

Rapport du MIG

Verre

Encadré par Franck Pigeonneau, Romain Besseau (OIE), Pierre-Olivier Bouchard, Daniel Pino Munoz, Romain Castellani, Ramy Netter et Elie Hachem (CEMEF)

Présenté par :

Argaud Jean-Gabriel, Basagac Mehmet, Belliard Alice, Bessoud Jeanne, Boughanmi Rim, Cinquin Alizée, Cohen Nathaniel, Gomichon Chloé, Hamzaoui Amin, Hua Lucien, Ladroue Samuel, Landais Joris, Picamal Fanny, Profit Alison, Soler Théo et Taret Guillaume



Remerciements

Nous tenons d'abord à remercier chaleureusement notre encadrant Franck Pigeonneau pour son enthousiasme, son courage, et son empathie. Il a su encadrer son tout premier MIG avec beaucoup d'efficacité, nous a fait découvrir le monde industriel au travers du secteur verrier et a su nous guider dans notre questionnement tout le long du projet. Son envie de transmettre nous a beaucoup touchés et enrichis.

Nous remercions également tous ceux qui ont encadré nos mini-projets, épaulant Franck avec bienveillance et expertise, sans qui il n'aurait pas été possible de développer des mini-projets si différents. Merci à Pierre-Olivier Bouchard et Daniel Pino-Muñoz qui nous ont introduit à la mécanique des milieux continus et à la simulation sur Abaqus. Merci à Romain Besseau qui nous a présenté la démarche de l'Analyse De Cycle de Vie et transmis les outils pour la mettre en place. Merci à Romain Castellani pour ses talents d'expérimentateur et sa disponibilité, ainsi qu'à Ramy Netter et Elie Hachem qui nous ont introduit à la simulation en mécanique des fluides et au logiciel Paraview.

Nous remercions tout le personnel des usines et centres de recherche qui ont accepté de nous ouvrir leurs portes, nous permettant de découvrir concrètement le métier d'ingénieur dans le monde industriel et nous sensibilisant aux défis industriels à relever demain. Merci au personnel de l'usine Saverglass (Feuquières), du centre de recherche Saint-Gobain Paris (Aubervilliers), de l'entreprise Pochet du Courval (Clichy), de la ligne float de Saint-Gobain Glass et de Saint-Gobain recherche Compiègne. Enfin, nous remercions tous les intervenants qui se sont déplacés pour nous délivrer un exposé et qui ont su se rendre disponibles durant toute la durée du MIG. Merci à Corinne Payen (Verallia), Xavier Capilla (institut du Verre), Jean-Marc Flesselles (Saint-Gobain Isover) et à Allan Fredholm (Corning) : ils nous ont permis de comprendre la diversité des produits et des enjeux du secteur verriers et ont su nous apporter des outils techniques pour la réalisation des mini-projets.



Sommaire

Introduction	- 2 -
I. Le verre, un matériau complexe présent dans des secteurs économiques très différents	- 2 -
1. Qu'est-ce que le verre et quelles sont ses propriétés ?	- 2 -
2. Le verre, matériau omniprésent	- 3 -
3. Processus de fabrication dépendant fortement de l'utilisation	- 4 -
II. Mais des défis communs	- 5 -
1. Des défis socio-économiques.....	- 5 -
A. Protéger ses travailleurs, une préoccupation quotidienne	- 5 -
B. Rester rentable dans des marchés changeants et en relevant constamment les défis techniques propres à la production du verre	- 6 -
2. Le défi environnemental devenu majeur.....	- 6 -
A. Une industrie polluante sur le chemin de la décarbonatation.....	- 6 -
B. L'ACV : un outil de quantification rigoureux.....	- 7 -
C. Les enjeux stratégiques, projets et engagements du secteur verrier	- 7 -
III. Des innovations pour relever le défi environnemental	- 8 -
1. En début de chaîne, augmenter le taux de calcin ?.....	- 8 -
A. Calcin et coûts.....	- 8 -
B. Impact de la filière calcin sur l'ACV.....	- 9 -
C. Optimisation d'un mélange de granulométrie	- 12 -
2. En milieu de chaîne, colorer autrement ?.....	- 17 -
A. Procédés de mélange et enjeux industriels	- 17 -
B. Coloration dans les feeders : approche expérimentale.....	- 18 -
C. Coloration dans les feeders : modélisation numérique.....	- 21 -
3. En fin de chaîne, former sans chauffage ?.....	- 24 -
A. Mesure de la probabilité de rupture en fonction des contraintes.....	- 25 -
B. Modélisations et simulations sur Abaqus de méthodes pour limiter le retour élastique.....	- 26 -
C. Brève analyse des émissions CO ₂ des deux formages	- 32 -
D. Conclusion et poursuite du projet.....	- 33 -
Conclusion	- 33 -
Annexes.....	- 37 -
Annexe I. Rapport des visites	- 38 -
1. Saint-Gobain Recherche Paris (Aubervilliers) (15 Novembre).....	- 38 -
2. Présentation du groupe Isover (16 Novembre)	- 39 -
3. Visite de la ligne float de Saint-Gobain Glass et de Saint-Gobain Recherche Compiègne (Chantereine, 60) (17 Novembre).....	- 40 -
4. Présentation de la fabrication des bouteilles par Corinne Payen de chez Verallia (18 Novembre).-	- 41 -

5. Verrerie de Biot (25 Novembre).....	- 41 -
6. Visite du site de production de verre creux Saverglass (Vendredi 19 Novembre)	- 42 -
Annexe II. Le verre et sa production	- 43 -
1. Formulation et matières premières	- 43 -
2. Fusion	- 43 -
A. Four type à brûleurs transversaux	- 43 -
B. Four type à flamme en boucle	- 46 -
3. Formage du verre creux	- 47 -
Annexe III. Mini projets	- 49 -
1. Fusion du calcin	- 49 -
A. Bilan Carbone de Saverglass	- 49 -
B. Analyse de cycle de vie	- 49 -
C. Détermination de la fraction surfacique d'air des échantillons	- 52 -
D. Calcul de la fraction volumique d'air présente dans le verre après fusion	- 54 -
E. Lien entre granulométrie et taille des bulles	- 55 -
F. Calcul de la vitesse de remontée d'une bulle en fonction de sa taille.....	- 55 -
G. Quelques précisions sur l'influence négligeable de la granulométrie sur le temps de fonte dans le cadre de notre étude.	- 57 -
2. Coloration du verre	- 60 -
A. Etude théorique de la maquette	- 60 -
B. Dispositif expérimental	- 62 -
C. Descriptif expérimental.....	- 63 -
D. Exploitation des résultats expérimentaux.	- 64 -
E. Modélisation et calculs.....	- 71 -
F. Mesure de la viscosité du glycérol	- 73 -
G. Influence de la baisse du nombre de jours de transition sur les émissions carbone fossiles. -	74 -
3. Formage à froid	- 75 -
A. Mesure des contraintes de rupture	- 75 -
B. Simulations Abaqus.....	- 78 -
C. Analyse de cycle de vie relative au formage à froid	- 84 -
C. Analyse de cycle de vie relative au formage à froid	- 84 -

Introduction

Le verre est un matériau omniprésent et inhérent à notre société, aux qualités physico-chimiques singulières et aux bénéfices sociaux, économiques et environnementaux incontestables. Il est considéré comme l'un des plus anciens matériaux façonnés par l'homme, dont les objets en verre les plus anciens remonteraient au IIIe siècle av. J.-C. Si le verre est aujourd'hui un des matériaux les plus utilisés et recyclés, son industrie est cependant soumise à des défis multiples. Au cours de notre étude, nous avons cherché à déterminer quels sont ces défis. Nous avons ensuite cherché des solutions notamment sur le plan environnemental, tant au niveau de la mobilisation des matières premières en début de chaîne de production (équipe calcin), du procédé de production du verre (équipes coloration et formage) que du transport (équipe formage) de celui-ci. Nous avons systématiquement tenté de calculer et comparer les impacts environnementaux de chacune des innovations proposées à ceux des procédés actuels (équipe ACV) tout en gardant la contrainte industrielle de rentabilité en tête.

I. Le verre, un matériau complexe présent dans des secteurs économiques très différents

1. Qu'est-ce que le verre et quelles sont ses propriétés ?

Parmi les matériaux à l'état solide, le verre se distingue. Selon Barton et Guillemet (2005), le verre est un solide amorphe qui présente un phénomène de transition vitreuse caractéristique d'un matériau obtenu par refroidissement d'un liquide. La figure 1 illustre l'évolution du volume molaire en fonction de la température. En considérant le matériau dans son état liquide, le refroidissement s'accompagne pour les solides cristallins d'une chute brutale du volume molaire à la température de fusion (chemin ABCD sur la figure 1). Le comportement pour les verres est très différent, chemin ABEF de la figure 1. Lors du refroidissement, il ne se passe rien à la température de fusion. Le matériau se trouve alors dans un état dit surfondu. En refroidissant encore le matériau, un changement dans la pente du volume molaire apparaît qui correspond à la transition vitreuse caractérisée par une température de transition vitreuse, T_g (cf. figure 1). Cette transition existe pour tout matériau : en théorie on peut faire du verre à partir de tout liquide. En pratique, il est souvent constitué de matériau à haute viscosité dans l'état liquide tel que l'oxyde de silice SiO_2 .

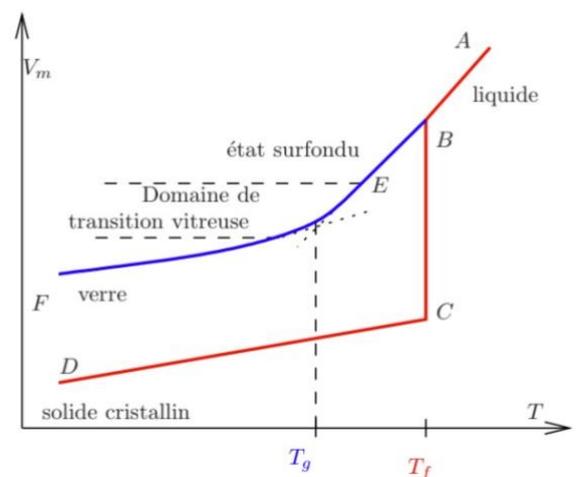


Figure 1- Evolution du volume molaire lors d'un refroidissement d'un solide cristallin et d'un verre.

Dans le langage courant, le verre est plutôt défini par ses propriétés. Le verre est l'unique matière minérale solide que l'on peut produire en grandes dimensions et sous n'importe quelle forme sans altérer sa transparence et sa rigidité mécanique. Il présente aussi l'avantage d'être durable chimiquement (des verres datant de 1000 ans sur certaines cathédrales ne se sont altérés que de quelques microns) et donc recyclable à l'infini sans perdre ses performances (Présentation de Franck Pigeonneau, le 15/11/2021). Enfin, l'état vitreux occupe plus de volume que l'état cristallin. Il est donc possible d'insérer d'autres éléments afin de modifier certaines de ses propriétés et d'en faire

apparaître de nouvelles. Ses nombreuses qualités font de lui un matériau utilisé dans des domaines très variés.

2. Le verre, matériau omniprésent

Lors de nos visites et séminaires durant la première semaine du MIG, nous avons pu nous rendre compte de cette diversité de domaines d'utilisation. De l'art à la grande industrie, du luxe à la grande distribution, tous trouvent un avantage à l'utilisation de cette matière. Au total, 115 millions de tonnes de verre sont produites chaque année dans le monde dont 33.9 millions en Europe. Cette industrie emploie 186 000 personnes en Europe dont 18 000 en France (Capilla, 2021).

Tandis que le four industriel de Saint-Gobain à Thourotte (usine de Chanteraine) produit du verre plat à destination de l'automobile, la maison Pochet du Courval s'est spécialisée dans la cosmétique et la parfumerie de luxe demandant un tout autre savoir-faire. Verallia et Saverglass fabriquent du verre creux à destination de la production de bouteilles et de bocaux alimentaires, Isover utilise ce matériau pour former de la laine de verre destinée à l'isolation. Enfin, Corning fabrique des verres fins pour des écrans de téléphone, d'ordinateur ou de télévision (voir Annexe I. pour le détail des visites). Mais ce ne sont pas les seules utilisations du verre, nous pouvons aussi penser aux domaines de la télécommunication avec la fibre optique, aux vitrocéramiques avec les plaques de cuisson, à l'habitation pour les fenêtres ou encore aux arts de la table. Les figures 2, 3 et 4 donnent un aperçu de l'ensemble des possibilités qu'offre le verre.



Figure 2 - Exemples d'utilisation du verre dans l'habitation de gauche à droite : fenêtres ([Arnaud Malon](#)), lumières, laine de verre pour l'isolation, miroir de la Galerie des Glaces à Versailles ([Myrabella](#)).



Figure 3 - Exemples d'utilisation du verre creux de gauche à droite : arts de la table, bocaux, flacons de parfum, bouteille.



Figure 4 - Autres exemples d'utilisation de gauche à droite : vitrocéramique, écrans, pare-brise de voiture, fibre optique.

Cette grande variété de domaines d'utilisation implique de nombreuses différences d'un secteur à l'autre en termes de cahier des charges et de production. La tolérance sur les défauts esthétiques, sur les normes de sécurité, les demandes de coloration et transparence du verre, de solidité et de formes plus ou moins complexes varient pour chaque produit. De plus, les entreprises ne cessent d'innover, comme Saint-Gobain qui cherche à développer des vitrages chauffants ou intégrant des diodes électroluminescentes, demandant de plus en plus de traitements particuliers du verre.

3. Processus de fabrication dépendant fortement de l'utilisation

Les processus de fabrication dépendent donc des différentes utilisations des produits finis, mais la structure générale de la chaîne de fabrication peut être décrite par la figure 5 :

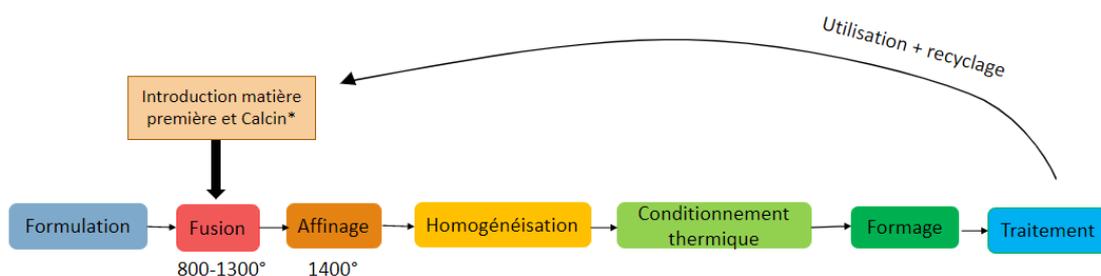


Figure 5 - Schéma de la chaîne de fabrication du verre.

Formulation et introduction des matières premières (Annexe II.1.) : Les verres d'usage courant sont pour la grande majorité des oxydes de SiO_2 , Na_2O et CaO . D'un point de vue pratique, les deux derniers oxydes sont introduits sous forme de carbonates. Ainsi, la relation donnant un liquide silicaté est la suivante :



A l'échelle industrielle, on introduit des matières premières en continu dans le four. Le mélange vitrifiable est composé du sable (silice) SiO_2 à hauteur de 70-75%, du calcaire CaCO_3 à 10-20% et de la soude Na_2CO_3 10-15% (Présentation de Corinne Payen, Verallia, le 18 novembre 2021). Ce mélange est complété par du « calcin », de 55% et jusqu'à 98% selon les produits finis (90% dans une laine de verre, jusqu'à 98% dans le verre creux pour Verallia). Le calcin correspond au débris de verre recyclé, ces débris peuvent être internes (liés aux pertes pendant la production : verres avec défauts qui ne peuvent être vendus) ou externes (retour des bennes de recyclage).

Fusion : La fusion du mélange introduit se fait entre 800°C et 1300°C dans des fours. Il se forme alors un liquide silicaté s'accompagnant d'une émission de CO_2 comme décrit dans l'équation (1). Cette décarbonatation est un des principaux facteurs de pollution de l'industrie du verre. Pour une tonne de verre, 200kg de CO_2 sont rejetés auxquels il faut ajouter le CO_2 émis par la combustion. Il existe deux types de four principaux : des fours à flamme alimentés par combustibles fossiles et des fours électriques dans lesquels l'énergie thermique est produite par effet Joule au sein même du verre fondu. Parmi ces deux types, on trouve aussi plusieurs technologies de four dépendant de l'utilisation du produit fini. Les fours à bruleurs transversaux utilisés pour le verre type « float » et fours à boucle pour le verre creux par exemple (voir Annexe II.2.).

Affinage : Cette étape a pour but d'éliminer les bulles qui se sont formées dans le verre fondu et de faire fondre les grains de sable restants. Pour éliminer les bulles, il est commun d'ajouter aux matières premières une faible quantité d'agents dit affinant. Le plus courant est l'ajout de soufre. On chauffe le verre au-delà de 1400°C afin de faire chuter fortement la solubilité du SO_2 qui permet de faire grossir les bulles par transfert de masse. De plus, l'augmentation de la température entraîne une

diminution de la viscosité qui permet une évacuation des bulles depuis la surface libre du bain de verre fondu (Pajean, 2007).

Homogénéisation : A ce stade, il existe un gradient de température entre la surface chaude et le fond, plus froid. Pour obtenir la meilleure qualité de verre possible, une phase de mélange mécanique est donc nécessaire. Dans les fours, cette dernière est réalisée en imposant des gradients thermiques à l'échelle du four. Ces derniers permettent la mise en place de courants de convection naturelle dans le verre fondu (Fourment et Fromentin, 2000).

Conditionnement thermique : Durant cette étape, on cherche à réduire la température jusqu'à une valeur requise pour le formage. Dans le cas du verre creux, cette opération est réalisée dans des canaux (feeders) qui assurent le transport du verre fondu. Les feeders ajustent la température du verre en soufflant de l'air pour le refroidir jusqu'à atteindre la température idéale (environ 1000°C) pour former le verre selon la forme qu'on veut lui donner. Dans le cas du verre float, cette étape est réalisée dans la "braise" avant le canal qui précède le déversement du verre fondu sur le bain d'étain.

