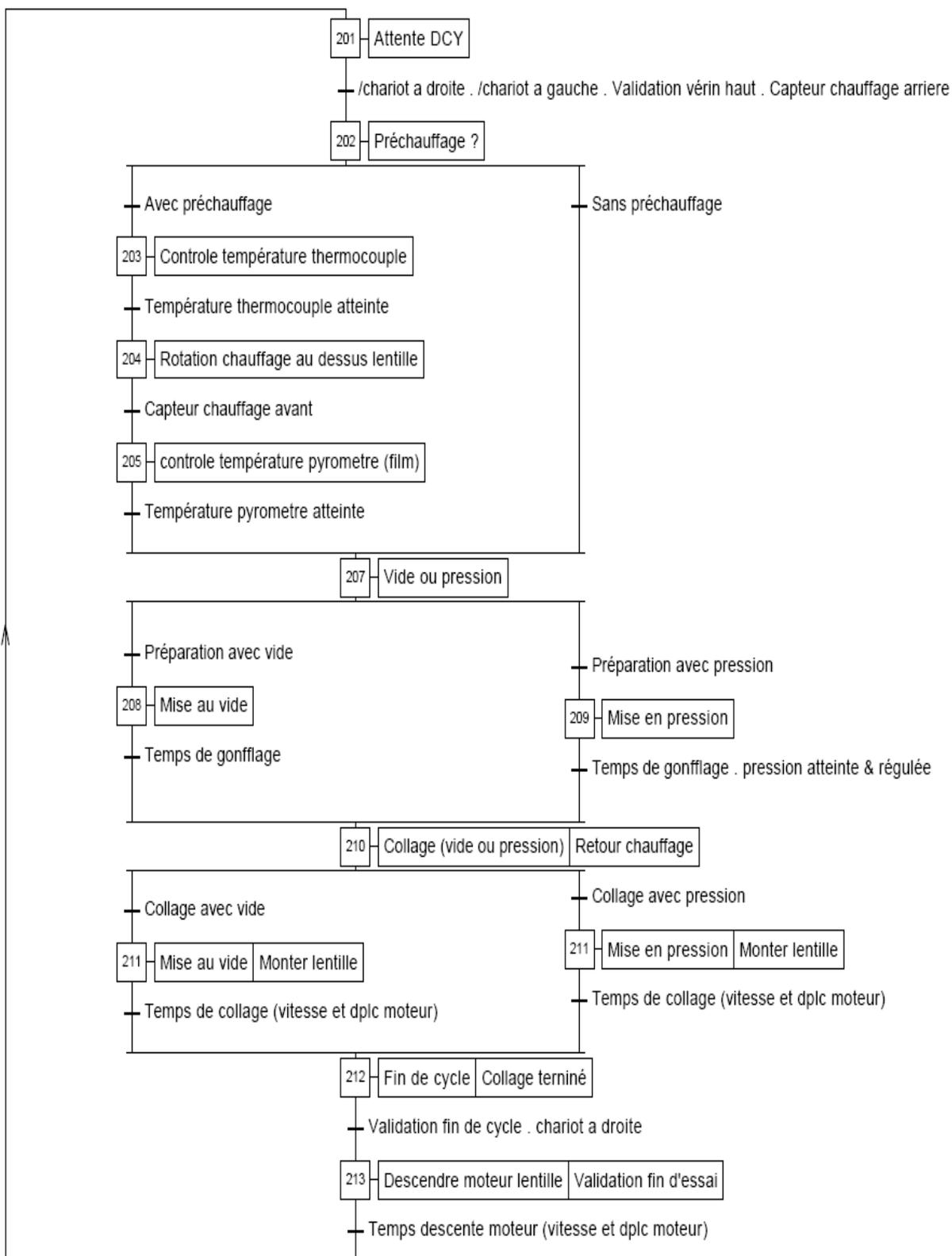


Table des illustrations

Figure I-1 : L'évolution du verre atténuateur d'intensité électro-optique de 1960 à nos jours.....	11
Figure I-2 : Les grandes étapes de la fabrication du film pixellisé.....	14
Figure I-3 : La diffraction d'une structure hexagonale à gauche et pseudo aléatoire à droite.....	15
Figure I-4 : La géométrie hexagonale	16
Figure I-5 : L'étape de laminage du film optique sur le wafer.....	17
Figure I-6 : Retrait des films protecteurs par pelage.....	17
Figure I-7 : Préparation au transfert du film pixelisé à l'aide d'un traitement de surface	18
Figure I- 8 : Préparation au transfert du film pixellisé à l'aide d'un film sacrificiel.....	19
Figure I-9 : Le dépôt de la couche barrière sur les microcuves et le film substrat par plasma froid.....	22
Figure I-10 : Le remplissage global par « doctor blade »	23
Figure I-11 : Le remplissage discontinu par jet d'encre	24
Figure I-12 : Le scellement des cuves par un film optique	25
Figure I-13 : Le scellement par dépôt de parylène	26
Figure I-14 : L'encapsulation par démixtion.....	27
Figure I-15 : Le remplissage des cuves lors du scellement.....	27
Figure I-16 : Le report « du plan à la sphère »	29
Figure I-17 : Le principe générique du thermoformage.....	30
Figure I-18 : Plan de détournage au gabarit	32
Figure II-1: Le collage du film protecteur du verre aux étapes d'usinage	37
Figure II-2: Les étapes du report du procédé MARS avec une colle liquide	38
Figure II-3 : Le thermoformage selon BST.....	39
Figure II-4 : Le report selon BST	40
Figure II-5 : Schéma du film à reporter sur une calotte sphérique	42
Figure II-6 : Schéma du report de type 1	43
Figure II-7: Variations relatives de la surface en fonction du rayon de courbure R du verre et du rayon r du disque lors d'un report de type 1	44