Formage : Pour finir la production du verre, il faut lui donner la forme voulue. Cette étape dépend donc beaucoup de l'utilisation qu'on veut en faire. Nous avons vu durant nos visites deux méthodes de formage à chaud principales : une pour le verre plat et une pour le verre creux (voir Annexe II.3.).

Traitement : On ajoute des traitements pour améliorer les propriétés du verre. Ils existent différents types de traitements : coating, traitements de surface, trempes thermiques et chimiques.

II. Mais des défis communs

Malgré des modes de productions pluriels au sein de l'industrie verrière, il semble que se dégagent des défis communs à toutes ces usines.

1. Des défis socio-économiques

A. Protéger ses travailleurs, une préoccupation quotidienne

L'industrie du verre, comme toute industrie, constitue un lieu de travail dangereux. En 2006, 500 accidents ont été recensés (pour 25 000 travailleurs), dont un mortel et 10% des accidents ont mené à des incapacités partielles (Industrie Du Verre Creux, 2009).

La multiplication des manutentions le long de la chaîne de production est source de 80% des maladies reconnues dans le secteur, provoquant des troubles musculosquelettiques. Là encore, nous ne pouvons pas parler de l'industrie verrière en général, car les risques dépendent largement du type de verre. Dans les usines où l'on forme du verre creux (à chaud), ce sont les risques de brûlures et d'exposition longue à la chaleur au moment du formage qui sont les plus préoccupants, alors que dans les usines de verre plat, ce sont les machines et les chutes de plaques de verre qui créent le plus d'accidents (Santé Et Sécurité Sur L'ensemble De La Chaîne De Valeur, n.d.).

Par ailleurs, les risques chimiques ne sont pas nuls lors de la fabrication du verre. La silice, sous forme de poussière fine est un cancérogène avéré, et certains colorants ne sont pas non plus sans risque pour la santé des travailleurs.

En ce qui concerne la santé au travail et la pénibilité, le secteur verrier présente là encore des spécificités. Puisque les fours tournent en continu (jour et nuit, tous les jours de l'année), les horaires de travail sont très exigeants. Le manque de régularité n'est pas sans conséquence sur la santé et est donc pris en compte dans la pénibilité.

Ces constats ont mené les entreprises de l'industrie verrière à placer la protection de leurs travailleurs comme priorité. C'est le cas notamment de Saint-Gobain qui place dans ses piliers, au même niveau : éthique des affaires, engagement et diversité des collaborateurs, santé et sécurité sur l'ensemble de la chaîne de valeurs, changement climatique, économie circulaire et croissance inclusive. Concrètement, cela a mené à la création d'une charte EHS établissant des standards obligatoires dans chaque usine du groupe, et annonçant les objectifs (Travail Et Sécurité. Le Mensuel De La Prévention Des Risques Professionnels — L'INDUSTRIE DU VERRE, n.d.).

Plus généralement, des moyens de préventions ont été élaborés et rendus publics par le ministère du travail, afin de guider les entreprises de verre dans leur démarche de protection des employés (Industrie Du Verre Creux, 2009).

B. Rester rentable dans des marchés changeants et en relevant constamment les défis techniques propres à la production du verre

En relevant toujours de nouveaux défis, l'industrie du verre garde néanmoins une contrainte : rester rentable. Or, les demandes changent et il faut sans cesse s'adapter aux modifications du marché. Par exemple, dans le domaine des cosmétiques et de la parfumerie de luxe, l'émergence de nouvelles marques issues des réseaux sociaux met à l'épreuve l'industrie du verre. En effet, ces marques naissent extrêmement vite et demandent de produire rapidement, en grande quantité, de nouveaux produits. Il faut donc faire preuve d'anticipation ou développer par exemple des nouveaux outils comme Mophoz, développé par Pochet du Courval permettant de simuler les formes possibles et leur rendu une fois rempli de produit.

Par ailleurs, il faut être capable de suivre la variabilité géographique des demandes. En Europe, la demande en verre est globalement constante depuis 1960 (Capilla, 2021). En revanche, pour ce qui est du verre plat, elle est largement croissante en Inde. Pour ce qui est du verre creux de parfumerie, l'augmentation de la demande chinoise est spectaculaire (le marché asiatique sera, d'après les prévisions, comparable à celui des Etats-Unis dans 10 ans). Ainsi, pour servir de nouveaux marchés, et sachant que le verre est difficilement transportable, il vaut mieux réfléchir à une implantation conjuguant proximité à la demande et disponibilité des matières premières.

2. Le défi environnemental devenu majeur

Si les défis de rentabilité et de protection des travailleurs sont des enjeux qui ont bien été perçus comme préoccupants durant nos visites de terrain, l'urgence environnementale n'a pas non plus échappé aux verriers.

A. Une industrie polluante sur le chemin de la décarbonation

Le secteur verrier est en 2017 responsable de 2,7 MtCO₂éq de gaz à effet de serre (source : CITEPA, rapport SECTEN), principalement du CO₂. Cela représente 0,6% des émissions nationales et 3,3% des émissions de l'industrie. On recense deux sources principales pour les émissions (Capilla, 2021) :

- La décarbonation des matières premières - 20% des émissions
- Les combustibles fossiles, notamment pour le chauffage - 80% des émissions

Force est de constater que l'industrie a nettement réduit ses émissions de GES au cours de ces dernières décennies, marquée par une décroissance de 30% des émissions de CO₂ spécifique depuis 1990 et de 60% de kg de NO_x/tonne de verre et 67% de kgSO_x/tonne de verre.

B. L'ACV : un outil de quantification rigoureux

Pour guider les choix technologiques des industriels, il est nécessaire de quantifier les impacts de cette industrie sur différents plans. L'utilisation de l'analyse du cycle environnemental de vie (ACV) est adéquate car il s'agit d'une méthode normée, multifactorielle et quantitative (Jolliet et al., 2010). Cette méthode d'analyse permet d'évaluer les impacts d'une filière depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la gestion des déchets, en passant par la production et l'utilisation du produit.

La construction rigoureuse d'une ACV comprend quatre étapes : une définition des objectifs et du champ d'étude, l'analyse de l'inventaire, l'évaluation des impacts et l'interprétations des résultats (Jolliet et al., 2010). Différentes méthodes de calcul coexistent pour cette évaluation : celles orientées mid-point (qui quantifient les effets des substances émises ou consommées au milieu de la chaîne de causalité) ou end-point (qui estiment les dommages potentiels en fin de chaîne) (Besseau, 2019). Parce que l'ACV prend en compte la totalité du cycle de vie du produit, elle permet d'éviter les transferts de pollution et est donc pertinente pour notre étude.

Par ailleurs, les résultats donnés par l'ACV sont plus complets que ceux du bilan carbone par exemple, car elle quantifie plusieurs impacts, et pas seulement l'impact carbone. Le choix des impacts, à travers la sélection d'une méthode appropriée, est décisif dans la comparaison de plusieurs ACV de produits. Ils permettent de prendre en compte différents champs, que ce soit dans le domaine environnemental (émissions en GES, acidification de l'eau...) ou socio-économique (santé humaine...). (Payen, 2021).

C. Les enjeux stratégiques, projets et engagements du secteur verrier

A partir de l'ACV du produit souhaité, les industriels ou les politiques peuvent dégager les points sur lesquels ils souhaitent axer leur transition environnementale, et identifier les leviers à utiliser. Les solutions possibles pour la décarbonation de l'industrie verrière, par exemple, sont multiples :

- Utiliser de l'énergie décarbonatée : gaz, biogaz et électricité (fin probable de l'usage de fioul d'ici 2025) voire utiliser de l'hydrogène vert ?
- Améliorer son efficacité énergétique (récupérateur de chaleur, préchauffage...)
- Carbon Capture and Storage (stockage) / Carbon Capture and Use (revaloriser derrière : alimentaire)
- Augmenter son taux de calcin...

Sur ce dernier point, il se trouve que l'industrie verrière produit du verre qui contient en moyenne 56% de verre recyclé. (ADEME, 2020). Il est important aussi d'indiquer qu'en France, la totalité du verre récolté est réutilisée. Augmenter le taux de calcin dans le mélange vitrifiable possède nombreux avantages - économie de matières premières polluantes à l'extraction, économie d'énergie lors de la fusion, réduction du rejet de CO₂, augmentation de la tirée spécifique du four (production massique de verre divisée par la surface de fusion du four, généralement donnée en t/jm²), réduction du volume mis en décharge - mais de nombreux challenges : problèmes de couleur (pas de possibilité de faire du verre très clair avec beaucoup de calcin non trié), de conduite et de corrosion des fours ou encore défauts dans les produits et de contaminations.

Concrètement, des actions et des engagements préventifs et pratiques ont été développés :

- Le Projet "Close the Glass Loop" pour limiter les émissions du procédé et atteindre 90% de recyclage de verre en 2030 (versus 75% actuelle).
- L'Electrification « Furnace of the future », projet collectif mené par une alliance de 19 verriers européens et la fédération européenne du verre d'emballage (FEVE) pour la construction d'un four mixte électrique / gaz - jusqu'à 80% d'électrique - qui permettrait une baisse de 50% des émissions de CO₂.

III. Des innovations pour relever le défi environnemental

Face à l'urgence environnementale, toute la chaîne de production doit maintenant être réfléchiée en vue des objectifs européens et nationaux pour 2050, tout en gardant en tête une contrainte de rentabilité.

1. En début de chaîne, augmenter le taux de calcin ?

Le verre est, comme nous l'avons vu, recyclable à l'infini. Dans l'optique de réduire l'impact environnemental de l'industrie verrière (cf. Annexe III.1.A), il semble des plus judicieux de tirer parti de cette spécificité en ré-utilisant un maximum de verre dans les procédés de fabrication.

En pratique, le verre collecté par les centres de recyclage est trié et broyé. Cet amas de granulés de verre est appelé calcin. Ce calcin est ensuite ajouté dans les fours en même temps que les matières premières (silice, calcaire, soude ...) pour être une nouvelle fois fondu. En plus de la réduction de l'utilisation de matières premières, ce procédé présente deux avantages majeurs : lorsque l'on fond pour la première fois des matières premières, des réactions chimiques libèrent directement du CO₂ en quantité stœchiométrique (120 g par kilo de verre sans calcin), ce qui n'est pas le cas avec du calcin. De plus, une puissance moindre est nécessaire pour le fondre une nouvelle fois. On mobilise et on brûle donc moins de combustibles fossiles (Conradt, 2019).

Cependant, le principal problème de l'utilisation d'une grande quantité de calcin dans l'industrie est la formation de bulles lors de la fonte. Pour les éliminer, certains composants sont ajoutés (les affinants) et la température est augmentée au cours d'une étape qu'on appelle l'affinage. Ces composants (sulfates, arsenic, antimoine ou encore étain) sont dissous dans le verre mais leur solubilité dans le verre diminue avec la température. En cherchant à quitter le verre sous forme de gaz, ces affinants vont ainsi s'associer aux bulles déjà présentes et accélérer leur remontée (Barton & Guillemet, 2005). Trouver un moyen d'avoir initialement moins de bulles dans le bain de verre permettrait de réduire la durée d'affinage et donc la consommation énergétique.

D'autre part, l'utilisation d'un calcin de granulométrie trop fine crée un plus grand nombre de petites bulles qui peuvent conduire à la formation de mousse dans les fours (Laimböck, 1998). Cette mousse est un très bon isolant thermique qui peut réduire de 60% le flux radiatif devant servir à chauffer le verre, flux qu'il faudra compenser en augmentant le chauffage des fours. C'est pourquoi à l'heure actuelle, de nombreux industriels préfèrent simplement se débarrasser des "fines" (grains de taille inférieure à 4 mm). Un mélange de calcins de différentes granulométries dont la proportion serait précisément choisie pourrait être une voie vers l'utilisation de l'intégralité du calcin sans production de mousse. Trouver le mélange qui maximise la quantité de "fines" tout en produisant un minimum de bulles permettra de réduire le temps d'affinage et d'utiliser tout le calcin à notre disposition.

Notre étude a donc pour objectif de quantifier l'intérêt environnemental de la production de calcin grâce à l'outil d'Analyse de Cycle de vie tout en gardant en tête les questions de rentabilité. Il s'agira aussi d'expliquer et quantifier les bulles produites lors de la fusion du calcin. Enfin nous chercherons à établir une corrélation entre granulométrie et présence de mousse dans le verre. L'intérêt étant de permettre aux industriels du verre d'optimiser l'utilisation du calcin et donc de réduire leurs émissions de CO₂.

A. Calcin et coûts

D'un point de vue économique, un échange avec notre correspondant de Verallia nous a indiqué qu'en première approximation, le calcin est du même ordre de prix que les matières premières, avec un surcoût pouvant aller jusqu'à 20%. Le calcin est en effet plus "rare", ce qui peut le rendre plus cher. Néanmoins, il semble probable qu'introduire une grande quantité de calcin devienne une obligation, puisque se multiplient les réglementations en vue de décarboner l'industrie. Moins qu'une obligation,

mettre un certain taux de calcin dans le mélange vitrifiable devient de plus en plus une demande des clients comme l'Oréal, client du groupe Pochet.

B. Impact de la filière calcin sur l'ACV

Afin de valider l'intérêt environnemental d'étudier l'augmentation du taux de calcin dans le mélange vitrifiable, il s'agira de quantifier un certain nombre d'impacts environnementaux en fonction du taux de calcin introduit, ainsi que de réfléchir à la viabilité économique de cette proposition. On étudiera ici le cas particulier d'une production de verre creux d'emballage. L'ensemble des impacts calculés avec la méthode utilisée est disponible en annexe III.1.B.a).

Pour ce faire, nous utiliserons la méthode d'analyse de cycle de vie. Les données utilisées proviennent de la base de données EcolInvent. Le système que nous avons choisi correspond à l'ensemble des flux et des matières sortantes et entrantes de la production d'un kilo de bouteille de verre. La figure 6 correspond à la délimitation des frontières du système et à l'inventaire des flux correspondants.

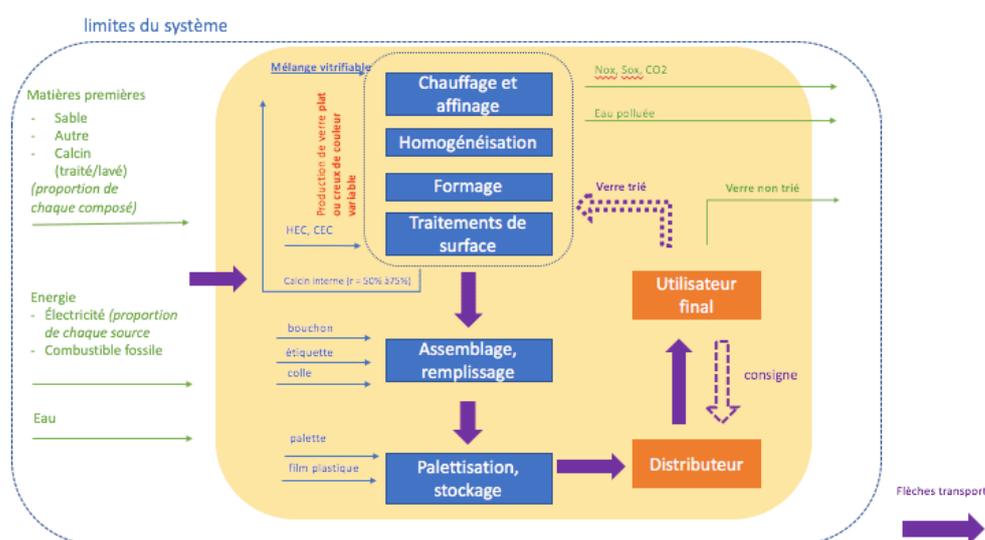


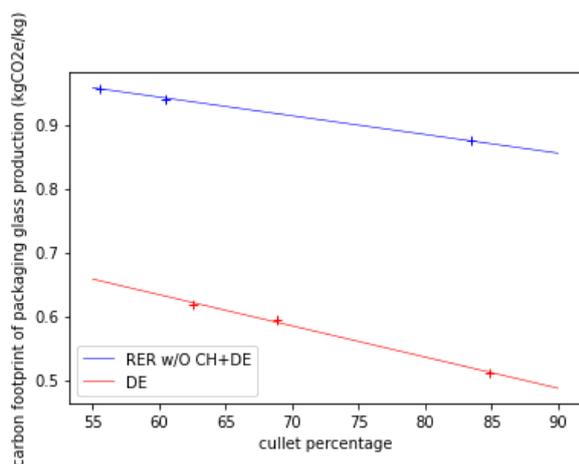
Figure 6 - Définition du système et inventaire des flux pour du verre creux d'emballage.

En réalité, seule l'activité de production sera étudiée. En plus de simplifier notre étude, cela reste pertinent pour deux raisons : le public que nous souhaitons conseiller grâce à cette ACV sont des entreprises de production de verre (qui n'ont donc pas de main mise sur le reste de la vie du produit). D'autre part, tous les paramètres dont nous souhaitons étudier l'influence interviennent dans la chaîne de production, (cf. Annexe III.1.A.a).

Les émissions directes de CO₂ sont prises en compte, ainsi que l'impact des extractions des matières premières par exemple. Cependant, les transports du produit ou son assemblage avec une étiquette et un bouchon ne sont pas considérés.

Par ailleurs, notons que les colorants en eux-mêmes n'ont pas d'influence ici, c'est bien la différence du taux de calcin propre à chaque couleur qui modifie l'empreinte carbone totale de la production pour une couleur donnée (cf. Annexe III.1.A.b).

L'étude sera faite grâce aux données de deux zones géographiques (les deux seules pour lesquelles nous avons des données disponibles) : l'Allemagne (DE) et l'Europe hors Suisse et Allemagne (RER w/o CH+DE). La figure 7 représente l'empreinte carbone par kilogramme de verre en fonction du pourcentage de calcin. Dans les deux cas, on remarque qu'une régression linéaire est possible entre le taux de calcin et l'impact carbone de la production (Voir figure 7).



Chacun des 3 points correspond à une couleur de verre différente pour les 2 zones géographiques étudiées.