Figure II-8 : Schéma du report de type 2	45
Figure II-9: Variations en valeurs relatives de l'étirement radial en fonction du rayon de courbure R du verre et du rayon r du disque lors d'un report de type 2	46
Figure II-10 : Schéma du report de type 3	46
Figure II-11 : Variations en valeurs relatives de l'étirement radial en fonction du rayon de courbure R du verre et du rayon r du disque lors d'un report de type 3	47
Figure II-12 : Variations relatives de la surface en fonction du rayon de courbure R du verre et du rayon r du disque lors d'un report de type 3.....	47
Figure II-13: Variations de l'expansion ou de la contraction surfacique en fonction de r, de R et du type de report	48
Figure II-14 : Variations de l'étirement radial en fonction de r, de R et du type de report	48
Figure II-15 : Déformations radiales en fonction du verre utilisé pour une même correction optique	50
Figure II-16: Étirement radial lors du processus de mise en forme.....	51
Figure II-17: Procédé PIXIS-A1.....	54
Figure II-18: Les étapes du procédé PIXIS-A2	55
Figure II-19: Les étapes du procédé PIXIS-B	56
Figure II-20: Les étapes du procédé PIXIS-C	57
Figure II-21: Les étapes du procédé PIXIS-D.....	58
Figure II-22 : Données physiques du film polymère intégrées au modèle numérique du gonflement grande surface	61
Figure II-23 : Simulation du gonflement dans le procédé PIXIS-A par la méthode des éléments finis : a) et b) déflexion en z du film, c) vue globale de la déformation principale, d) relevé de la déformation principale le long d'un méridien.	62
Figure II-24 : Données physiques du film matrice et du film à reporter intégrées au modèle numérique du gonflement «petite surface»'	63
Figure II-25 : Simulation du gonflement dans le procédé PIXIS-D par la méthode des éléments finis : a) et c) déflexion en z des films, b) et d) vues globales de la déformation principale de la matrice et du film prédécoupé à reporter	64
Figure II-26 : Relevés de la déformation principale du film à reporter le long de deux transversales orthogonales.	64
Figure III- 1: Schéma CATIA du prototype de thermoformage PIXIS	71

Figure III-2 : Schéma éclaté de l'enceinte de thermoformage	72
Figure III-3: Schémas <i>CATIA</i> de l'enceinte de thermoformage	73
Figure III-4 : a) Menu de l'automate en en mode manuel et b) Menu des paramètres en mode automatique	77
Figure III-5 : Les étapes du report de PIXIS-A1	79
Figure III-6 : La séquence du report de PIXIS -A1	79
Figure III-7 : Les étapes du report de PIXIS - mode 2	80
Figure III-8 : La séquence du report de PIXIS - mode 2	80
Figure III-9 : Maillage du film PET encastré dans la plaque d'aluminium	82
Figure III-10 : Détermination du coefficient d'échange par convection h	85
Figure III-11 : Cinétique de refroidissement du film en fonction du mode de transfert thermique	86
Figure III-12 : Thermogrammes du transfert plaque / film à 0 s et 20 s.....	87
Figure III-13 : Thermogrammes du refroidissement d'un film de PET en fonction du mode de transfert thermique dans la zone de contact entre le film et la plaque.	88
Figure III- 14 Refroidissement d'un film à 120°C en fonction de son épaisseur.	89
Figure III-15 : Chauffage d'un film par infrarouge en fonction de son épaisseur.....	91
Figure III-16 : Thermogrammes du chauffage d'un film en fonction de son épaisseur	92
Figure III-17 : Maillage de la microstructure	93
Figure III-18: Cinétique de chauffage du film en fonction de la nature du liquide contenu dans les cuves.....	94
Figure III-19 : Coefficient d'absorption d'un film mince de PET transparent [38]	95
Figure III- 20 Dispositif de chauffage du film de type convectif.....	97
Figure III-21 : Banc de mesure de température	98
Figure III-22 : Thermographie infrarouge des éléments chauffants	99
Figure III-23 : Transmittivité de films PET de 20, 30, 50 et 100 μm d'épaisseur aux longueurs d'onde de 1 μm à 25 μm selon MONTEIX [38]	100
Figure III-24 : Thermogramme de l'échauffement du verre lors du chauffage du film PET	101
Figure III-25 : Montage pour le contrôle de la courbure du film	103
Figure III-26 : Distances source-image en fonction de la position du laser et du rayon de courbure du verre pour un écran placé à 1 mètre en hauteur du verre	104
Figure III-27 : Exemple de motif aléatoire et suivi des déformations	105
Figure III-28 : Cartographie des mouchetis avant et après report du film sur verre	106

Figure IV-1 : a- Photo de sphérolites d'un matériau semi-cristallin ; b-vue en coupe d'une sphérolite.	112
Figure IV-2 : Evolution normalisée du module E en fonction du taux de cristallinité d'un PET.....	113
Figure IV-3 : Les phases de déformation d'un thermoplastique semi-cristallin dont $\chi_c > 34\%$ []......	114
Figure IV-4 : Spectre d'absorption UV-Visible des films Melinex et ARclear.	116
Figure IV-5 : Spectre d'absorption UV-visible de films TAC.	117
Figure IV-6 : Montage de diffraction des rayons X du PET Melinex 506.	118
Figure IV-7 : Cliché Debye Scherrer de fibres de PET avec différentes organisations d'après CHAMPETIER [].	118
Figure IV-8 : Thermogramme par DSC du Melinex 506.....	119
Figure IV-9 : Evolutions thermique de la masse d'un échantillon de Melinex 506 et dérivée de la masse à une vitesse de chauffe de 10°C/min.	120
Figure IV-10 : a) Modèle de MAXWELL ; b) Modèle de VOIGT-KELVIN ; c) Modèles généralisé de MAXWELL-WIECHERT ; d) Modèle de BURGER ; e) Allure générale typique d'une réponse à un chargement en contrainte.	122
Figure IV-11 : Comportement d'un corps viscoélastique.	124
Figure IV-12 : Analyse dynamique mécanique en traction du PET Melinex 506.	126
Figure IV-13 : Module d'élasticité en fonction de la température pour différents polymères []	127
Figure IV-14 : Comparaison d'échantillons prélevés dans le sens de déroulement du film et perpendiculairement (sens transverse).....	128
Figure IV-15 : Effet d'un recuit du film, pendant 3 heures à 100 °C.	129
Figure IV-16 : Module élastique et angle de perte d'échantillons de film de PET soumis à des sollicitation de 5 μm à des fréquences de 0.3, 1, 3 et 10 Hz.	130
Figure IV-17 : Mesures du module élastique en fonction de la fréquence de sollicitation pour différentes températures comprises entre 100 et 200 °C.	130
Figure IV-18 : Courbe maîtresse du module élastique en fonction de la fréquence de sollicitation obtenue en choisissant 160 °C comme température de référence	131
Figure IV-19 : Évolution du coefficient de glissement a_T mis en œuvre.	132
Figure IV-20 : Évolution de $\log(a_T/a_{T_{\text{réf}}})$ avec la température en considérant une température de référence de 100 °C et confrontation avec quelques lois de comportements relevées dans la littérature.	135
Figure IV-21 : Évolutions expérimentale et analytique du module élastique de conservation G' en fonction de la	

fréquence.	136
Figure IV-22 : Comparaison des relevés des modules élastiques et visqueux, et de l'angle de perte relatifs aux deux matériaux « verre Stylys 1,67 » et PET, pour une fréquence de 1 Hz, à une vitesse de chauffe de 1 °C/min.	137
Figure IV-23 : Comparaison de la dilatation d'échantillons du verre 1.67 et du PET obtenus à partir de films à l'état brut et à l'état recuit, au cours d'une chauffe suivie d'un palier isotherme à 100 °C.	138
Figure V-1 : Mode opératoire de la détermination de la courbure du film ARclear 8796 en fonction de la température et de la pression	144
Figure V-2 : Variations du rayon de courbure du film en fonction de la température et de la pression appliquées avec la bague de 85mm	145
Figure V-3 : Variations du rayon de courbure du film en fonction de la température et de la pression appliquées avec une bague de 85 mm et un bague de 77 mm.	146
Figure V-4 : Illustration du maillage mis en œuvre à la fois dans la simulation de la phase de chauffage et dans la simulation du régime thermomécanique correspondant au gonflement ; 4 nœuds disposés sur un rayon sont répertoriés.	150
Figure V-5 : Séquence de commande 1	151
Figure V-6 : Réponse thermique du film à un chauffage de 138°C	152
Figure V-7 : Déplacements dans la direction z (niveau de gonflement).....	153
Figure V-8 : Suivi des rayons de courbure au cours de la séquence.	154
Figure V-9 : Contraintes équivalentes Von Mises.....	155
Figure V-10 : Déformations principales max, intermédiaire et minimale	156
Figure V-11 Représentation vectorielle des déformations maximale (a), intermédiaire (b) et minimale (c) relevées à t = 25 s.....	157
Figure V-12 : Séquence de commande de type 2	157
Figure V-13 : Réponse thermique du film à un chauffage de 140 °C dans la séquence opératoire de type 2	158
Figure V-14 : Déplacements dans la direction z (niveau de gonflement) dans la séquence opératoire de type 2	158
Figure V-15 : Evolutions des rayons de courbure relevés au moment du préformage et après relâchement de la pression à 0,2 bar (ou 0 bar pour la simulation) en fonction de la pression de préformage ; comparaison « simulation numérique-expérience ».....	159
Figure V-16 : Reports du film ARclear-8796 sur verre +0.00 en fonction de la température et de la pression appliquées.....	164