Les régressions linéaires obtenues dans les deux cas sont les suivantes :

$$y = 0.00487405367481607x + 0.926260134831745$$

$$R^2 = 0.9960691214527552$$

$$y = 0.0029214026905829563x + 1.1181154789237666$$

$$R^2 = 0.9992909339074626$$

Figure 7 – Empreinte carbone totale de la production de verre en fonction du pourcentage de calcin introduit.

Remarques générales : Sans surprise, l’empreinte carbone totale de la production décroît toujours avec le pourcentage de calcin. Il n’est pas anodin de trouver une droite affine pour relier ces deux quantités. Théoriquement, il y a bien une relation affine entre la quantité d’énergie utilisée durant la production et le taux de calcin à condition que celui-ci soit inférieur à 98% (Kovacec et al., 2011). Si les variations d’énergie correspondent principalement aux variations de consommation du four, fonctionnant uniquement au gaz ou au fuel, alors, il est cohérent d’obtenir un lien de type affine entre l’empreinte carbone de la production et le taux de calcin. Des commentaires plus détaillés sur cette figure sont disponibles en annexe III.1.B.c.

Il faut maintenant vérifier qu’il n’y a pas de transfert de pollution possible qui pourrait être dû au transport du calcin et au traitement de celui-ci avant de le mettre dans le four. Il s’avère que, contrairement au plastique, le verre ne nécessite pas de traitement pour être recyclé (sauf cas particuliers : verre au plomb et tubes cathodiques). C’est donc bien au transport qu’il faut s’intéresser.

1. Prise en compte du transport du calcin, utilisation d’un modèle paramétré

Nous allons utiliser un modèle paramétré prenant en compte le transport du calcin. Les calculs seront faits en nous rapprochant le plus possible de l’entreprise de verre creux Verallia, située (à Vauxrot). Ne disposant pas toujours de données françaises, nous faisons le choix d’utiliser les données allemandes desquelles l’usine étudiée est assez proche (taux de calcin supérieurs à 80%, empreinte carbone totale plus proche de 600 g que d’1kg par kg de verre produit, électricité à part nucléaire importante...). Nous allons aussi supposer que tout le calcin provient de l’extérieur de l’usine (par manque de données). On obtient alors des résultats assez pessimistes puisqu’on considère que tout le calcin nécessite du transport.

On se concentre dans un premier temps sur l’empreinte carbone totale de la production. On crée un paramètre correspondant au pourcentage massique initial de calcin dans le mélange. Ce paramètre n’est pas indépendant des autres grandeurs en jeu : il est lié à la quantité de combustibles fossiles, de matières premières neuves, et aux distances de transport. Il nous faut déterminer les liens entre ces quantités.

Voyons comment la quantité totale de dioxyde de carbone d’origine fossile émise dans la production dépend du taux de calcin appelée « carbone dioxide, fossil ». Cette quantité prend en compte à la fois les émissions directes dues à la réaction ayant lieu dans le four, et celles dues à la combustion pour produire la flamme. Elle peut, là encore, être approchée grâce une régression linéaire pour l’Allemagne (cf. Annexe III.1.B.c).

Il nous faut ensuite déterminer les distances de transport utilisées. Dans l’usine française Verallia, les matières premières sont toutes à 40 kms environ de l’usine et l’on part du principe qu’elles sont toutes transportées en camion.

Nous avons toutes les dépendances nécessaires et on peut procéder au calcul. (cf. Annexe III.1.B.d). On choisit un taux de calcin de 60% ce qui correspond à la moyenne dans l'usine de référence.

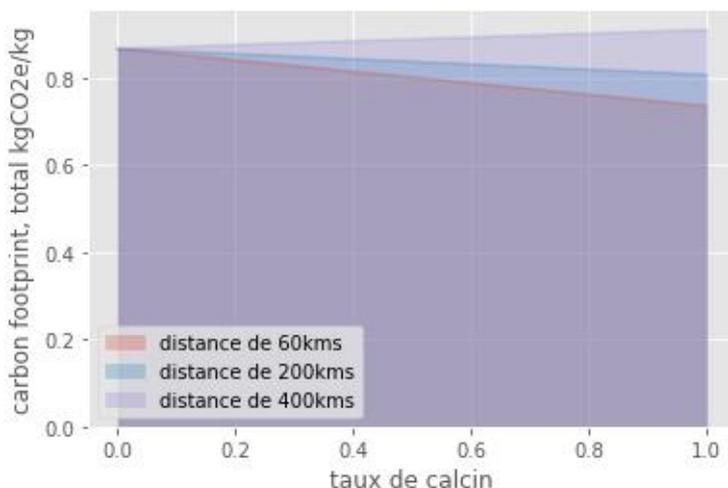


Figure 8 – Empreinte carbone de la production de verre en prenant en compte son transport sur plusieurs distances

On trouve logiquement sur la figure 8 des valeurs d'empreinte carbone plus élevées que précédemment, puisqu'on avait pris en compte uniquement la production du verre et pas le transport. Le caractère linéaire n'est pas affecté par l'ajout du transport puisque le paramètre associé est lui-même dépendant affine du taux de calcin (il vaut, en kg par km : $taux_{calcin} * 60 + (1 - taux_{calcin}) * 40$).

On peut affiner ce point en traçant la pente de la courbe précédente en fonction de la distance de transport (voir figure 9) :

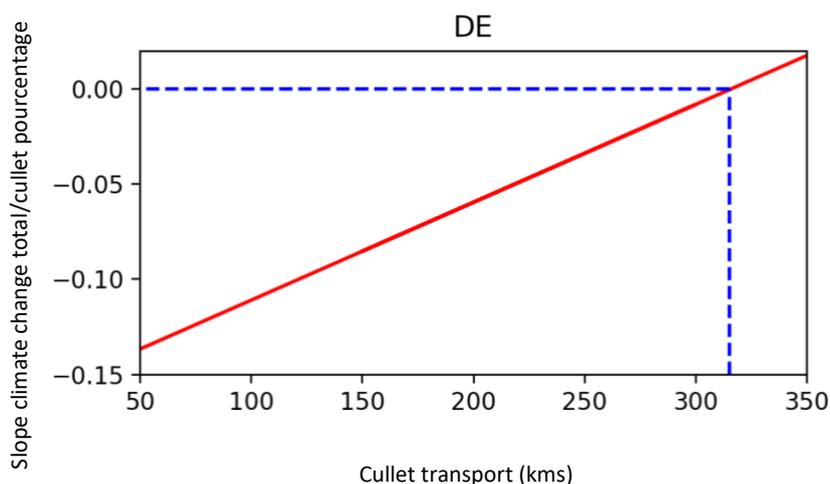


Figure 9 - Pente de l'empreinte carbone de la production selon le taux de calcin introduit, tracé en fonction de la distance de transport de ce même calcin.

Au-delà de 315 km, la pente devient positive. Au-delà de cette distance il n'est donc pas bénéfique, en termes d'empreinte carbone totale, d'utiliser plus de calcin.

Comme déjà annoncé, ces estimations sont pessimistes. D'ailleurs, les tendances globales observées et les ordres de grandeur obtenus sont plus significatifs que la valeur précise de 315 km car nous avons dû utiliser des données allemandes couplées aux distances et taux de recyclage propres à l'usine française Verallia.

2. Autres impacts

Nous avons, jusqu'ici, regardé un seul impact : l'empreinte carbone totale. Mais l'analyse du cycle de vie nous permet de nous intéresser aussi à d'autres impacts environnementaux.

Impact	Sensibilité relative à la variation du taux de calcin
Climate change, total	1,0
Dissipated water	2,3
Human health - respiratory effects	2,0
Ressources - minerals and metals	1,8
Ressources - fossils	1,3
Land use	0,38

Tableau 1 – Sensibilité de chaque impact

On peut d'abord regarder la sensibilité de différents impacts aux variations de taux de calcin, les résultats étant regroupés dans le tableau 1. En comparant la sensibilité de chaque impact avec celle de l'empreinte globale, on remarque que ce n'est pas du tout l'impact le plus sensible.

Il n'est pas surprenant d'obtenir de grandes sensibilités en termes de raréfaction des ressources mais une très faible sensibilité liée à l'occupation des sols. Cette dernière n'est pas nulle dans la mesure où l'utilisation de moins de ressources conduit à une plus faible utilisation des infrastructures d'extraction et d'affinage, et donc leur dimensionnement théorique s'en voit réduit.

On obtient aussi une grande sensibilité en termes de volume d'eau polluée. Cela peut s'interpréter ainsi : dans le mélange vitrifiable, on ajoute de l'eau pour éviter l'envol de poussières fines. Or, quand on ajoute du calcin, on baisse la quantité de sable nécessaire donc la quantité de particules fines.

Enfin, il y a une grande sensibilité au critère de santé humaine ce qui, là encore, est cohérent. En effet, le chauffage du mélange vitrifiable sans calcin émet en quantité importante des SO_x et des NO_x, alors que le chauffage du calcin n'émet pas de molécules dangereuses pour la santé humaine.

En conclusion, à condition que le lieu de récolte du calcin soit à distance comparable ou inférieure à celle des approvisionnements en matières premières, introduire plus de calcin permet de réduire significativement l'impact carbone global de la production du verre.

De manière générale, modifier le taux de calcin constitue un levier pour réduire les impacts en termes d'émission directes de CO₂, de raréfaction des ressources fossiles, d'eau polluée et de santé humaine (problèmes respiratoires).

C. Optimisation d'un mélange de granulométrie

Étant donné qu'augmenter le taux de calcin permet bien, sous certaines conditions, de faire des progrès significatifs sur le plan environnemental, il est légitime de chercher dans quelle mesure il serait concrètement viable de le faire, notamment en étudiant la formation de bulles et de mousse lors de la fusion.

1. Méthode et approche

Par manque de moyens et dans le souci de faciliter notre étude, nous ne pouvons pas conduire nos expériences dans des fours industriels. Nous avons travaillé avec des creusets en alumine, remplis de verre broyé et mis à chauffer dans un four à notre disposition dont la température de chauffe ne peut excéder 1100°C. Les phénomènes physico-chimiques qui nous intéressent restent néanmoins les mêmes. De plus et contrairement aux industriels, nous n'utilisons que du calcin pour nos expériences. Nous cherchons en effet à étudier la formation d'un verre d'origine complètement recyclée. Le verre principalement utilisé au cours des expériences est un verre ambre utilisé comme bouteille de bière. La composition en oxydes majoritaires est donnée dans le Tableau 2.

SiO₂	Al₂O₃	Na₂O	K₂O	CaO	MgO	Fe₂O₃
71,7	2,0	12,2	0,8	10,7	1,8	0,4500

Tableau 2 - Composition (% massique) en oxydes majoritaires du verre utilisé au cours des expériences.

Pour quantifier les bulles apparues dans le verre après sa fusion, nous avons mis en place deux méthodes visant à déterminer la fraction volumique ou surfacique d'air dans le verre. Afin de déterminer la fraction volumique, nous mesurons la masse volumique apparente du verre solidifié et, ayant accès à la masse volumique de l'air et ayant établi celle du verre utilisé, il est alors possible de calculer cette fraction volumique. De plus, nous établissons la fraction surfacique de bulles sur des coupes de verre par analyse numérique des images prises avec un microscope optique. Ces deux méthodes sont détaillées en annexe. La comparaison de ces deux valeurs est par ailleurs intéressante car il a été démontré qu'elles sont théoriquement égales (Underwood, 1969).

2. Granulométrie

Lors de son traitement, le calcin est broyé et une grande variabilité de granulométrie est inévitablement présente dans le mélange introduit dans le four. Nous avons donc cherché, dans un premier temps, à quantifier le nombre de bulles formées lors de la fusion d'un calcin de granulométrie homogène. Nous avons donc broyé du verre que nous avons séparé à l'aide de tamis. Nous les avons ensuite fait chauffer à une température de 1000°C pendant 15 minutes.

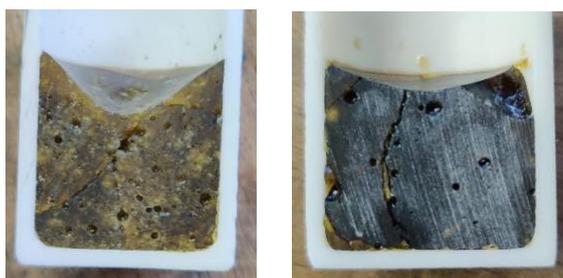


Figure 10 - Coupe de creusets après 15 min à 1000°C pour une granulométrie fine (< 1 mm) à gauche et une granulométrie grossière (> 4mm) à droite.

Les images de la figure 10 confirment bien l'expérience des industriels qui observent plus de bulles lorsque la granulométrie du calcin est plus fine. Ceci peut s'expliquer par le fait que le calcin de granulométrie fine donne naissance à des bulles plus petites, dont la vitesse de remontée est inférieure à celle de bulles plus grosses, et qui vont donc rester piégées dans le verre. On trouvera en annexe le détail de ces calculs.

Après ces premières expériences d'introduction à notre travail qui confirment un comportement attendu, il convient d'étudier les paramètres de temps et de température pour les fixer de la façon la plus pertinente possible dans nos prochains essais.

3. Temps de cuisson

Si l'étape de fusion du verre prend jusqu'à 24 h en moyenne, c'est entre autres pour laisser aux bulles le temps de s'échapper. Nous avons donc voulu voir l'influence du temps de cuisson sur la quantité de bulles obtenues. Pour ce faire, nous avons préparé des creusets remplis de verre de granulométrie unique et fixée, que nous avons fondus à 1000°C pendant des durées variables. La figure 12 correspond aux coupes des creusets obtenues après fusion de 20, 40, 60 et 80 min.

On observe sur la figure 11 les différentes étapes de l'évacuation des bulles : comme on a une granulométrie fine, on forme initialement beaucoup de petites bulles ($t = 20$ min), mais celles-ci ne peuvent remonter que si elles ont une taille suffisante et elles vont donc chercher à s'associer pour former de plus grosses bulles (à partir de $t = 40$ min). On remarque ainsi que le nombre de bulles diminue, ce qui est associé à une réduction du volume total de verre formé observable sur la photo.

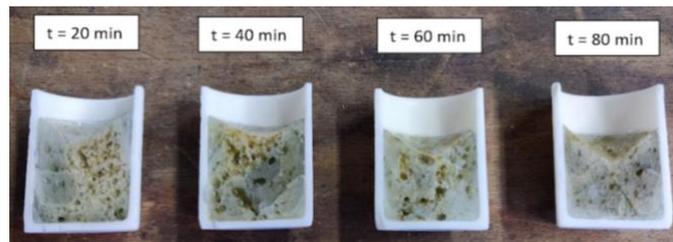


Figure 11 - Coupe de creusets de calcin fin (diamètre < 1 mm) après fusion à 1000°C pendant des durées variables

Lorsque l'on s'intéresse à la fraction surfacique de bulles, on observe sur la figure 13 des résultats cohérents à partir de 40 minutes : la proportion d'air diminue avec le temps de cuisson. En revanche, le résultat sur le creuset chauffé pendant 20 min dénote, ceci est probablement dû à la difficulté d'exploiter numériquement une image avec beaucoup de petites bulles qui ne contrastent pas suffisamment avec le verre plein.

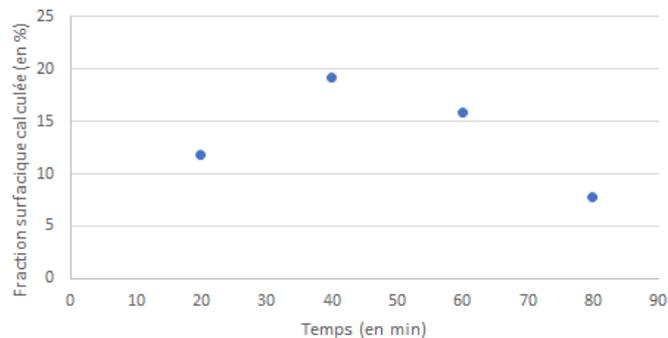


Figure 12 - Fraction surfacique occupée par les bulles pour un calcin fin cuit à 1000 °C pour différents temps de cuisson.

En revanche, lorsque la granulométrie est plus grande, l'essentiel du dégazage se fait en moins de 30 min et donc au-delà, le temps n'a pas d'influence sur la quantité de bulles. On peut observer sur la figure 13 l'aspect identique des creusets. Notons que les fissures n'apparaissent que lors du refroidissement, une fois les creusets sortis du four.

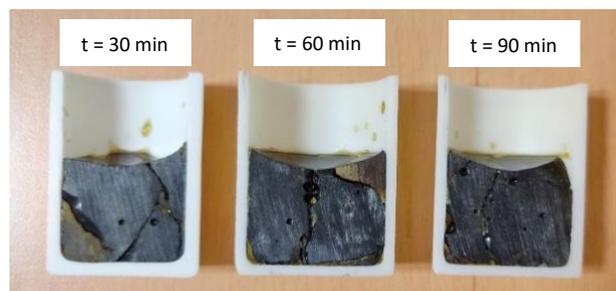


Figure 13 - Coupe de creusets de calcin gros (> 4mm) après fusion à 1000°C avec des durées variables.

4. Température de cuisson

La température de fusion du verre se situe entre 800°C et 1400°C. Comme il s'agit d'une grande fourchette, nous nous sommes également posés la question du rôle de la température lors de la fusion du verre. Nous avons donc regardé les différences obtenues pour un verre de granulométrie fine, cuit pendant 20 min à 1000 et 1100°C.



Figure 14 – Creusets de verre de granulométrie fine (< 1mm) chauffés pendant 20 min à 1000°C (à gauche) et 1100°C (à droite)

L'explication de ce phénomène étonnant de débordement observé sur la figure 14 est la suivante : les creusets enfournés contiennent de l'air à température ambiante piégé entre les grains. Lorsqu'il est porté à haute température, l'air se dilate selon la loi des gaz parfaits $PV = nRT$. Or, la surface libre de verre à la surface des creusets va fondre en premier, constituant une couche imperméable et empêchant les bulles piégées de s'échapper. On forme ainsi une grande poche d'air au sein du verre à 1100°C qui se distingue des résultats à 1000°C.

D'un point de vue mathématique, lorsque l'on différencie la loi des gaz parfaits on aboutit à :

$$\Delta V = \frac{\Delta T \cdot V}{T}$$

En prenant : $\Delta T = 100\text{K}$, $T = 1273\text{K}$, $V = 20\text{cm}^3$ on obtient $\Delta V = 1,6\text{cm}^3$, soit une augmentation de 8 % du volume. Les creusets étant remplis au maximum lorsqu'on les place dans le four, cette augmentation est suffisante pour que la matière déborde des creusets.

On pourrait également envisager des réactions chimiques pour expliquer ce comportement, mais celles-ci se produisent en général pour des températures supérieures à 1300°C, on peut donc supposer qu'elles n'ont pas lieu dans notre cas, ce qui permet également de décorréler tous les paramètres.

Comme il y a plus de bulles lorsque l'on augmente la température, nous avons poursuivi l'étude dans le cas le plus critique, c'est-à-dire celui où la température est la plus élevée. Il faut cependant préciser que notre four ne peut chauffer au-delà de 1100 °C. Il faudra donc se contenter de cette température qui semble cependant bien suffisante pour faire fondre le verre compte tenu de l'aspect du verre en sortie de four.

5. Optimisation d'un mélange de granulométries

Influence de la granulométrie sur la vitesse de chauffe

On pourrait penser que la granulométrie du mélange modifie de manière significative la nature des transferts thermiques. Isabelle Tannou, cheffe de projet R&D chez Verallia, a pu nous expliquer que la couleur du verre modifie le rayonnement thermique au sein du mélange de calcin. Or, cette différence n'est notable qu'entre le verre clair et le verre coloré. Nous avons dans tous les cas basé notre étude uniquement sur du verre ambré afin de s'affranchir de ces variations.

On modélisera par la suite notre milieu granulaire par un milieu continu dont la conductivité thermique équivalente peut être déterminée en s'appuyant sur les travaux de Zehner et Schlünder (Zehner & Schlünder, 1972). La conductivité thermique effective du milieu prend la forme suivante :

$$\lambda_{eff} = \lambda_{gaz} \left(1 - \sqrt{1 - \varphi} + \frac{2k\sqrt{1 - \varphi}}{k - B} \left(\frac{k(k - 1)B}{(k - B)^2} \ln\left(\frac{k}{B}\right) - \frac{1 + B}{2} - \frac{k(B - 1)}{k - B} \right) \right)$$

Avec $k = \frac{\lambda_{solide}}{\lambda_{gaz}}$ $B = 1,25 \left(\frac{1 - \varphi}{\varphi}\right)^{10/9}$.

φ correspond à la fraction volumique de gaz, ici de l'air. Le solide correspond quant à lui au verre.

On prendra $\lambda_{verre} = 1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $\lambda_{air} = 0,073 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ à 1100 °C.

Obtenir λ_{eff} nous donnera accès à la diffusivité thermique du milieu équivalent (qui dépend aussi de la masse volumique équivalente et de la capacité thermique massique équivalente, plus aisément calculables).

La diffusivité donne accès au temps caractéristique des transferts thermiques soit près de 10 min pour le calcin fin contre près de 12 min pour le calcin de plus grande taille. Cette différence n'est pas notable à notre échelle de travail.

Cela nous permet de simplifier notre modèle et nos explications sans perdre en pertinence. Le reste de l'étude pourra se focaliser sur la corrélation entre granulométrie et bulles/moussage. On trouvera de plus amples explications sur la modélisation et le protocole de mesure ainsi que les résultats détaillés en annexe.

Corrélation entre granulométrie et formation de bulles

Les études précédemment menées visaient à qualifier le comportement limite du calcin avec une granulométrie homogène. Or, vis à vis de la portée industrielle de notre étude, il semble important de se focaliser sur des mélanges de granulométries différentes. Puisque nous avons établi que le problème de bulles venait essentiellement du calcin fin (grains de taille inférieure à 1 mm), nous allons faire varier sa part toutes choses égales par ailleurs. Les résultats regroupés graphiquement sur la figure 15 ont été obtenus pour une cuisson de 15 min à 1100 °C. Les fractions volumiques ont été obtenues par pesée alors que les fractions surfaciques sont déterminées par analyse d'image.

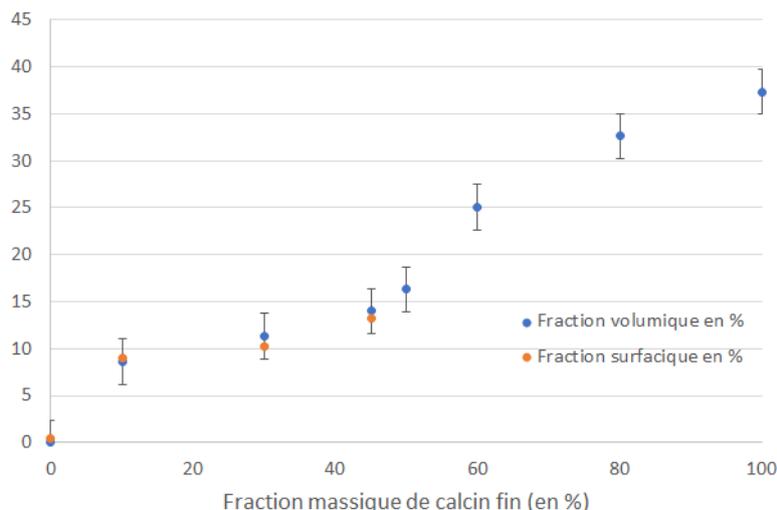


Figure 15 - Fraction volumique et surfacique d'air dans le verre après coulée en fonction de la fraction massique en calcin fin initialement dans le creuset.

Nous pouvons ainsi remarquer, comme l'atteste la figure 16 la cohérence entre les résultats volumiques et surfaciques. Cependant, la méthode d'analyse surfacique n'est pas pertinente dans les cas de forte présence de mousse. Cette dernière rend l'analyse des contrastes de couleur impossible.

C'est pourquoi les résultats présentés ici s'arrêtent après 45%. La zone de virage autour de 50 % en masse de fine concorde avec l'apparition de mousse caractérisée par une couleur beaucoup plus claire que celle du verre ambré utilisé, ce que l'on remarque bien sur la figure 16 regroupant les coupes des creusets.

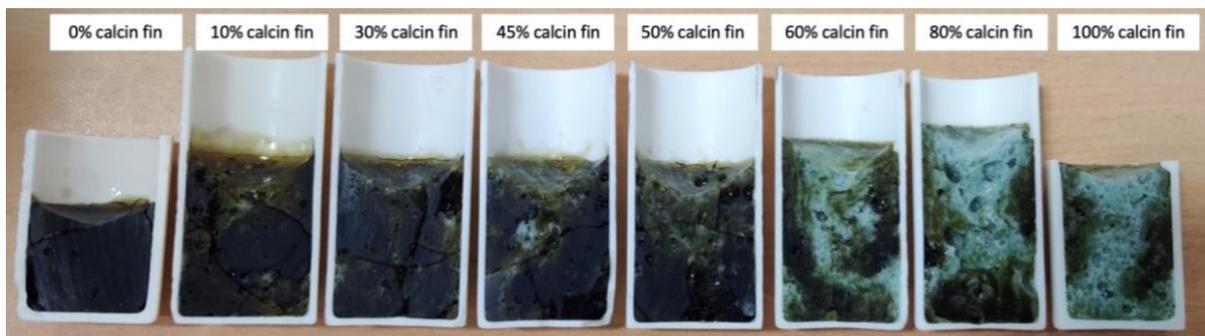


Figure 16 - Aspect du verre après cuisson de 15 minutes à 1100°C pour différentes fractions en calcin fin.

6. Conclusion de l'étude

Les chiffres obtenus tels qu'ils sont ne peuvent en réalité pas être directement appliqués à un four industriel de par la différence des ordres de grandeur. En revanche, l'étude montre qu'il est possible de trouver un modèle reliant la part de bulles et l'apparition de mousse à la proportion de fines dans le calcin.

Il semble donc totalement possible de trouver, à échelle industrielle, le mélange de calcins de granulométries différentes permettant un compromis entre l'utilisation de tout le calcin et la facilité de fabrication. Ceci permettrait alors de se rapprocher au maximum du 100% calcin.

2. En milieu de chaîne, colorer autrement ?

Nous venons d'étudier un moyen de réduire l'impact environnemental de la fusion en modifiant le mélange vitrifiable, en tout début de chaîne de production. Mais en milieu de chaîne de production, il semble que la méthode de coloration puisse elle aussi être questionnée.

A. Procédés de mélange et enjeux industriels

La coloration du verre dans une chaîne de production se fait principalement par l'ajout de « *fritte* », morceau de verre de couleur très prononcée directement introduit dans le verre (Houdaer, 2005). Les couleurs des frittes sont obtenues par l'ajout de composants chimiques tels que des ions ou des atomes métalliques (Weyl, 1976).

Dans le cas d'un four *float* (comme celui détaillé dans l'annexe I.4), où le verre est étendu sur une nappe d'étain en fusion directement à la sortie du four, l'homogénéisation du verre se fait au sein du four par des mouvements de convection naturelle. Il est donc impossible de le colorer partiellement et un changement de teinte nécessite de purger l'ensemble du four. D'autres fours, comme ceux utilisés dans la production de verre creux, font appel à des canaux de distribution, les *feeders*, qui séparent la production totale du four et l'amènent dans les différentes chaînes de production (Fromentin & Fourment, 2000). Il est alors possible de colorer le verre directement dans les *feeders*, ce qui permet, contrairement au premier type de coloration, de réduire le temps de transition des fours et donc les pertes de verre, réduisant par la même occasion la consommation énergétique du procédé, ramenée à 1 kg de verre produit. Dans ce genre de production, l'homogénéisation thermique et colorimétrique est réalisée grâce à des agitateurs, appelés *stirrers*, qui sont composés de pales

disposées par rangées le long du *feeder* (Fromentin & Fourment, 2000). Nous nous intéresserons à l'optimisation de la vitesse d'homogénéisation de la couleur dans ces feeders.

1. Validation de la pertinence de l'étude des méthodes de coloration dans les feeders sur le plan des émissions CO₂ d'origine fossile et sur le plan économique

Sur le plan environnemental, colorer dans les feeders permettrait, comme déjà dit, de réduire le temps de transition entre deux couleurs et donc, de réduire le nombre de jours où l'on produit "à vide". Ainsi, les émissions de CO₂, ramenées à une bouteille, s'en verraient réduites. Plus précisément, passer d'un temps de transition d'environ 5 jours (données de Frédéric Dupuis, directeur R&D chez Saverglass) à 15h (temps obtenu par coloration dans les feeders chez Saverglass) permet de réduire les émissions de CO₂ d'origine fossiles d'environ 20% (calculs en Annexe III.2.G), ce qui est très intéressant.

Sur le plan économique, il existe un seul inconvénient majeur à la coloration dans les feeders : on ne peut qu'y faire des colorations assez pâles (notamment les bouteilles de vins ne peuvent pas être colorées de cette façon). Seul un coût initial dû à l'achat des machines est présent mais est amorti au cours de l'utilisation.

En conclusion, colorer dans les feeders paraît intéressant sur le plan environnemental et sans grand obstacle du côté économique.

B. Coloration dans les feeders : approche expérimentale

Pour explorer les performances d'agitateurs dans un feeder, on modélise le système industriel pour expérimenter dessus. Cette modélisation expérimentale servira ensuite à valider une simulation numérique, plus flexible que l'expérience. Les fours sont des infrastructures extrêmement complexes (conditions de pression et température exigeantes), à grande inertie et fonctionnant en permanence. Ils ne sont donc pas adaptés à des expérimentations scientifiques qui demandent une grande flexibilité. Par conséquent, nos expériences sont réalisées sur une maquette réduite qui utilise un fluide « modèle », ici le glycérol, pour modéliser le verre. Celle-ci aura pour but de nous permettre de qualifier et quantifier l'efficacité du mélange produit par un système d'agitation industriel.

1. Réalisation de la maquette : principe de similitude

La première étape consiste en la conception de la maquette. L'expérience réalisée fait intervenir les cinq grandeurs suivantes : le temps de mélange t_m quantité que l'on cherche à connaître, la masse volumique du fluide en écoulement ρ , la viscosité dynamique du fluide η , le diamètre des pales D , et la vitesse de rotation de l'agitateur ω .

L'expérience peut se mettre sous la forme d'une équation faisant apparaître tous ces paramètres. En choisissant correctement les unités grâce au théorème de Vaschy Buckingham, on arrive à transformer notre équation à cinq inconnues en une équation à deux inconnues. Ces dernières sont alors deux grandeurs sans dimension (Annexe III.2.A - Etude théorique de la maquette) : le produit $t_m \omega$ et le nombre de Reynolds $Re = \frac{\rho D^2 \omega}{\eta}$.

On a ainsi : $t_m \omega = f(Re)$, où f est une fonction à déterminer.

Alors le principe de similitude stipule que deux écoulements sont similaires si les nombres de Reynolds sont égaux. Comme la similitude est complète, l'égalité de $t_m \omega$ est également vérifiée. Comme par ailleurs les conditions expérimentales fixent la dimension caractéristique de l'agitateur (réduction d'échelle 1/5), la viscosité du fluide et sa masse volumique dans le choix du glycérol (liquide

peu cher peu dangereux et suffisamment visqueux – Annexe III.2.F Mesure de la viscosité du glycérol), la vitesse de rotation des pales est imposée par l'équation qui suit :

$$\omega_2 = \omega_1 \frac{\eta_2 \rho_1 D_1^2}{\eta_1 \rho_2 D_2^2}$$

2. Description de l'expérience

Notre maquette est un domaine fermé. Le dispositif expérimental est schématisé sur la Figure 17. Elle consiste en une cuve en verre surélevée par un support réalisé par impression 3D. Un miroir est placé à 45° sous la cuve. Il réfléchit le fond de la cuve vers la prise de vue, qui prend des photos à intervalle de temps régulier (fonction 'timelapse'),- (Annexe III.2.B – Dispositif expérimental)

La cuve est remplie avec 1.3L de glycérol qui modélise le verre en sortie du four. Sont placées dans la cuve, des agitateurs à pales de différents pas et types, à vitesse de rotation réglable. L'agitateur tournant dans le sens horaire a des pales à pas à droite, tandis que celui tournant dans le sens trigonométrique a des pales à pas à gauche. Le but est d'induire une poussée du liquide vers le haut. Pour étudier l'homogénéité du mélange, nous injectons en un point de la cuve 10 mL de glycérol très coloré et nous suivons sa dispersion grâce à l'appareil photo.

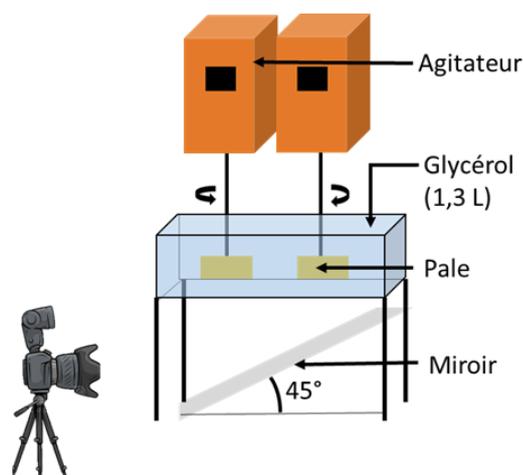


Figure 17 – Schéma du dispositif expérimental

Les images sont ensuite passées en niveau de gris, et la moyenne de l'intensité des pixels d'une zone choisie est calculée au cours du temps grâce au logiciel ImageJ. Les courbes obtenues sont lissées à l'aide d'une moyenne glissante, et nous calculons ensuite le temps d'homogénéisation, c'est-à-dire le temps que met la valeur lissée de la moyenne des pixels à atteindre 97% de sa valeur finale. Le détail du traitement des données est disponible dans l'annexe III.2.D - Exploitation des résultats expérimentaux. Pour conclure sur l'homogénéité de la cuve, nous observons le maximum des temps d'homogénéisation pour les différentes zones.

Plusieurs expériences sont réalisées, faisant varier respectivement le nombre d'agitateurs, le sens de rotation, la zone de dépôt du colorant, la géométrie des pâles ainsi que la vitesse de rotation. (Annexe III.2.C Descriptif expérimental)

3. Exploitation des résultats

L'intégralité de nos résultats sont exploités en annexe (Annexe III.2.D exploitation des résultats expérimentaux). En voici un résumé obtenu pour une configuration à deux agitateurs tournant à une vitesse de rotation de 21 tour/min. La figure 18 donne les courbes de niveaux de gris moyen des pixels en fonction du temps, pour une expérience où le colorant est injecté entre les agitateurs.

Tout d'abord, nous observons que le temps d'homogénéisation dépend fortement de la zone d'injection choisie, d'où la décision de maximiser ce temps sur différentes zones choisies judicieusement pour conclure à l'échelle de la cuve. Par exemple, pour l'expérience avec injection de colorant au centre, le temps d'homogénéisation de la zone en haut à droite est de 202s contre 588s pour la zone en haut à gauche, qui couvre un point de stagnation (Figure 18).

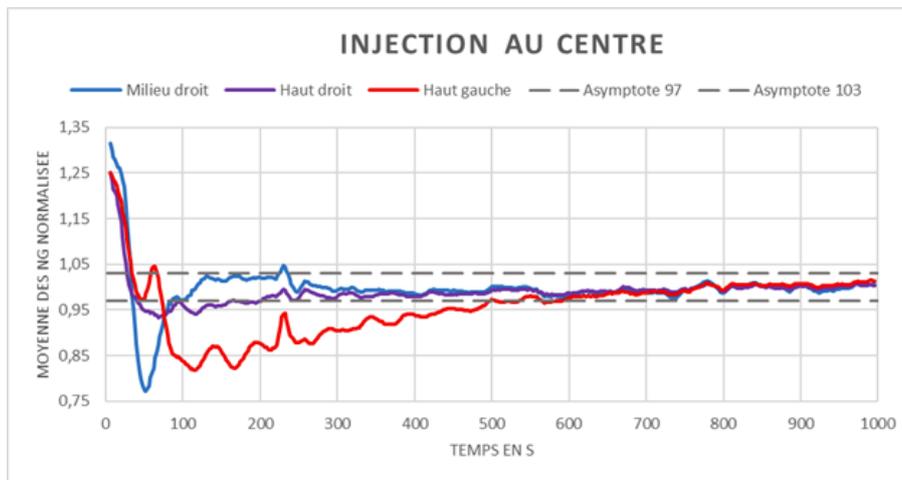


Figure 18 - Evolution de la coloration de zones (en niveaux de gris) pour un dépôt de colorant au centre de la cuve.