Figure V-17 : Reports du film ARclear-8796 sur verre +6.00 en fonction de la température et de la pression appliquées.....	165
Figure V-18 : Pression de déformation à appliquer au film en fonction de la température et du gabarit du verre	166
Figure V-19 : Cartographie des déformations principales et secondaires du film PET reporté par MARS sur des verres +0.00 et +6.00	168
Figure V-20 : Composantes des déformations d'un film de PET lors de son report avec le procédé MARS sur verre +0.00 et +6.00.....	169
Figure V-21 : Cartographie des déformations principales et secondaires du film PET reporté par PIXIS sur des verres +0.00 et +6.00	170
Figure V-22 : Composantes des déformations d'un film de PET lors de son report sur avec le procédé PIXIS sur verre +0.00 et +6.00.....	171
Figure V-23 : Surface de film pixelisé utilisé avec le procédé « grande surface »	173
Figure VI-1 : Principe et dispositif de montage du verre détourné sur le prototype PIXIS.....	179
Figure VI-2 : Les étapes du report d'un patch à l'aide d'un film complémentaire	180
Figure VI-3 : Les étapes du report petite surface avec une membrane auxiliaire complémentaire.....	181
Figure VI-4 : Mise en place du patch entre les membranes de déformation.....	182
Figure VI-5 : Les étapes du report d'un patch placé entre deux films déformables.	182
Figure VI-6 : Les étapes du report d'un patch par glissement sur un film déformable.	183
Figure VI-7 : Préparation de l'assemblage patch/matrice avec une interface liquide.....	184
Figure VI-8 : La mise en place de l'assemblage permettant le glissement du patch.	185
Figure VI-9 : Illustration des étapes du procédé de report « petite surface » : report du logo <i>ESSILOR</i>	187
Figure VI-10 : Mesures de déformations principale et secondaire d'un patch plissé.	189
Figure VI-11 : Représentation schématique du chargement en pression dans le modèle de simulation du procédé de thermoformage de "petite surface" (ici, cas particulier du cas du collage par film d'huile c'est-à-dire du contact glissant supposé idéal).....	192
Figure VI-12 : Simulation du thermoformage par gonflement d'un patch prédécoupé au gabarit d'un verre dans le cas du collage glissant ; vues de déformation en z sur la matrice (a) et sur le patch (b).	194
Figure VI-13 : Simulation du thermoformage par gonflement d'un patch prédécoupé au gabarit d'un verre dans le cas du collage glissant ; a) et b) amplitude de déformation maximale sur le patch et sur la matrice ; c), d) et e) représentations des amplitudes et vectorielles des déformations maximale, intermédiaire et minimale	

respectivement.	196
Figure VI-14 : Simulation du thermoformage par gonflement d'un patch prédécoupé au gabarit d'un verre dans le cas du collage par film sec ; influence de la valeur à la température ambiante du module élastique du joint de colle : a) amplitudes de la déformation maximale sur le patch et sur la matrice et b) amplitude du gonflement et rayon de courbure apparent.	199
Figure VI-15 : Simulation du thermoformage par gonflement d'un patch prédécoupé au gabarit d'un verre dans le cas du collage par film sec ; influence de la valeur à la température ambiante du module élastique du joint de colle ($G = 0,1 \text{ MPa}$ et $G = 500 \text{ MPa}$) : a) déformations en z, b) amplitudes de la déformation maximale sur la matrice (vues de dessus) ; c) amplitudes des déformation maximales sur le patch et sur la matrice (vues de dessous) et d) amplitudes des déformation maximales sur le patch.	200
Figure VI-16 : Géométrie du gabarit à partir du verre CK-533.....	201
Figure VI-17 : Déformations principales et secondaires de la membrane de PET auxiliaire lors d'un report « petite surface » d'un film pixellisé sur un verre de 67mm de rayon de courbure	202
Figure VI-18 : Courbes des déformations principale et secondaire de la membrane de PET dans deux directions perpendiculaires.....	202
Figure VI-19 : Comparaison des mesures et des simulations de la déformation d'un patch selon le type de glissement utilisé	203
Figure VI-20 : Courbes des déformations selon les type d'interface de glissement utilisé	204
Figure VI-21 : Cartographies des déformations majeures et mineures du report d'un patch au gabarit CK-533 et du report d'un patch de 65 mm de diamètre sur un verre stylis +6.00	205
Figure VI-22 : Déformations transversales et longitudinales des reports de <i>NOF</i> 4000 sur stylis +6.00	206
Figure VI-23 : Déformations transversales et longitudinales des reports réalisés à partir de l'antireflets-A	207
Figure VI-24 : Déformations transversales et longitudinales des reports réalisés à partir de l'antireflets-B	207
Figure VI-25 : Cartographies des déformation majeures du report d'un patch au gabarit CK-533 en fonction du type d'antireflets et du rayon de courbure du verre hôte.	208
Figure VI-26 : Cartographie des déformations de patches PET/ITO	210
Figure VI-27 : Déformations transversales et longitudinales des reports de film PET/ITO sur une base +6.00.	210
Photo I-1 : a) Le dépôt de résine par "spin coating" ; b) L'insolation UV de la résine	20
Photo I-2 : Les microcuves de géométrie hexagonale et aléatoire observées au MEB	21
Photo I-3 : Une vue en coupe de microcuves remplies.....	23