Notre expérience étant réalisée en système fermé, dans une cuve, elle ne peut que partiellement rendre compte de la coloration à grande échelle dans laquelle le verre avance à une certaine vitesse le long du feeder (le débit massique dépendant de la cadence de production et donc du type de verre produit). Nous devons adapter les résultats pour pouvoir conclure en système ouvert. Pour cela, nous avons introduit un 'temps de résidence' du verre dans le feeder, calculé de la façon suivante :

$$t_{res} = \frac{\rho V}{D_m} = 767s$$

où ρ est la masse volumique du verre, V le volume de la zone de mélange et D_m le débit massique du verre fondu dans le feeder.

Pour que les résultats soient concluants, il est donc nécessaire que le temps d'homogénéisation soit inférieur au temps de résidence.

Une autre différence entre le système réel et la maquette est la présence de points de stagnations engendrés par les coins de la cuve. Dans le système réel, deux des parois de la cuve sont inexistantes, ce qui réduit les points de stationnement. De plus, le verre s'écoule vers la sortie du feeder dans le système réel, tandis qu'il reste dans la cuve lors des expériences. Ceci tend à réduire l'importance de l'homogénéisation des points de stagnation dans la cuve, puisque le verre avancera à terme vers des zones mieux mélangées. C'est pour cela qu'on donnera parfois deux temps

d'homogénéisation : un temps d'homogénéisation parfaite et un temps d'homogénéisation global qui ne tient pas compte des zones de stagnation.

Enfin, les temps d'homogénéisation mesurés pendant l'expérience doivent être ramenés à une valeur pour le système réel par le principe de similitude.

D'après le principe de similitude, nous avons :

$$t_{m_2} \omega_2 = t_{m_1} \omega_1$$

D'où :

$$\frac{t_{m_1}}{t_{m_2}} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = 1,13$$

4. Critique de la méthode

Une question importante que nous nous sommes posés quant à la coloration est la pertinence de la méthode analytique vis-à-vis de la méthode empirique. Pour calculer un temps d'homogénéisation, faut-il se contenter de l'observer "à l'œil", ou bien calculer le temps de réponse à 97% obtenu sur les relevés des moyennes de niveau de gris ? Cet arbitrage entre les deux méthodes représente un enjeu primordial et ne se limite pas à cette simple expérience. À titre d'exemple, des industriels que nous avons contactés nous ont affirmé que l'œil primait toujours sur la mesure, même si celle-ci était négative. En effet, si la mesure semble plus exacte car plus rigoureuse, nous avons néanmoins pu constater des écarts importants avec le rendu visuel : plusieurs zones décrites comme 97% homogènes d'après nos courbes ne l'étaient pas visuellement.

De fait, lors de l'exploitation des données, nous nous sommes rendu compte que le temps d'homogénéisation mesuré avec notre méthode était largement dépendant de la taille de la zone choisie. En effet, si la zone est trop grande, l'ordinateur déclare le mélange homogène avant un œil humain, et donc trop tôt. Cela s'explique car les imperfections dans le liquide sont trop fines par rapport à la zone, et leur valeur est noyée dans la moyenne des pixels. Pour autant, les zones d'étude ne doivent pas être choisies trop petites pour éviter une trop grande influence du bruit. Nous avons donc choisi la taille des zones et leur position en observant auparavant les images, pour étudier plus précisément l'homogénéisation des zones de stagnation.

C. Coloration dans les feeders : modélisation numérique

En parallèle des expérimentations, nous avons décidé de faire des simulations numériques. En effet, réaliser l'expérience pose plusieurs problèmes. La mise en place du montage prend 40 minutes, il n'est pas possible d'observer l'homogénéisation par étape et chaque expérience dépend de nombreux paramètres ce qui empêche d'avoir une répétabilité de certaines expériences.

1. Simulation numérique

Cette alternative constitue un enjeu majeur dans le domaine de la coloration du verre. En effet, elle peut permettre aux entreprises de l'industrie verrière de déterminer les paramètres (taille des pales, vitesse de rotation des agitateurs, position initiale du dépôt de colorant...) qui optimisent leur production de verre coloré. La simulation numérique facilite l'observation et la détermination de

champs qui sont très dures à obtenir expérimentalement, comme la mesure de la vitesse en tout point de la cuve ou encore le taux d'usure des agitateurs.

La simulation numérique est réalisée à l'aide de la librairie C++ Cimlib_CFD développée dans l'équipe de Calcul intensif et Mécanique des fluides du CEMEF. Nous pouvons ensuite visualiser les champs solution à l'aide du logiciel de post-traitement Paraview.

La simulation numérique repose sur la résolution des équations de la mécanique des fluides, soit les équations de Navier-Stokes. Ici, le fluide est considéré incompressible et la viscosité dynamique est constante (fluide de Newton). La première étape repose sur la discrétisation de notre domaine de calcul à l'aide d'éléments tétraédriques comme représenté sur la figure 19. Grâce à la librairie CIMLIB_CFD, les agitateurs sont immergés dans le maillage de la cuve. De sorte à assurer une bonne précision, le maillage est adapté autour des agitateurs.

Les champs solutions sont la vitesse et la pression qui sont obtenues par la résolution des équations de Navier-Stokes sous forme variationnelle comme décrit dans l'annexe III.2.E - Modélisation numérique calculs.

La première exploitation des résultats consiste tout d'abord à déterminer les lignes de courants du glycérol dans la cuve. Le deuxième traitement consiste à placer des particules dans le glycérol et à suivre leurs positions au cours du temps. Les données sont ensuite lues à partir de post-traitement Paraview. L'objectif principal est donc la validation de la modélisation par les expériences en laboratoire.

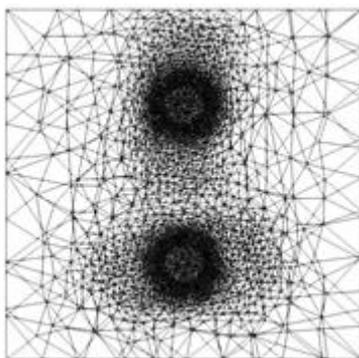


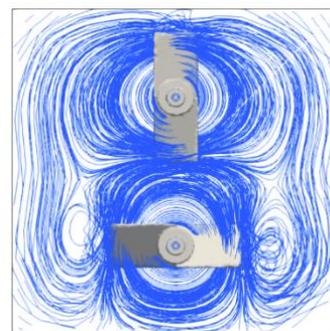
Figure 19 - Maillage de la simulation obtenu après adaptation du maillage autour des agitateurs.

2. Les lignes de courant

La figure 20 illustre le transport du colorant obtenu expérimentalement et une représentation des lignes de courant déterminées à l'aide de la solution numérique. La représentation des lignes de courant permet de voir les structures de l'écoulement mais à un instant donné car les lignes de courant sont à chaque instant parallèles au champ de vitesse. Elles ne correspondent pas aux trajectoires.



Photo expérimentale



Représentation des lignes de courants

Figure 20 - Comparaison entre les images expérimentales et de la simulation

3. Ajout des particules dans la simulation

Afin de simuler l'ajout de colorant lors de l'expérience, nous avons décidé de rajouter des particules transportées par le fluide. La figure 21 représente l'état de dispersion des particules fluides à un instant donné. Sur la vue de dessus, on remarque une zone lacunaire qui est assez similaire à ce qui est observé expérimentalement sur la figure 20.

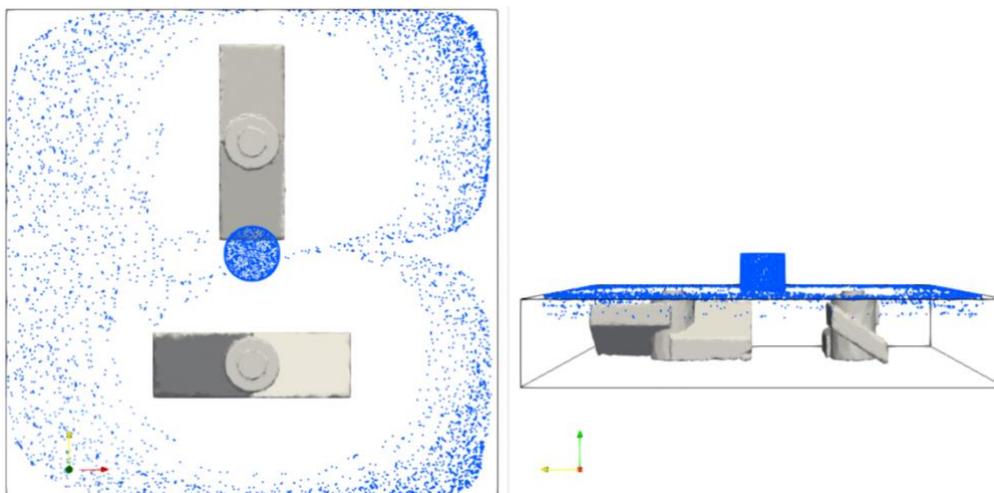


Figure 21 - Représentation de l'introduction et du transport de particules dans la cuve.

Nous constatons que les agitateurs dans la simulation ne brassent pas en volume. En effet, les particules sont introduites depuis la surface libre de la cuve. Une faible proportion descendant dans la cuve. Dans la réalité, lors de l'ajout de colorant sous forme de frites dans les feeders, on favorise un déplacement ascendant du fluide induit par les agitateurs car les frites ont une masse volumique supérieure à celle du verre. Néanmoins, comme l'atteste la simulation numérique, la composante verticale de la vitesse reste très faible. Ceci montre que ces agitateurs permettent bien une mise en mouvement du liquide dans le plan perpendiculaire aux agitateurs. Mais, le déplacement vertical reste très faible.

4. Avantages et inconvénients de la simulation numérique

La simulation numérique possède des avantages et des inconvénients. Elle permet de comprendre plus en profondeur ce qui se passe lors de l'expérience et de modifier très rapidement les paramètres expérimentaux. La mesure de la vitesse en tous points de la cuve est un exemple de valeur non calculable expérimentalement, mais rendue accessible grâce à la simulation numérique comme illustré sur la Figure 22. Ces profils pris comme exemple montrent bien que l'écoulement a lieu principalement dans le plan x-y. La composante de vitesse suivant l'axe vertical (z) est plus de 6 fois plus petite que celle suivant x.

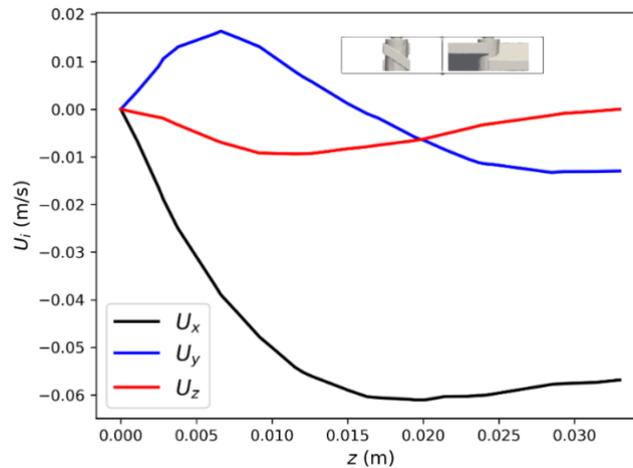


Figure 22 – Composantes de la vitesse en fonction de la position verticale selon une ligne située au milieu de la cuve comme reporté sur l’insert.

On pourrait même envisager de reproduire ce qui se passe dans les feeders et ouvrant le système. La simulation numérique comporte cependant des défauts. Elle demande de grandes ressources informatiques pour les calculs ce qui représente une importante consommation d'énergie. Le couplage entre les équations de couplage diffusion ainsi que les réactions chimiques sont également très difficiles à implanter avec les méthodes d'éléments finis.

5. Conclusion du mini projet

Dans ce mini projet, nous avons modélisé un système industriel réel complexe afin d'en recréer les phénomènes principaux, et trouvé des paramètres à mesurer pour quantifier ses performances. Ces expériences ont servi à vérifier notre simulation numérique, plus souple dans le choix des paramètres.

Le but final était de conclure sur l'efficacité de différents systèmes de mélange du verre, afin d'en homogénéiser la couleur de manière performante. Nous avons montré que les stratégies de mélange actuelles sont meilleures que les autres sur lesquelles nous avons pu expérimenter. Mais ce choix est resté restreint par manque de temps. La validation de notre simulation numérique par l'expérience ouvre maintenant le champ des possibilités quant aux potentielles innovations sur les systèmes de mélange.

3. En fin de chaîne, former sans chauffage ?

Afin de répondre aux enjeux environnementaux, de nouvelles technologies de formage du verre en fin de chaîne sont développées. L'une d'entre elles est le formage à froid, technique utilisée pour le verre plat. Le verre plat est omniprésent dans les domaines de l'automobile (pare-brise, vitres latérales, lunette arrière et toit), du numérique (écrans de téléphone, d'ordinateurs portables et de télévisions), et de l'habitat où les architectes, intéressés par les propriétés optiques du verre, l'utilisent de plus en plus dans leurs constructions. Cette technique n'est pas sans incidence sur le plan environnemental, cela sera expliqué au cours de l'étude.

Historiquement, le formage du verre plat se fait par thermoformage qui consiste à faire chauffer le verre, jusqu'à une température permettant sa déformation dans un moule (Jammet & Pinsolle, 2019). Cette méthode nécessite de réchauffer le verre à haute température ce qui peut être très coûteux en énergie. Par exemple, pour former une plaque d'épaisseur de 3 millimètres, on doit atteindre 532°. (*Le thermoformage du verre – Infovitrail.com, n.d.*)

Dans le cadre de ce mini projet, nous étudions les déformations de plaques de verre par le procédé de formage à froid en essayant de maintenir une courbure prédéfinie à l'aide de différentes

pièces de renfort. Pour cela, l'école nous a mis en lien avec un industriel, David Pereira, qui développe un produit innovant utilisant cette technique.

Cette dernière présente de nombreux intérêts environnementaux, économiques, logistiques et optiques. Ce procédé permet en effet de réduire la demande en énergie sous plusieurs angles. Premièrement, elle évite le chauffage du verre. Deuxièmement, les verres peuvent ainsi être formés sur place, ce qui facilite et réduit le transport. (Entretien avec David Pereira, le 23/11/2001). De plus, cela évite l'apparition de certains défauts optique lors du chauffage comme les bulles et l'opacité, qui peuvent être problématiques pour la fabrication d'écrans. Elle a été notamment mise en application pour la construction de la verrière de la gare de Strasbourg en 2007 (Habit De Verre Sous ATEx Pour La Gare De Strasbourg, n.d.).

Cependant, deux difficultés liées aux caractéristiques du verre compliquent la mise en pratique de cette méthode. D'une part, pour de faibles contraintes, le verre va se déformer de manière élastique réversible, revenant à sa position d'origine quand on relâche les sollicitations. Nous chercherons donc à diminuer, voire supprimer, ce retour élastique. Deuxièmement, le verre étant fragile, à partir d'une certaine contrainte il se rompt. Il ne pourra donc pas être courbé au-delà d'une certaine géométrie (Grange & Prensier, 2006).

L'objectif final de notre mini-projet était de trouver un soutien pour le formage à froid d'une plaque de verre qui limite le retour élastique, en optimisant la quantité de matière utilisée et de déterminer les limites de cette méthode en termes de rupture. Dans un premier temps, nous avons donc cherché à caractériser la probabilité de rupture de notre plaque de verre en fonction de la contrainte à laquelle elle est soumise. Dans un second temps, nous avons modélisé deux méthodes proposées par David Pereira pour maîtriser le retour élastique.

A. Mesure de la probabilité de rupture en fonction des contraintes

1. Protocole de flexion 3 points du verre

Pour vérifier que notre procédé de formage à froid reste bien dans le cadre de la théorie des poutres (petites déformations) et pour déterminer une probabilité de rupture pour la plaque étudiée, nous réalisons des tests de flexion à trois points sur des éprouvettes de verre.

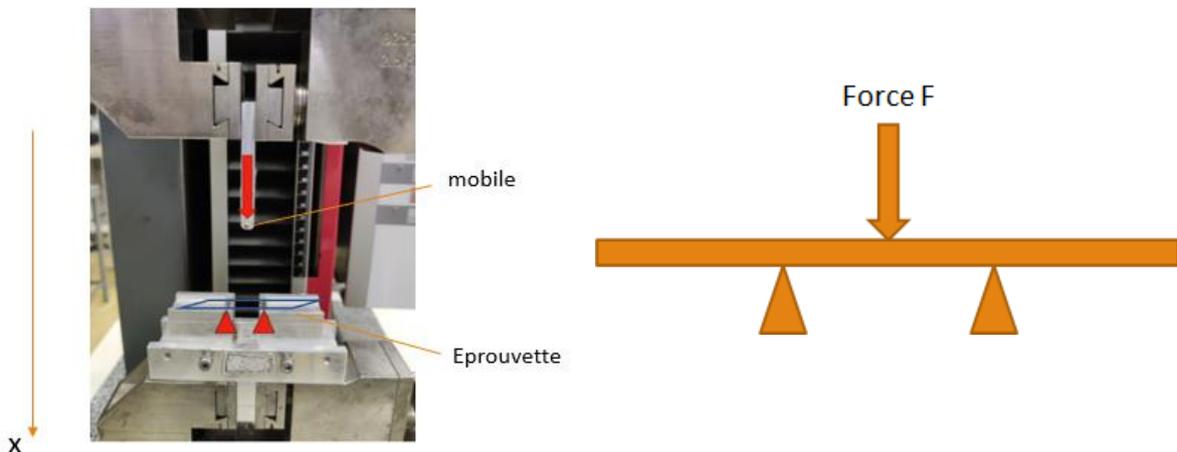


Figure 23- Dispositif de test flexion 3 points et schéma de l'expérience de flexion trois points.