Table des illustrations

Photo III-1 : Le pupitre de commandes de PIXIS	73
Photo III-2 : Interface de contrôle de déplacement du verre.....	74
Photo III-3 : Évolution du prototype par automate.....	76
Photo III-4 : Suivi de la température et de la pression lors par l'automate lors d'un report.....	78
Photo III-5 : Cliché infrarouge d'un film chauffé par un émetteur infrarouge	84
Photo III-6 (à gauche) : Chauffage d'une préforme par des émetteurs infrarouge halogènes lors du thermoformage d'une bouteille en PET []......	96
Photo III-7 (à droite) : Émetteur céramique de la société <i>ELSTEIN</i>	96
Photo III-8 : Emetteur Infraline de la société <i>ITECH-SYSTEM</i>	97
Photo III - 9 : Mesure des déformations à l'aide d'un maillage lors du thermoformage d'un pot []	104
Photo III-10 : Contrôle cosmétique d'un verre ophtalmique a) lampe à arc b) Référentiel 17 c) spot	107
Photo V-1 : film ARclear reporté sur un verre ophtalmique.....	161
Photo V-2 : les défauts constatés lors des reports.....	162
Photo V-3 : Cliché MEB d'un film et du mouchetis	173
Photo VI-1 : a) Dalle de verre de 19 pouces et patches « petite surface »de film pixellisé prédécoupés	178
Photo VI-2 : b) Découpe laser du film pixellisé en patch au gabarit du verre hôte	178
Photo VI-3 : Observation du glissement du patch par rapport au film auxiliaire.....	188
Photo VI-4 : Défauts de collage observés au bord de l'assemblage.....	190
Photo VI-5 : Observations du phénomène de « délaminage », a) référentiel 17 et b) microscope x10	190
Photo VI-6 : Cliché microscopique des fissures des antireflets	209
Photo VII-1 : Evolution du prototype à la suite de ce travail de thèse	218
Tableau I-1 : Caractéristiques optiques des verres ophtalmiques "1,67"	31
Tableau III-1 : Propriétés thermiques du PET et de l'aluminium	81
Tableau III-2 : Propriétés des émetteurs infrarouges selon S. Andrieu [34].....	90

Tableau III-3 : Propriétés thermiques des liquides de remplissage	93
Tableau IV-1 : Caractéristiques du Melinex 506 données par le fabricant <i>DUPOND TEIJIN FILMS</i>	115
Tableau IV-2 : Propriétés optiques du film ARclear-8796.	115
Tableau IV-3 : Étude bibliographique du modèle comportemental WLF pour le PET dans différentes structures. Les valeurs extraites à partir de la caractérisation DMTA du PET Melinex 506 ainsi que dans certains cas les valeurs des constantes de temps τ_i et des modules d'élasticité g_i du modèle dynamique sont aussi rapportées..	134

Références bibliographiques

- [1] OKADA T., NAKAMURA T., NISHIOKA K., YAMAMOTO H., KOUCHI T., TOMABECHI H., *Liquid crystal spectacles*, brevet US4756605, 12 juillet 1988, Olympus Optical Co.
- [2] BERGE B. et PESSEUX J., *Lentille à focale variable*, brevet FR 2769375, 08 octobre 1997, Université Joseph Fourier.
- [3] COMISSONI C., *Dispositif atténuateur de l'intensité lumineuse*, brevet FR 1288617, 6 mai 1961.
- [4] BERETS D.J. et POSTALI R. H., *Ophthalmic glasses with variable light transmissive lenses*, brevet GB1563929A, 21 septembre 1976, American Cyanamid Company.
- [5] BELGOROD B., *Spectacles lens having continuously variable controlled density and response time*, brevet WO 8102795, 25 mars 1981.
- [6] ETSUO O., MASARU E. YOSHIHIKO K. NORIO H., *Electronic Sunglasses*, brevet US 5015086, 14 mai 1991, Seiko Epson Corp.
- [7] CANO J.P., CHAPUT F., MEYER A. MEYER T., *Verre ophtalmique à fonction électro-optique* », brevet FR 2871586, 11 juin 2004, ESSILOR International.
- [8] FRESNEL A., *Mémoire sur un nouveau système d'éclairage des phares [en ligne]*, 1822, disponible sur <http://bibnum.education.fr/files/FRESNEL_MEMOIRE_NOUVEAU_SYSTEME_ECLAIRAGE_DES_PHARES.pdf> (consulté le 23.11.2009).
- [9] O'REGAN B. and GRAETZELI M., *A low cost, high- efficiency solar cell based on dye sensitized colloidal TiO₂ films*, Nature, 1991, vol.353, n° 6346, pp. 737-740, Research supported by Swiss National Energy Office.
- [10] PONT L., *Microstructuration de surfaces pour l'optique ophtalmique pixellisée*, Thèse de l'Université de Toulouse, délivrée par l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, avril 2007.

- [11] BOVET C., CANO J.P., MATHIEU G., *Composant optique pixellisé aléatoirement, son procédé de fabrication, et son utilisation dans la fabrication d'un élément optique transparent*, brevet FR2888953, 20 juillet 2005, ESSILOR International.
- 12 BALLET J., BOVET C., CANO J.P., CHAVEL P. LEFILLASTRE P., « Optically transparent component with two sets of cells », brevet WO 2008077880, 3 juillet 2008, Essilor International et Centre National de la Recherche Scientifique.**
- [13] LIU J., CAI B., ZHU J. et al., *Process research of high aspect ratio microstructure using SU-8 resist*, *Microsystem Technologies*, 2004, vol. 10, n°4, pp. 265–268.
- [14] MicroChem Corp, *SU-8 Photoresist* [en ligne], disponible sur <<http://www.microchem.com/products/pdf/SU-8-table-of-properties.pdf>> (consulté le 23.11.2009).
- [15] SAVIN DE LARCLAUZE I., *Dépôt organosilicié par plasma froid basse pression et pression atmosphérique sur substrats microstructurés*, Thèse de l'Université de Toulouse, délivrée par l'Université Paul Sabatier de Toulouse, 2008.
- [16] SHI F., *Étude des propriétés physico-chimiques des surfaces microstructurées : application à la fabrication de verres organiques ophtalmiques digitaux*, Thèse de l'Université de Toulouse, délivrée par l'Institut National Polytechnique de Toulouse, décembre 2006.
- [17] DE GENNES P.G., BROCHART-WYART F. et QUERE D., *Gouttes, bulles, perles et ondes*, Belin, Échelles, 2002, 256 p., ISBN 9782701140551.
- [18] KAWASE T., SHIMODA T., NEWSOME C., SIRRINGHAUS H. and FRIEND R.H., *Inkjet printing of polymer thin film transistors*, *Thin Solid Films*, 2003, vol. 438, p. 279-287.
- [19] POIRIER S., *Étude et mise en œuvre de dépôts de liquides fonctionnels par procédé jet d'encre pour la réalisation de microdispositifs optiques*, Thèse de l'Université de Toulouse, délivrée par l'Institut National Polytechnique de Toulouse, octobre 2009.
- [20] Parylene Information Sheets [en ligne], disponible sur <<http://www.nbtc.cornell.edu/facilities/downloads/Parylene%20Information%20Sheets.pdf>> (consulté le 23.11.2009).

- [21] KEPPNER H., BENKHAIRA M., *Procédé de réalisation d'un dispositif à membrane en matière plastique et dispositif ainsi obtenu*, brevet US2009246546, 1 octobre 2009.
- [22] SANTUCCI V., *CVD de films polymères pour des applications optiques*, Thèse de l'Université de Toulouse, en cours.
- [23] Projet MULTIPOL [en ligne], disponible sur <<http://www.he-arc.ch/hearc/en/multipol/ProjectDescription>> (consulté le 23.11.2009).
- [24] SIPIX, published papers [en ligne], disponible sur <<http://www.sipix.com/technology/publications.html>> (consulté le 23.11.2009).
- [25] ARCHAMBEAU S., BALLEST J., CANO J.P., LEFILLASTRE P., PONT L., SAUGEY A., SHI F., *Réalisation d'un élément optique transparent comprenant une substance contenue dans des cellules*, Brevet FR2901367, 23 novembre 2007, ESSILOR International.
- [26] NAVARRO J., *Cellules photovoltaïques organiques transparentes dans le visible*, Thèse de l'Université de Toulouse, délivrée par l'Université Paul Sabatier de Toulouse, 2008.
- [27] ILLIG A., *Pratique du thermoformage*, Hermès – Lavoisier, 1999, 304 p., ISBN 2746200236.
- [28] RONNING A.J., EDWARDS W.H., *Tape applying device and method*, brevet US4242162, 30 décembre 1980, 3M.
- [29] BEGON C., DEFRANCO C., MENGES G., *Appareil pour conformer un film plan sur une lentille optique, procédé de fonctionnalisation d'une lentille optique au moyen dudit appareil, et lentille ainsi obtenue*, brevet FR2883984, 10 juin 2006, ESSILOR International.
- [30] BITEAU J., BORYSLAWSKI J., *Process for applying a layered structure on a lens*, brevet US2009165932, 2 juillet 2009, ESSILOR International.
- [31] GORLIER E., *Caractérisation rhéologique et structurale d'un PET. Application au procédé de bi-étirage soufflage de bouteilles*, Thèse de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2000.