Nous utilisons le montage de la figure 23. L'éprouvette de verre est disposée sur le support et on vient appliquer une force comme indiqué figure 23. L'éprouvette entre alors en flexion. On mesure le déplacement de la partie supérieure grâce à un suivi par caméra qui permet d'obtenir des résultats plus cohérents (Voir Annexe III.3.A.1) ainsi que la force que le verre en flexion exerce en retour sur le mobile.

2. Mise en évidence de la variabilité (Théorie de Weibull)

Dans notre expérience nous obtenons une force à rupture. Or cette force dépend des dimensions de l'éprouvette. Nous pouvons uniquement comparer la contrainte à rupture. Dans l'hypothèse des petits déplacements, on utilise la théorie des poutres qui donne un lien entre force, F , et contrainte, σ .

$$\sigma = \frac{3FL}{2h l^2}$$

avec F la force appliquée, L la longueur entre les deux points d'appui, h l'épaisseur de l'éprouvette et l la largeur de l'éprouvette.

Nous avons réalisé 20 tests de flexion. On remarque que la valeur de contrainte à rupture, calculée en prenant en compte la découpe (Voir Annexe III.3.A.2), est très variable d'un échantillon à l'autre (voir figure 24).

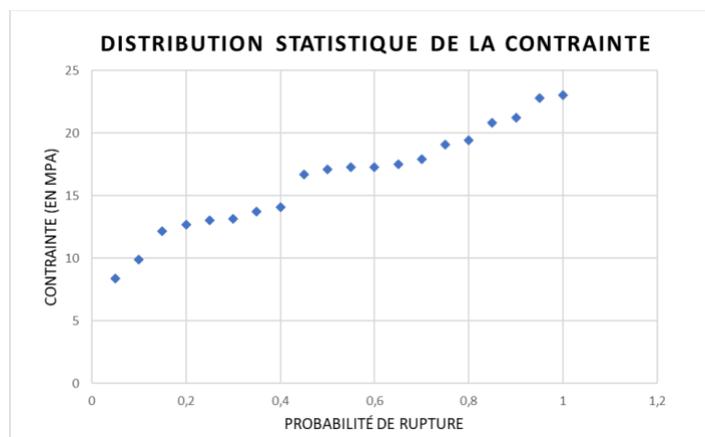


Figure 24 – Distribution statistique des contraintes de rupture des échantillons

La rupture dépend du nombre de défauts dans le verre qui sont répartis de manière aléatoire. On utilise alors la théorie de Weibull qui modélise le nombre de défauts présents dans un échantillon par une loi de Poisson (Voir Annexe III.3.A.3). Le verre étant un matériau fragile, on considère que l'apparition d'un défaut entraîne aussitôt la rupture de l'échantillon. La probabilité de rupture est alors de la forme :

$$P_f = 1 - \exp\left(-\frac{V_{eff}\sigma^m}{V_0\sigma_0^m}\right)$$

avec σ la contrainte, V_{eff} le volume efficace de l'objet étudié, V_0 , σ_0 et m qui dépendent du matériau et de la géométrie étudiés, que l'on détermine expérimentalement.

À partir des coefficients obtenus, on peut remonter à une contrainte maximale à appliquer à l'échantillon pour avoir une probabilité de rupture en dessous d'une valeur que l'on se fixe. Par exemple, pour une probabilité de rupture de 10%, on obtient qu'il faudrait appliquer au maximum une contrainte de 27 MPa sur nos échantillons.

3. Vérification des hypothèses

On fait une modélisation Abaqus de la flexion 3 points pour s'assurer que notre expérience s'inscrit dans la théorie des poutres (Voir Annexe III.3.A.4). On s'intéresse à l'une de nos expériences où la rupture a lieu pour un déplacement maximal de 0,166 mm et une force de 56 N. Les contraintes correspondantes sont dans tableau 3.

	Modélisation Abaqus	Théorie des poutres
Contraintes à rupture (en MPa)	130,1	134,2

Tableau 3- Tableau de comparaison des valeurs de contraintes à rupture avec Abaqus et la théorie des poutres.

L'erreur étant de 3%, on en déduit ainsi que la théorie des poutres est applicable à notre étude : on est bien dans le cas de petite déformation.

B. Modélisations et simulations sur Abaqus de méthodes pour limiter le retour élastique

1. Présentation de l'étude

Nous avons été amenés à travailler sur un cas simple de formage à froid d'une plaque de verre ayant les dimensions présentées sur la figure 25 dont le retour élastique est maintenu par un film plastique de thermoplastique polyuréthane (TPU), collée au verre, puis recouvert d'un film plastique de polycarbonate (PC), le tout encadré par un renfort en matériau acrylonitrile butadiène styrène polycarbonate (ABS-PC) (voir figure 25). Dans la réalité, le formage à froid est réalisé en déformant une plaque de verre à l'aide d'un poinçon (voir annexe III.3.B.1). Les différentes couches sont ensuite collées sur la plaque de verre, avec des colles anti-UV servant à la durabilité des couches.

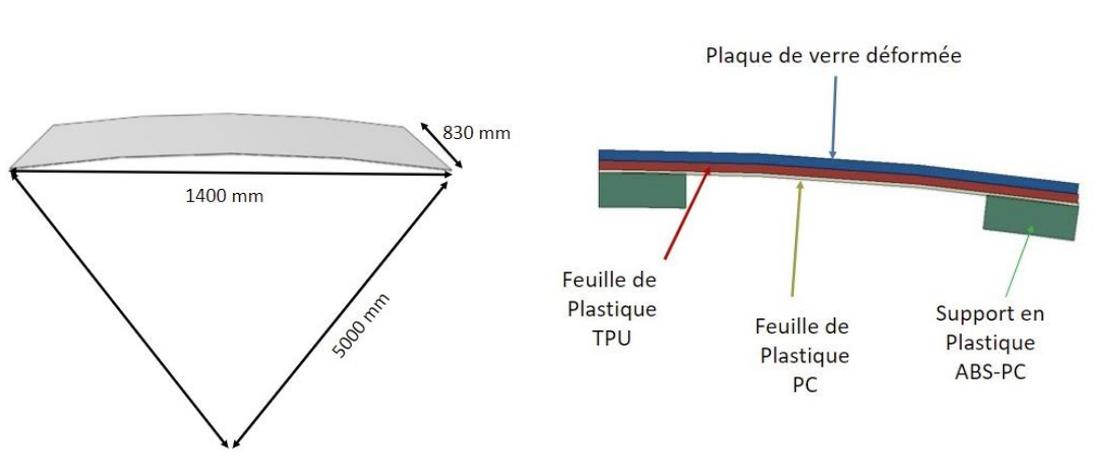


Figure 25 – Dimensions de la plaque de verre à déformer et schéma des couches pour limiter le retour élastique.

Simulation :

Pour étudier ce formage à froid, nous avons généré deux simulations numériques différentes : le retour élastique d'une feuille de verre mince maintenue par deux couches plastiques de TPU et de PC (modélisation 1), ainsi que le retour élastique d'une plaque de verre épaisse maintenue seulement par un cadre de renfort (modélisation 2). Ce choix de séparation nous permet de voir l'impact spécifique de chaque couche sur la plaque de verre indépendamment. Les valeurs des caractéristiques physiques et élastiques des matériaux utilisés sont renseignées dans l'annexe III.3.B.2. Par ailleurs, ce choix est aussi motivé par le fait que, pour certains produits industriels avec du verre « fin » (d'épaisseur inférieure à 0.7 mm), formé à froid, l'utilisation de films plastiques seuls pourrait suffire.

La simulation numérique a été réalisée à l'aide du logiciel de calcul d'éléments finis Abaqus. L'avantage majeur d'une simulation numérique est de pouvoir faire varier facilement les paramètres du problème (épaisseur de la plaque de verre, matériau plastique, rayon de courbure imposé...), puis de constater rapidement les conséquences des variations de ces paramètres. Afin de vérifier les contraintes données par un cahier des charges, un travail d'optimisation de la plaque de verre et du

dispositif de maintien est ainsi possible sans avoir recours à des tests en milieu industriel. Par exemple si l'épaisseur de verre et les propriétés du verre sont imposées, alors une optimisation peut être faite sur l'épaisseur des films plastiques. Dans notre cas, le cahier des charges a de nombreux paramètres qui peuvent être optimisés :

- L'épaisseur du verre « fin » (entre 0,3 mm et 0,7 mm) et « épais » (entre 1,1 mm et 2,5 mm)
- L'épaisseur des films plastiques TPU (entre 0,5 mm et 1,3 mm) et PC (entre 0,1 mm et 0,5 mm) et ABS-PC (entre 5 mm et 15 mm) ;
- Le module d'Young de ces plastiques, en fonction de leur qualité et de ce qui les compose ;
- Le rayon de courbure.

De plus, une simulation numérique permet d'obtenir des champs scalaires impossibles à obtenir en laboratoire : le champ de déformation et le champ des contraintes appliquées au verre.

Hypothèses et simplifications lors des simulations :

- Les forces gravitationnelles sont négligées devant les forces appliquées pour imposer la courbure (justification dans l'annexe III.3.B.3) ;
- L'exploitation des symétries du problème permet de ne considérer que la moitié voire le quart de la plaque de verre lors de la simulation, en ajoutant une ou plusieurs hypothèses d'encastrement à un ou plusieurs des côtés de la plaque (voir figure 26) ;
- Les simulations sont simplifiées avec maillage de 3 éléments par épaisseur (hexaèdres linéaires) pour chaque couche de verre et plastique et une taille approximative de maille de 10 mm (voir explication en annexe III.3.B.4).

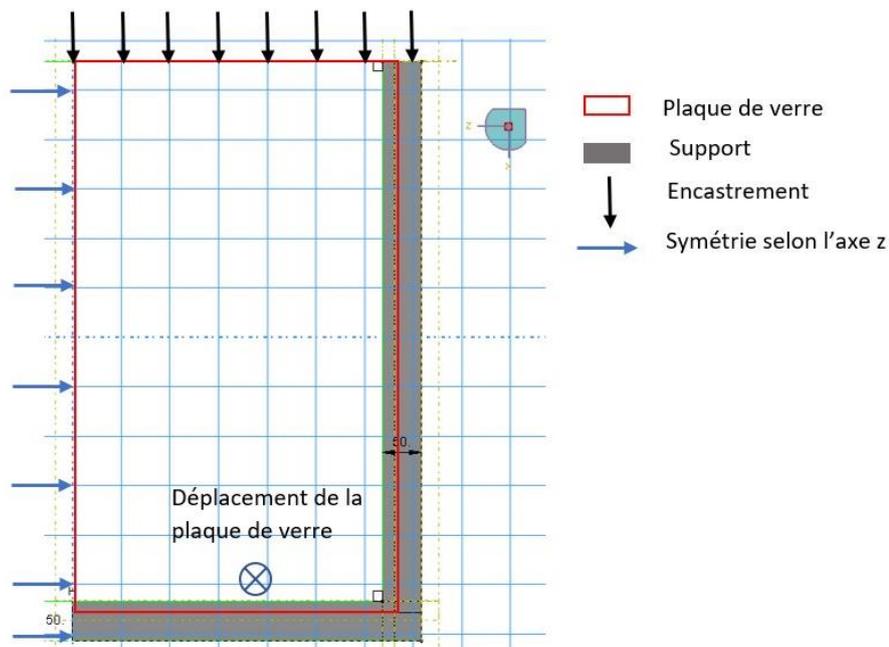


Figure 26 - Conditions d'encastrement pour le modèle avec plaque et support

Etapes de la simulation numérique :

- Déplacement de la plaque de verre seule jusqu'à son rayon de courbure souhaité (grâce à un champ de déplacement). La flèche imposée pour un rayon de courbure $R = 5m$ est de 49,28 mm ;
- Mise en contact entre la plaque déformée et les couches plastiques (simulation 1) ou le cadre de renfort (simulation 2) ;
- Retour élastique de la plaque de verre.

2. Influence des films plastiques sur le retour élastique

La couche plastique, composée d'une feuille de TPU et de PC, est modélisée en 2D comme un matériau composite (figure 27). Nous nous sommes ramenés ici à un problème à deux dimensions avec hypothèse de déformations planes, ceci étant possible grâce à la géométrie de la situation. Le contact entre ces deux feuilles est donc parfait et ne permet pas de déplacement relatif de l'une par rapport à l'autre.

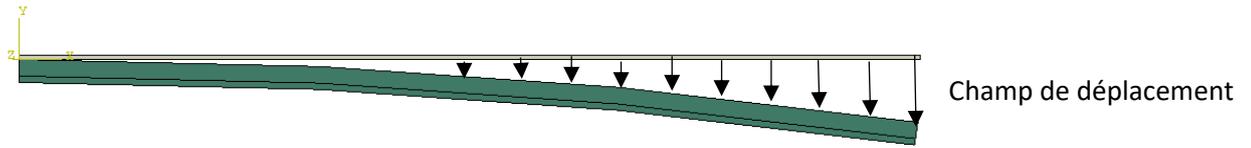


Figure 27 - modèle 2D du verre avec les couches plastique et champ de déplacement.

Mesurer le retour élastique, et sur-former pour obtenir le rayon de courbure souhaité :

En prenant cette fois-ci en compte les coordonnées de la plaque à deux dimensions, la figure 28 montre le décalage entre la position de la plaque en début de retour élastique (arc rouge et orange) et en fin de retour élastique (arc gris et bleu).

Le cahier des charges de notre industriel demande une forme calibrée de la plaque de verre. Dans notre objet d'étude de formage à froid, la forme souhaitée est un bout de cylindre de verre de rayon de courbure $R = 5\text{ m}$, ce qui correspond à la forme donnée à la plaque de verre après l'étape de formage (arc rouge). Pour que cette forme soit obtenue après le retour élastique, une solution consiste à sur-former la plaque lors de l'étape de formage, en imposant un rayon de courbure inférieure à $R = 5\text{ m}$. En choisissant $R_{\text{sur-formage}} = 4,4\text{ m}$ (calculs détaillés en annexe III.3.B.5), la forme souhaitée de la plaque de verre est alors quasiment atteinte (voir figure 28).

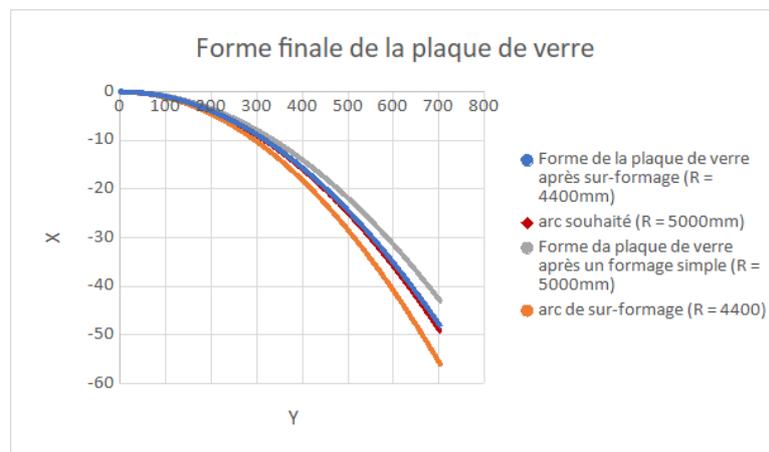


Figure 28 - Arc de la plaque de verre aux différentes étapes de simulations pour différents rayons de courbure (dimensions en mm)

Remarque : un contrôle de l'erreur de la forme finale du verre par rapport à la forme souhaitée est nécessaire dans le cadre de la fabrication d'un produit industriel. L'erreur autorisée dépend toujours de la tolérance de forme donnée par le cahier des charges.

S'assurer de la non-rupture du verre lors du formage à froid :

Pour vérifier que lors du formage à froid le verre ne rompt pas, nous avons comparé le champ des contraintes, enregistrées au cours de la simulation numérique, avec les contraintes à rupture statistique déterminées dans la partie III.3.B.

Le tableau 4 donne les valeurs de probabilité de rupture pour les contraintes maximums obtenues lors de la simulation avec et sans sur-formage. Si le sur-formage permet d'obtenir la forme souhaitée, le pourcentage de casse plus élevé dans le cas d'un sur-formage est un autre paramètre à prendre en compte dans l'optimisation sous contrainte.

	Valeurs maximales de contraintes atteintes (en MPa)	Probabilité de rupture
Sans sur-formage	1,30E+01	3,54 %
Avec sur-formage	1,40E+01	4,75 %

Tableau 4 – Pourcentage de rupture possible avec et sans sur-formage.

La technique utilisant seulement les films plastiques pour limiter le retour élastique est efficace, nous obtenons -notamment grâce au sur-formage- le rayon de courbure souhaité avec un pourcentage de rupture en dessous de 10%. Cependant, elle fonctionne sur une plaque de verre de très faible épaisseur. Lorsque l'on passe à une épaisseur au-dessus de 0,7 mm, le retour élastique est trop important et le sur-formage que cela demande implique un pourcentage de casse bien plus élevé pour le verre et même le TPU risquerait de rompre. C'est pourquoi un support est nécessaire.

3. Influence du support sur le retour élastique

Nous avons ensuite modélisé la plaque de verre avec le support en forme de cadre en plastique ABS-PC. Comme nous avons pu le constater plus haut, ce cadre est nécessaire pour les plaques de verre avec une épaisseur au-dessus de 0,7 mm si l'on veut limiter efficacement le retour élastique. Le modèle créé et étudié est représenté sur la figure 29. L'épaisseur de la plaque de verre est constante et prise à $e = 1,5$ mm.