- [32] PEGORETTI A., GUARDINI A., MIGLIARISI C., RICCO T., *Recovery of post-yielding deformations in semicrystalline poly(ethylene-terephthalate)*, Polymer, 2000, vol. 41, pp. 1857-1864.
- [33] HANKS P.L., KACZOROWSKI K.J., BECKER E.B., LLOYD D.R., *Modeling of uniaxial stretching of track-etch membranes*, Journal of Membrane Science, 2007, vol. 305, pp.196-202.
- [34] ABAQUS, version 6.6, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA.
- [35] COMSOL Multiphysics, version 3.5, COMSOL.
- [36] WILLIAMS S.J., *Engineering heat transfert*, CRC Press, 2000, 2nd éd., p. 643-660, ISBN 0849321263.
- [37] ANDRIEU S., *Étude expérimentale et numérique du chauffage infrarouge de plaques thermoplastiques pour le thermoformage*, Thèse de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2005, pp. 31-46.
- [38] MONTEIX S., *Modélisation du chauffage convecto-radiatif de préformes en PET pour la mise en forme de corps creux*, École des Mines d'Albi, Thèse délivrée par l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2001.
- [39] BORDIVAL M., LE MAOULT Y., SCHMIDT F., *Optimisation de l'étape de chauffage du procédé de soufflage de bouteilles en plastiques*, 2ème congrès de Rotomoulage, thermoformage et soufflage, 7-9 novembre 2007, ENSAM-Paris.
- [40] Propriétés de la céramique Infraline [en ligne], disponible sur <<http://www.itech-system.com/>> (consulté le 23 novembre 2009).
- [41] ROUSSEAU B., DE SOUSA MENENES D., DUNEAU G., WEISS F., ODIER P., ECHEGUT P., *Optimisation de l'efficacité énergétique d'un émetteur infrarouge par dépôt d'un oxyde noir à valence mixte* », Premier congrès interdisciplinaire sur les matériaux en France, Tours, 21-25 octobre 2002, CM14019.

- [42] ERNER A., *Étude expérimentale du thermoformage assisté par poinçon d'un mélange de polystyrènes* » ; Thèse de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris, mars 2005.
- [43] SUTTON M.A., WOLTERS W.J., PETERS W.H., RANSON W.F., MCNEILL S.R., *Determination of displacements using an improved digital correlation method*, Image Vision Computing, 1983, vol. 1, n°3, p. 133-139.
- [44] TOUCHAL-MGUIL S., *Une technique de corrélation directe d'images numériques : application à la détermination de courbes limites de formage et proposition d'un critère de striction*, Thèse de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1997.
- [45] BRANOV V.G., KERANOV A.V., VOLKOV Y.I., *Morphology and kinetics studies of spherulizations of PET* », J. Polymer Science, 1970, vol. C30, p. 271-282.
- [46] HAUDIN J.M., MONASSE B., *crystallisation des polymères dans Initiation à la chimie et à la physico-chimie macromoléculaires*, Groupe Français d'Etudes et d'Applications des Polymères, 1996, vol. 10, p. 229-283.
- [47] HAUDIN J.M. *Structures et morphologies des polymères semi-cristallins*, dans *Introduction à la mécanique des polymères*, Institut National Polytechnique de Lorraine, 1995, pp. 97-115.
- [48] VIGIER G., TABILIBOUET J., BENATMANE A., VASSOILLE R., *Amorphous phase evolution during crystallization of poly(ethylene-terephthalate)*, Colloid & Polymer Science, 1992, vol. 270, p. 1182-1187.
- [49] LADOUCE L., *Déformation non-élastique homogène et hétérogène du PET amorphe et semi-cristallin*, Thèse de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1995.
- [50] BENATMANE A., *Étude du vieillissement physique du PET amorphe et semi-cristallin* », Thèse de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1992.
- [51] MURTHY N.S., BENARCZYK C., RIM P.B., NELSON C.J., *Measurement of amorphous orientation in PET fibers by X-ray diffraction and its significance*, J. Appl. Polym. Sci., 1997, vol. 67, n°7, pp. 1363-1371.