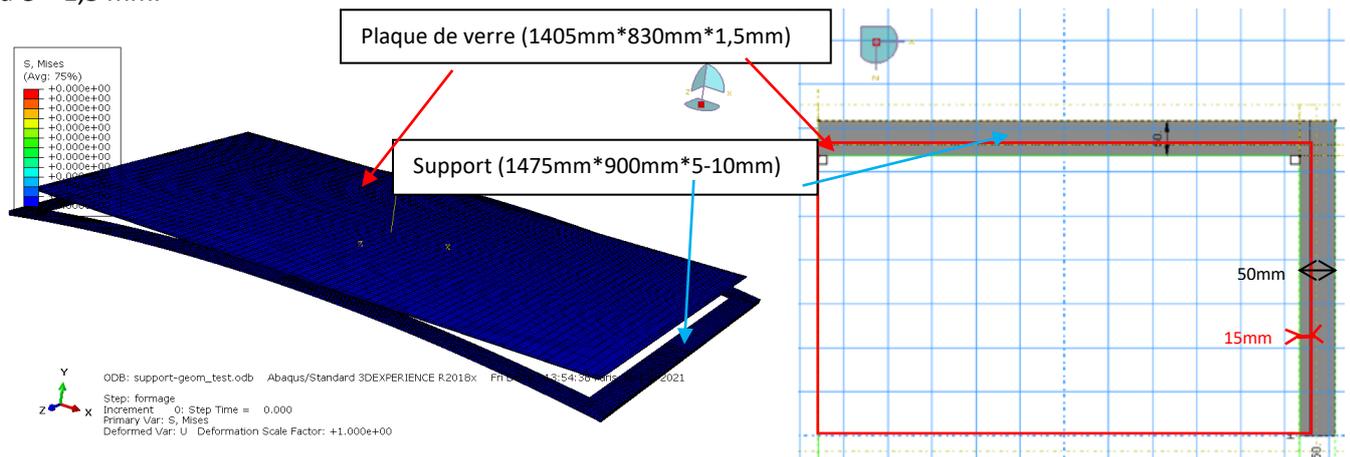


Figure 29 - Modèle 3D de la plaque de verre avec support et visualisation plane sur 1/4 du modèle.

Lors des simulations, on souhaite donnée un rayon de courbure $R = 5$ m, on peut en déduire champ de déplacement à appliquer à la plaque de verre, on a alors une flèche (déplacement maximal) de 49,28 mm (voir détails de la simulation en Annexe III.3.B.6).

Nous pouvons voir assez clairement l'influence de la géométrie du support sur le retour élastique de la plaque de verre. Lorsque l'on double l'épaisseur du support on divise par 3 le retour élastique : 30 mm à 10 mm. La figure 30 présente la déformée de la plaque de verre après étape de formage et la forme finale, ce qui met en avant le retour élastique (RE).

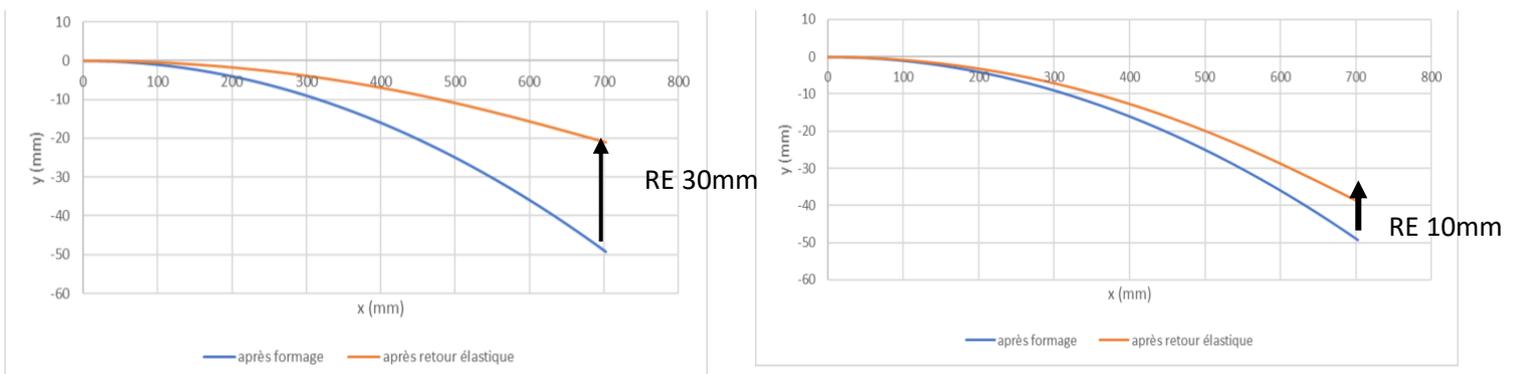


Figure 30 – Déformation de la plaque avec une épaisseur de support de 5mm (à gauche) et avec une épaisseur de support de 10mm (à droite).

La problématique est de minimiser ce retour élastique tout en ayant le moins de masse de plastique dans le support, tout cela en restant en dessous des contraintes limites de rupture. C'est donc une affaire de compromis.

Par analogie avec ce qui a été fait pour les films plastiques, nous aurions pu contrer le retour élastique en sur-formant la plaque. Cependant, la valeur maximale des contraintes appliqués à la plaque de verre sans sur-formage atteint déjà 18,08 MPa, ce qui représente une probabilité de rupture de 53% (contraintes à rupture statistique déterminées dans la partie III.3.B). Les calculs de ce pourcentage sont calés sur des expériences faites sur des lamelles de microscope découpées, elles sont donc de moins bonne qualité qu'un verre qui serait utilisé dans l'industrie de l'automobile ou de la construction. Ainsi cette valeur (53%) est en réalité moins importante. Néanmoins nous ne pouvons pas nous permettre de sur-former au risque de dépasser 50% dans la réalité. Il faut donc modifier d'autres paramètres.

Une autre alternative pour limiter ce retour élastique consiste à augmenter le moment quadratique du support (explications en annexe III.3.B.7.a), tout en ayant le moins de masse de plastique possible. Cela incite à penser à des formes de supports creusées avec moins de masse qui limitent le retour élastique tout aussi efficacement. Nous avons effectué des simulations avec les différents modèles créés M1 (modèle de référence avec support simple non 'creusé'), M2, M3 et M4. Elles sont présentées en annexe III.3.B.7.b.

Pour chaque modèle, nous avons calculé la masse du support (grâce aux masses volumiques données en annexe III.3.B.2 et des mesures de volume sur Abaqus), nous avons relevé le pourcentage de masse retirée par rapport au modèle M1, le retour élastique (en mm) et son pourcentage par rapport à la flexion imposée par la première étape de formage (qui est de 49,28 mm pour le rayon de courbure $R = 5$ m). Ces données, accompagnées des vues en coupe des branches du support, sont renseignées dans le tableau 5.

Modèle	Géométrie vue en coupe	masse (g)	pourcentage de masse enlevée par rapport au M1	Retour élastique (mm)	Pourcentage de retour élastique par rapport à la flexion après formage	Moment quadratique de la section (mm ⁴)
M1		2496,83	0	10,34	20,97	10,84
M2		2113,32	15,36	15,28	30,1	9,78
M3		1825,49	26,89	16,68	33,85	9,09
M4		2200,52	11,87	12,09	24,53	9,76

Tableau 5 -Tableau des relevées des simulations avec les 4 modèles de support.

Ces données montrent l'influence de la géométrie et de la masse du support sur le retour élastique. En fonction des attentes du cahier des charges et de la demande, il sera possible de tolérer plus ou moins de RE, de minimiser plus ou moins la masse du support. Par exemple, le modèle M2, avec environ 15,3% de masse en moins induit un RE d'environ 31%, tandis que le modèle M3 avec 27% de masse en moins (presque 2 fois moins que pour le modèle M2) induit un RE de 34% (presque autant que pour le modèle M2).

Cette technique de formage à froid avec support demande une étude plus approfondie des géométries si elle devait être industrialisée. Rappelons que, de plus, dans la réalité le support vient en renfort des films plastiques. Le support n'étant jamais seul dans le dispositif de maintien du verre, les valeurs des RE sont donc moins importantes avec ajout des films plastiques.

Néanmoins, ce mini projet a eu pour but de mettre en avant les différents paramètres qui entrent en jeu lors du processus, puis d'en appréhender leurs influences respectives. Utiliser la simulation numérique nous a permis d'effectuer de nombreux tests différents et d'atteindre cet objectif.

C. Brève analyse des émissions CO₂ des deux fromages

1. Contexte

Si le processus de formage à froid est développé, quels seraient les avantages environnementaux de ce procédé ? Au premier abord, on peut penser que ces économies et la baisse des émissions durant le formage à froid résultent majoritairement de la différence de chaleur à apporter entre ces 2 procédés, puisqu'il faut porter le verre à 100°C contre 600°C en thermoformage. Mais la présence de plastiques dans le cas du formage à froid pourrait constituer un transfert de pollution. Suite à un échange avec le groupe formage à froid sur les réels bénéfices environnementaux de ce procédé, nous avons constaté que former à froid permettrait bien de limiter les émissions, en minimisant la quantité de chaleur à apporter, mais aussi en maximisant la quantité de plaques dans les transports (car formée sur place), et tout en limitant de même la casse lors de ce transport. Essayons de déterminer les poids respectifs de ces activités.

Le procédé de formage à froid du verre plat étant une technique relativement jeune, nous n'avons pas eu assez de données pour pouvoir réaliser une ACV complète et pertinente. Nous avons donc choisi de limiter l'étude au calcul de l'empreinte carbone des deux fromages. Pour ce faire, les activités prises en compte sont : les coûts de la mobilisation du gaz naturel utilisé pour chauffer la plaque de verre (coûts environnementaux dus à l'extraction, le transport...), les émissions directes dues à la combustion de ce gaz et la mobilisation du plastique pour faire les films (présents que ce soit pour le formage à chaud ou le formage à froid, celui en TPU permet au verre de ne pas éclater en morceaux lors d'un impact) et du cadre en plastique (uniquement pour le formage à froid). Le formage à chaud se fait, pour l'exemple des pare-brise, grâce à la gravité : un cadre en céramique retient les bords du verre et la gravité le courbe. Nous avons supposé que le matériau contre lequel le verre est retenu dans le cas du formage à froid est aussi en céramique (car la céramique possède la propriété, dans les deux cas, d'avoir une grande planéité, ce qui permet de ne pas rayer le verre), et globalement des mêmes dimensions qu'à chaud. Dans un souci de comparaison, nous n'avons donc pas eu besoin de le prendre en compte dans les calculs. Par ailleurs, le taux de casse et le transport dus au processus de formage en lui-même ne sont pas pris en compte faute de données (cf. Annexe III.3.C).

2. Résultats

En considérant un rendement de 100% lors de la combustion du gaz naturel (i.e. tout le gaz introduit est utilisé pour chauffer le verre), on détermine que le formage à chaud d'une plaque de

verre (dimensions insert) a une empreinte carbone de près de 1,1 kgCO₂e tandis que le formage à froid produit, lui, 14 kgCO₂e, soit treize fois plus élevée pour le formage à froid.

Si l'on considère maintenant un rendement de 10% (bien plus réaliste en considérant les pertes dues au chauffage de l'air alentour), on peut affiner les résultats. Il s'avère que le formage à froid a alors des émissions sept fois plus élevées que le formage à chaud.

3. Conclusion

On ne peut donc seulement conclure de cette étude que si les économies d'émission d'empreinte carbone de serre sont réelles en passant au formage à froid, celles-ci n'ont pas lieu au niveau du procédé industriel de formage en lui-même mais au niveau du transport ou de la logistique.

D'un point de vue économique, les coûts engendrés par le formage à froid semblent plus importants : les 1,43 kg d'ABS servant au cadre de la plaque coûteraient 3,1€ par plaque, mais les coûts liés au gaz naturel serait réduit de 2 centimes par plaques à chaud, contre 0.2 centimes à froid. Si diminution des coûts il y a, elle viendrait à la limitation de casse et la maximisation du nombre de plaques du transport.

D. Conclusion et poursuite du projet

Lors de ce projet, nous avons ainsi mis en place une approche permettant d'analyser et d'optimiser le procédé de mise en forme à froid du verre et son retour élastique, tout en proposant une approche statistique permettant d'évaluer la probabilité de rupture du verre lors du procédé.

Compte tenu du temps limité dédié au projet, nous avons proposé différentes hypothèses simplificatrices nous permettant d'atteindre les objectifs visés. Notre modèle est ainsi capable d'évaluer la probabilité de rupture en fonction du niveau de courbure visé et il donne une estimation du retour élastique avec les deux approches de renfort qui nous ont été proposées.

Ce modèle numérique sera étendu dans le cadre d'un stage de fin d'étude pour proposer une optimisation de forme des renforts.

Les bénéfices du formage à froid se trouveraient dans l'obtention de meilleures qualités optiques, et dans une logistique plus efficace, ce qui serait bénéfique sur le plan environnemental.

Conclusion

L'industrie verrière se trouve face à la nécessité d'affronter le défi environnemental tout en restant rentable. Tâche d'autant plus dure à réaliser quand on est l'une des plus vieilles industries au monde et quand la durée de vie des équipements utilisés se compte en dizaines d'années. Des voies d'innovation existent néanmoins et ce projet a pu les explorer partiellement, étudiant leur réalisabilité et leur application concrète à la décarbonation de la production verrière.

Notre démarche a été de proposer des améliorations à différents stades de la production, en tentant d'évaluer leur impact environnemental, et ce avec l'outil de l'ACV si possible. Nous avons ensuite cherché à construire des modèles et des outils pour faciliter leur mise en place.

Il apparaît d'abord, en début de chaîne de production du verre, qu'augmenter le taux de calcin serait bénéfique sur le plan environnemental. De plus, nous avons montré qu'il est possible de trouver un mélange de calcins de granulométries différentes permettant un compromis entre l'utilisation de calcin et la facilité de fabrication du verre.

En milieu de chaîne de production, colorer dans les feeders permettrait de réduire le nombre de jours de transition entre deux couleurs et donc serait bénéfique en termes de quantité d'énergie

consommée. Le modèle numérique établi permet d'explorer de nouvelles possibilités pour le processus de coloration.

En fin de chaîne de production, le formage à froid permettrait des bénéfices sur le plan de l'impact carbone, grâce à une baisse de la casse et un transport en plus grande quantité de pièces de verre à former sur place. Le modèle établi permet d'évaluer la probabilité de rupture en fonction du niveau de courbure atteint, et propose une méthode pour limiter le rappel élastique de la plaque afin d'obtenir in fine la courbure souhaitée du verre.

Bibliographie

- Barton, J., & Guillemet, C. (2005). *Le verre: science et technologie*. EDP sciences.
- Bauer, R., & Schlünder, E.U. (1974). Transport properties of two-phase materials with random structure. *Fluid Mech*, 6, 227-255.
- Capilla, X. (2021, Novembre). *Les enjeux environnementaux de la production du verre* [Exposé aux Mines de Paris].
- Conradt, R. (2019). Prospects and physical limits of processes and technologies in glass melting. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 7(4), 377-396.
- Fromentin, J., & Fourment, J. (2000). Four de verrerie. *Techniques de l'ingénieur*. <https://doi.org/10.51257/a-v1-be8848>
- Grange, S., & Prensier, J.-L. (2006, Juillet 1). *Le modèle de Weibull : un critère de rupture probabiliste*. ENS Cachan - université Paris-Saclay.
<https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/7594/7594-le-modele-de-weibull-un-critere-de-rupture-probabiliste-ensps.pdf>
- Habit de verre sous ATEX pour la Gare de Strasbourg*. (n.d.). CSTB. Retrieved November 25, 2021, from <http://www.cstb.fr/archives/webzines/editions/decembre-2007/habit-de-verre-sous-atex-pour-la-gare-de-strasbourg.html>
- Hadamard, J. S. (1911). Mouvement permanent lent d'une sphère liquide et visqueuse dans un liquide visqueux. *Compte Rendu de l'Académie des Sciences de Paris*. Retrieved November 26, 2021, from <https://fr.scribd.com/doc/61369692/1911-Hadamard-J-Mouvement-permanent-lent-d-une-sphere-liquide-visqueuse-dans-un-liquide-visqueux>
- Haeusler, L., & Guyot, M. (2020). *Déchets chiffres-clés, ADEME*.
https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/dechets_chiffres_cles_edition_2020_010692.pdf
- Houdaer, J.-P. (2005). *La coloration des verres*. Verre online. Retrieved November 24, 2021, from <http://www.verreonline.fr>
- Industrie du verre creux*. (2009, January 5). Ministère du Travail. Retrieved November 28, 2021, from <https://travail-emploi.gouv.fr/archives/archives-courantes/metiers-et-activites/article/industrie-du-verre-creux>
- Introduction à la cristallographie/Taille des sites intersticiels* — Wikiversité. (2018, March 12). Wikiversité. Retrieved December 2, 2021, from https://fr.wikiversity.org/wiki/Introduction_%C3%A0_la_cristallographie/Taille_des_sites_intersticiels
- Jammet, J.-C., & Pinsolle, F. (2019, Novembre). Thermoformage. *Techniques de l'ingénieur (Matériaux Plastiques et Composites)*. <https://doi.org/10.51257/a-v2-am3660>

- Jolliet, O., Saadé, M., & Crettaz, P. (2010). *Analyse du cycle de vie : comprendre et réaliser un écobilan* (2ème ed.). Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Kovacec, M., Pilipovic, A., & Stefanic, N. (2011). Impact of glass cullet on the consumption of energy and environment in the production of glass packaging material. *Recent researches in chemistry, biology, environment and culture*.
- Laimböck, P. R. (1998). *Foaming of glass melts* (Thèse de doctorat, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven).
<https://doi.org/10.6100/IR511210>
- Le thermoformage du verre - infovitrail.com*. (n.d.). Infovitrail. Retrieved November 25, 2021, from
<https://infovitrail.com/index.php/fr/le-thermoformage-du-verre>
- Payen, C. (2021). *Verallia hollow glass container process* [Exposé]. Paris.
- Pejean, G. (2007, Octobre). L'élaboration du verre (Verre Online, Ed.). *Une petite encyclopédie du verre*.
<http://www.verreonline.fr/encyclopedie/doc/fabri1-Pajean.pdf>
- Pigeonneau, F. (2021, Janvier 1er). *Conductivité thermique effective des médias de cuisson*. Rapport MINES ParisTech, PSL Research University CEMEF
- Romain, B. (2019). Analyse du cycle de vie de scénarios énergétiques intégrant la contrainte d'adéquation temporelle production-consommation (Thèse de doctorat, Paris Sciences et Lettres, Paris)
- Santé et sécurité sur l'ensemble de la chaîne de valeur*. (n.d.). Saint-Gobain. Retrieved November 28, 2021, from
<https://www.saint-gobain.com/fr/entreprise-responsable/nos-piliers/sante-et-securite-sur-lensemble-de-la-chaine-de-valeur>
- Scholze, H. (2012). *Glass: nature, structure, and properties*. Springer Science & Business Media.
- Travail et sécurité. Le mensuel de la prévention des risques professionnels — L'INDUSTRIE DU VERRE*. (n.d.). Travail et sécurité. Retrieved November 28, 2021, from <https://www.travail-et-securite.fr/ts/dossier/812/industrie-du-verre.html>
- Underwood, E. E. (1968, Novembre 2). Stereology, or the quantitative evaluation of microstructures. *Journal of microscopy*, 89, 161-180.
- Weyl, W. A. (1976). *Coloured Glasses*. Society of Glass Technology.
- Zehner, P., & Schlünder, E.U. (1972). Einfluß der wärmestrahlung und des druckes auf den wärme- transport in nicht durchströmten schüttungen. *Chemie Ingenieur Technik*, 44(23), 1303-1308.