- [52] HAUDIN J.M., G'SELL C., *Mécanismes microscopiques de déformations des polymères semi-cristallin*, Institut National Polytechnique de Lorraine, 1995, pp. 250-275.
- [53] PETERLIN A., *Molecular model of drawing polyethylene and polypropylene*, J. Mat. Sci., 1971, vol. 6, pp. 490-508.
- [54] EHRENSTEIN G.W., *Polymer-Werkstoffe : Struktur – Eigenschaften – Anwendung*, Hanser, 2nd edition, 1999, ISBN 3446211616.
- [55] BILLON N., GORLIER E., HAUDIN J.M., *Strain-induced crystallisation in bulk amorphous PET under uni-axial loading*, *Polymer*, 2001, vol. 42, pp. 9541-9549.
- [56] DAUBENY R.P., BUNN C.W., BROWN C.J., *The crystal structure of polyethylene terephthalate*, Proceedings of the Royal Society of London, 1954, vol. A226, pp. 531-542.
- [57] CHAMPETIER G., *Chimie macromoléculaire –volume II*, Hermann, 1988 2nd édition, 890p. , ISBN 270565707.
- [58] BERGMANN W., *Werkstofftechnik, Teil 1, Grundlagen*, Hanser FachbuchVerlag, 3^{ème} édition, 2000.
- [59] PLAZEK D.J., NGAI K.L., *Temperature dependencies of the viscoelastic response of polymeric systems*, Physical properties of polymers handbook, AIP Press, 1996, Chap. 25.
- [60] PICARD M., *Évolution de la microstructure d'un PET lors du bi-étirage soufflage ; Corrélation au durcissement structural*, Thèse de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris, octobre 2008.
- [61] DELOYE E., *Effet de l'architecture de chaîne sur le comportement en injection soufflage de copolyesters PET - Étude expérimentale*, Thèse de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris, février 2006.
- [62] BLUNDELL D.J., OLDMAN R.J., FULLER W., MAHENDRASINGAM A., MARTIN C., MACKERRON D.H., HARVIE J.L., RIEKEL C., *Orientation and crystallisation mechanisms during fast drawing of poly(ethylene terephthalate)*, *Polymer Bulletin*, 1999 vol. 42, pp. 357-363.

- [63] CHEVALLIER L., MARCO Y., *Identification of a strain induced crystallisation model for PET under uni-and bi-axial loading : Influence of temperature dispersion*, Mechanics of Materials, 2007, vol. 39, pp. 596-609.
- [64] ALVES N.M., MANO J.F., GOMEZ RIBELLES J.L., *Molecular mobility in polymers studied with thermally stimulated recovery. II. Study of the glass transition of a semicrystalline PET and comparison with DSC and DMA results*”, Polymer, 2002, vol. 43, pp 3627-3633.
- [65] MANO J.F., VIANA J.C., *Stress-strain experiments as a mechanical spectroscopic technique to characterise the glass transition dynamics in poly(ethylene terephthalate)*, PolymerTesting, 2006, vol. 25, pp. 953-960.
- [66] HARIDAS B., MATICE C., *Performance evaluation of polyéthylène-terephthalate (PET) angioplasty balloon designs via blow molding simulation – simulation and structural analysis*, SPE/ANTEC, 2000, pp. 2710-2712.
- [67] CRUZ C., DIANI J., REGNIER G., *Micromechanical modelling of the viscoelastic behaviour of an amorphous poly(ethylene) terephthalate (PET) reinforced by spherical glass beads*, Composites, 2009, Part A, 40, pp. 695-701.
- [68] AYMONIER A., PAPON E., CASTELEIN G., BROGLY M., TORDJEMAN P., *Influence of surface and bulk structures of acrylic PSA films onto their tack properties*, Journal of Colloid and Interface Science, 2003, vol. 268, pp. 341-347.
- [69] DEMARTEAU W., LOUTZ J.M., *Rheology of acrylic dispersions for pressure sensitive adhesives*, Progress in Organic Coating, 1996, vol. 27, pp. 33-44.
- [70] WILLIAMS J. A., KAUZLARICH J.J., *Application of the bulk properties of a silicone PSA to peeling*, International Journal of Adhesion & Adhesives, 2008, vol. 28, pp. 192-198.
- [71] LEWIS B.G. et PAINE D.C., *Applications and Processing of Transparent Conducting Oxides*, MRS Bulletin, 2000, vol. 25, n°8, pp. 22-25.

[72] BUCHANAN M., WEBB J.B. et WILLIAMS, *Preparation of conducting and transparent thin films of tin-doped indium oxide by magnetron sputtering*, Appl. Phys.Lett., 1980, vol. 37, p. 213.

[73] CAIRNS D.R., WITTE IL R.P., SPARACIN D.K., SACHSMAN S.M., PAINE D.C., CRAWFORD G.P. et NEWTON R.R., *Strain Dependent Electrical Resistance of Tin-Doped Indium Oxide on Polymer Substrates*, Appl. Phys., 2000, vol.76, p. 425-427.

[74] LEFILLASTRE P., MARTY A., *Method of bonding a film to a curved substrate*, Brevet WO2007/144308, 21 décembre 2007, ESSILOR International et Centre National de la Recherche Scientifique.

[75] BOVET C., CANO J.P., LEFILLASTRE P., MARTY A., *Method for sticking a film onto a curved substrate*, Brevet WO2009/021793, 19 Février 2009, ESSILOR International et Centre National de la Recherche Scientifique.

[76] BIVER C., BOVET C., CANO J.P., CAPLET S. et FAYOLLE R., *Scellement d'une structure cellulaire le long d'un contour*, brevet FR2930047, 12 novembre 2009, ESSILOR International.