Annexes

Annexe I. Rapport des visites

1. Saint-Gobain Recherche Paris (Aubervilliers) (15 Novembre)

La première infrastructure que nous avons visitée est le centre de recherche Saint Gobain Recherche Paris. Nous avons été accueilli par Pierre Jop pour une présentation globale du groupe Saint Gobain.

Présentation de Saint Gobain par Pierre Jop

Saint Gobain est un groupe d'industriels couvrant des milieux aussi distincts que la production de verre, de laine de verre mais aussi d'huiles et de mortiers, de colles, de joints, de canalisations et tuyaux, ainsi que de céramiques hautes performances.

Ces différentes productions sont accompagnées de tout le procédé de commercialisation, en débutant par la recherche, en passant par la fabrication à l'échelle industrielle et en terminant par la vente.

Présentation des enjeux de la filière par Kevin Lippera

Après ces considérations générales, nous avons été accueillis par Kevin Lippera pour une présentation plus particulière du centre de recherche et des enjeux scientifiques actuels autour de la production de verre.

Il nous a introduit le processus de formation du verre plat, ainsi que les enjeux scientifiques auxquels le centre s'intéresse : tout d'abord la décarbonatation de la production, enjeu central vis-à-vis de l'objectif de neutralité carbone, qui passe par l'utilisation d'une énergie plus propre mais aussi une réduction de la consommation avec l'amélioration de l'efficacité des fours (par exemple avec des récupérateurs de chaleur) ou encore une part de calcin plus grande dans la matière première utilisée. Un autre enjeu est la qualité et la sécurité des produits vendus.

Kevin Lippera nous a aussi présenté les fours prototypes qui sont développés dans le centre, en notant l'importance de tels modèles réduits, puisque les fours de verrerie sont des infrastructures extrêmement complexes avec une longue durée de vie et une grande inertie.

Activités autour des activités de Saint Gobain

Il nous a ensuite été proposées deux activités :

Une activité autour de la trempe thermique et chimique du verre. La trempe du verre consiste à la création de tensions au sein du verre pour renforcer ses propriétés mécaniques. Il y a deux méthodes de trempage : une trempe thermique, où le verre est chauffé jusqu'à dépasser la transition vitreuse puis soumis à un violent refroidissement, et une trempe chimique, où il est plongé dans des bains chimiques afin que des atomes soient remplacés par d'autres plus gros, créant des tensions dans le matériau. L'avantage de la trempe chimique est que les contraintes intérieures au matériau obtenues sont bien plus importantes, mais sur une épaisseur plus fine que pour la trempe thermique.

Les gradients de contraintes sont ensuite observés grâce à l'effet photoélastique : là où les contraintes ne sont pas bien réparties, le verre déforme les rayons de lumière qui le traversent. Ainsi, en filtrant intégralement la lumière à l'aide de deux polariseurs orientés dans des directions perpendiculaires, on peut en plaçant le matériau entre les deux polariseurs observer seulement les rayons qui auront été déformés par le matériau, c'est-à-dire les zones où les contraintes ne sont pas bien réparties.

La deuxième activité proposée était autour de l'impression 3D de bâtiments, une technique encore en développement. Elle consiste à l'impression de morceaux de bâtiments directement utilisables, qui seront ensuite assemblés sur le chantier, dans un but de réduction des pertes lors de la construction.

Enfin, nous avons visité les laboratoires du centre et plusieurs personnes nous ont présenté leurs travaux. Cette visite a servi de premier contact avec l'univers du verre et ses enjeux, qui nous étaient alors inconnus.

2. Présentation du groupe Isover (16 Novembre)

Jean-Marc Flesselles nous a présenté la compagnie Isover, appartenant au groupe Saint Gobain et les enjeux actuels autour de la laine de verre.

Isover est une société spécialisée dans l'isolation, notamment dans les secteurs du bâtiment et des transports. Elle appartient au groupe Saint-Gobain, et commercialise notamment deux produits phares : la laine de verre et la laine de roche.

L'isolation est un levier très accepté par les industriels comme par les particuliers, et très efficace pour réduire notre consommation d'énergie. Pourtant encore 75% des bâtiments français sont des passoires thermiques : c'est donc une priorité dans la lutte contre le réchauffement climatique à l'échelle nationale. Comme beaucoup de produits industriels, la fabrication de laine de verre provoque des émissions de CO₂, que la filière s'attache à réduire.

Les enjeux autour de la laine de verre

Les laines de verre possèdent de très bonnes propriétés d'isolation car elles piègent l'air, qui conduit peu la chaleur, et le maintiennent immobile, évitant ainsi les courants de convection. Il existe certes des matériaux plus isolants que la laine de verre mais celle-ci est peu couteuse et facile à mettre en place.

En pratique la laine de verre comme la laine de roche sont constituées de verre. Celui-ci est fondu, fibré, polymérisé avec un liant, cuit puis découpé et roulé afin de faciliter son transport. C'est un matériau complexe car difficile à caractériser en raison de ses deux dimensions caractéristiques distinctes de plusieurs ordres de grandeurs. En effet, les filaments de verre sont environ 1000 fois plus long que large, et la taille des interstices est de l'ordre de la largeur des fils.

Lors de sa conception, on cherche à minimiser le coefficient de conduction thermique en fonction de la densité de matière dans la laine de verre. Plusieurs phénomènes entrent en compte : tout d'abord, le coefficient de conduction λ dû au passage de la chaleur par le solide augmente avec la quantité de solide dans le matériau, donc avec la densité. Mais le coefficient de conduction thermique dû à la radiation baisse avec la densité : il y a donc un λ minimum à trouver.

Un autre enjeu est le transport : la laine de verre est un matériau très volumineux que l'on compresse lors de son emballage sous forme de rouleaux. Il faut donc que les fibres se redéployent après le transport sans perdre en qualité. Cela est contrôlé par la présence de liant qui fixe les fibres entre elles.

Enfin, la cuisson est une étape complexe : en effet, il s'agit de chauffer de manière homogène un matériau isolant. Afin de raccourcir le temps de cuisson, on souffle de l'air chaud à travers le matelas de laine de verre pour créer de la convection forcée. Mais si le souffle est trop fort, le matériau est comprimé de manière non homogène ce qui dégrade ses propriétés. De plus, la réaction du liant à la chaleur libère de l'eau, qui se condense dans le matériau, et augmente ainsi la quantité de chaleur à fournir pour cuire et sécher le matériau.

Cette présentation très dynamique nous a surpris par la complexité de la laine de verre, pourtant commune, et nous a montré qu'il restait encore des points techniques à explorer et à documenter pour optimiser son utilisation.

3. Visite de la ligne float de Saint-Gobain Glass et de Saint-Gobain Recherche Compiègne (Chantereine, 60) (17 Novembre)

Olivier Mario nous a présenté le développement à l'international de Saint-Gobain Glass (SGG): l'entreprise est présente en Europe, en Asie, et en Amérique du Sud principalement, avec une légère baisse d'activité en Europe et une très forte croissance (ouverture d'un four tous les deux ans environ) en adaptation avec la demande en Inde. Ces dernières années, l'entreprise s'est recentrée sur le verre plat.

Il y a 3 usines de production en France, en comptant celle de Compiègne. La production nationale est centrée autour de 40% sur l'automobile (elle fournit Sekurit, membre du groupe Saint-Gobain (SG) qui produit des pare-brise), et de 60% sur le bâtiment.

Au niveau de l'usine de Compiègne, 90% de la production sert l'automobile, et la majorité du verre produit est coloré (Données hors Covid).

L'usine utilise une quantité importante de calcin comme matière première (autour de 65%) pour diverses raisons :

- Le verre produit étant coloré, la ligne de production accepte le calcin de couleur.
- Pendant la transition d'une couleur de verre produite à une autre, le verre dans le four n'a pas encore la couleur voulue. Il est inutilisable et donc immédiatement recyclé.
- Les clients refusent le moindre défaut, beaucoup de plaques sont recyclées avant de sortir de l'usine.

Comme pour le reste de l'industrie, les principaux enjeux au niveau de l'innovation sont une amélioration du rendement de la production, et la réduction de la consommation énergétique. La ligne de production utilise un four "float" à brûleurs transversaux, avec 7 colliers de brûleurs par côté (Annexe II pour plus de détails).

Olivier Mario nous a fait visiter l'usine : nous avons pu voir l'extérieur du four et du bain, et à quelques endroits nous pouvions observer l'intérieur du bain. Deux fois par jour, des agents prélèvent un échantillon de verre de ce bain, pour en faire une analyse chimique ou optique de la couleur, et nous avons pu les voir en action.

La particularité du four "float" est l'utilisation d'étain fondu, un liquide très lourd, pour faire avancer le verre : ce dernier s'étale par-dessus, on obtient donc des faces parallèles et bien lisses, ce qui répond à un des critères de qualité du verre plat.

Pour dimensionner les plaques, des roues sont posées sur le verre. Elles impriment une marque sur les zones auxquelles la plaque doit être coupée. Puis, une faible secousse au bon moment permettra de faire tomber le verre en excès. Les plaques continuent d'avancer pour être inspectées par un ordinateur qui vérifie qu'il n'y a aucun défaut. Les plaques non conformes sont jetées pour refaire du calcin.

Enfin, des machines se servent de ventouses pour empiler les plaques sur des chevalets. Des camions spécialisés serviront à les transporter, les plaques étant très fragiles. Toutes ces étapes, depuis le bain d'étain aux chevalets, nous ont été présentées et montrées par M.Mario.

Cette première visite d'usine nous a permis de saisir la complexité et l'inertie de telles installations, ainsi que de mieux comprendre les étapes de formation du verre et leurs enjeux.

4. Présentation de la fabrication des bouteilles par Corinne Payen de chez Verallia (18 Novembre)

Corinne Payen est venue nous présenter Verallia, une compagnie commercialisant des bouteilles et récipients alimentaires en verre. Elle est leader ce son marché en Europe, et couvre une gamme de produit très standards à des produits plus haut de gamme et complexes.

Corinne Payen nous a introduit le concept de “scope”, pour identifier à quoi renvoient des émissions de gaz à effet de serre : le scope 1 représente les émissions directes produites par le procédé, le scope 2 correspond aux émissions générées par la production d’électricité consommée, et le scope 3 prend en compte toutes les émissions de la chaine en amont.

L’industrie du verre a identifié différents leviers pour réduire ses émissions : la réduction du poids des articles, celle des émissions propres à la fabrication du verre, ainsi que l’augmentation de la réutilisation des articles. Mais ces différentes mesures ne sont pas sans conséquences : la réduction du poids des articles a un impact esthétique et détériore la qualité de la bouteille d’après certains clients. Cela a aussi un impact sur la solidité et complexifie le processus de formation du verre.

Pour réduire les émissions une autre possibilité est de réduire les émissions du scope 1. On peut à cette fin utiliser plus de calcin, et nous avons déjà détaillé les défis de cette stratégie. On peut aussi changer de four de verrerie, pour aller vers des fours plus économes. Mais comme les fours sont des installations couteuses, qui vivent environ 15 ans, c’est un pari dangereux pour les investisseurs que d’expérimenter une nouvelle technologie.

Grâce à cette présentation Corinne Payen nous a montré que la réduction des émissions de l’industrie du verre était complexe, et se heurtait parfois à l’acceptation des clients (par exemple la réticence à réduire le poids des articles), ou des investisseurs (fours à longue durée de vie et couteux).

5. Verrerie de Biot (25 Novembre)

Créée en 1956 par Eloi Monod, La Verrerie de Biot ® a inventé le verre bullé. Elle a obtenu le label Entreprise du Patrimoine Vivant (EPV), marque de reconnaissance d'un savoir-faire rare. La Verrerie de Biot offre la particularité d'utiliser un matériau original, « le verre bullé ». Elle accueille également la Galerie Internationale du Verre, regroupant en exposition des créations de 32 artistes de renommée internationale, ainsi que la Galerie Jean-Claude NOVARO, qui présente les créations du maître-verrier. Elle propose également des stages de découverte avec un maître verrier sur réservation. (<https://www.biot-tourisme.com/fiches/la-verrerie-de-biot/>)

Jeudi 25 novembre, nous sommes allés visiter la verrerie de Biot. Nous avons pu observer les maîtres verriers à l’œuvre en train de réaliser une série de flûtes, puis découvrir des applications du verre à la fois artistiques et pratiques. Mais c’est lors de la discussion avec un des propriétaires de la verrerie M. Lechaczynski que nous avons pu réaliser encore davantage l’importance de la verrerie. En effet, depuis sa création la verrerie a fait naître des procédés uniques, comme le célèbre verre bullé, détourné en verre bullé givré, écaillé, ou encore luminescent. Ils ont aussi créé le plastique bullé. La verrerie a fait appel à des ingénieurs pour développer la plupart de ces créations. Cette entreprise a su garder une ligne directrice et exploiter les procédés qui ont fait sa renommée. La contrainte principale à laquelle elle est soumise est le changement de couleur. En effet, un seul four est dédié à la couleur et il demande une semaine de décapage pour pouvoir passer d’une couleur à une autre. La verrerie peut ainsi produire 3 à 4 couleurs différentes par an. Cela oblige donc la verrerie à avoir un

stock important pour chaque couleur pour pallier le problème. Enfin, la verrerie s'inscrit dans une démarche de transmission de savoir et forme régulièrement de nouveaux maîtres verriers.

Cette visite a contrebalancé la vision très industrielle du travail du verre que nous avons jusque-là. Les verreries d'art montrent un savoir-faire historique, mais chaque année enrichit par de nouvelles expérimentations. Bien qu'elles relèvent de l'artisanat, elles se heurtent à des problématiques similaires à celles des verreries industrielles, notamment à celle de l'inertie des fours lors des changements de couleurs.

6. Visite du site de production de verre creux Saverglass (Vendredi 19 Novembre)

Nous avons visité l'usine Saverglass de Feuquières, qui produit des bouteilles et flacons alimentaires de qualité supérieure. Cette visite a aussi été un premier contact avec la compagnie, avec laquelle nous avons échangé à plusieurs reprises par la suite.

Saverglass est une entreprise de taille intermédiaire, peu connue du grand public car elle ne vend ses produits qu'à d'autres industriels. Comme tous les industriels du verre, elle est confrontée aux enjeux de réduction des émissions de CO₂, et de performance de ses fours. Un enjeu de flexibilité se rajoute du fait de la qualité de ses produits : les bouteilles et flacons de luxe ne sont tirés qu'en petites quantités, ce qui force les industriels à changer souvent de production.

Le site de Feuquières consiste en un four à boucle qui dessert plusieurs chaînes de production de verre creux, accompagnées d'une chaîne de décor des bouteilles. Le verre en sortie de four est distribué vers les chaînes de production par les feeders, des canaux d'approvisionnement. Il est ensuite soufflé dans des moules. Les bouteilles sont refroidies, trempées thermiquement, puis contrôlées optiquement par des machines et à l'œil. Enfin, elles sont stockées et emballées pour le client.

Nous avons été introduits à la technologie de coloration du verre dans les feeders, qui n'est pas réalisée sur le site de Feuquières mais utilisée par l'entreprise sur d'autres sites. Elle est particulièrement utile pour des modèles luxueux de couleur claire tirés en petite quantité, puisqu'elle améliore grandement la flexibilité des chaînes de production.

Cette visite nous a permis d'observer une chaîne de production de verre creux, et a posé les bases de la réflexion autour du mini-projet 3. Elle a aussi été l'occasion de constater la multiplicité des usages du verre, qui crée autant d'enjeux qu'il existe de produits différents.

Annexe II. Le verre et sa production

1. Formulation et matières premières

Catégorie	Domaine de composition	Applications
Sodocalcique	SiO_2 , CaO , Na_2O	Vitrage, bouteilles, flaconnage, gobeletterie
Borosilicate	SiO_2 , B_2O_3 , Na_2O	Pharmacie, culinaire, laboratoire
Aluminosilicate	SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , B_2O_3	Fibres de renforcement
Verre au plomb	SiO_2 , PbO , K_2O	Verrerie d'art, flaconnage de luxe, écrans de protection
Silice	SiO_2	Fibres optiques
Zircone	SiO_2 , ZrO_2 , Na_2O	Renforcement du ciment
Bioverres	Na_2O , CaO , SiO_2 , P_2O_5	Médicales
Verres fluorés	ZrF_4 avec d'autres fluorures	Fibres optiques de courtes distances
Vitrocéramiques	Li_2O , Al_2O_3 , SiO_2	Culinaires, optiques
Chalcogénures	S, Se, Te avec Ge, Si, Sb, As	Optiques infrarouge
Métallique	métal de transition	Renforcement béton, industriel électrique

Tableau 5 - Tableau des compositions. Verres listés par catégories, composition et applications.

2. Fusion

A. Four type à brûleurs transversaux

Jusqu'au développement des fours à boucles de grandes dimensions, c'est le four à régénérateurs avec brûleurs transversaux qui fut le plus utilisé en verrerie. Il consiste à disposer les flammes sur les côtés du bain de verre. Actuellement, ce type de four est surtout utilisé pour le verre « float » (production de plaques de verre plat) ou les verres spéciaux (verre pour écran de téléviseur) lorsque on attache une grande importance au fait de pouvoir régler la combustion dans les différentes zones du four. Les figures 1 et 2 donnent des schémas de ce type de four.

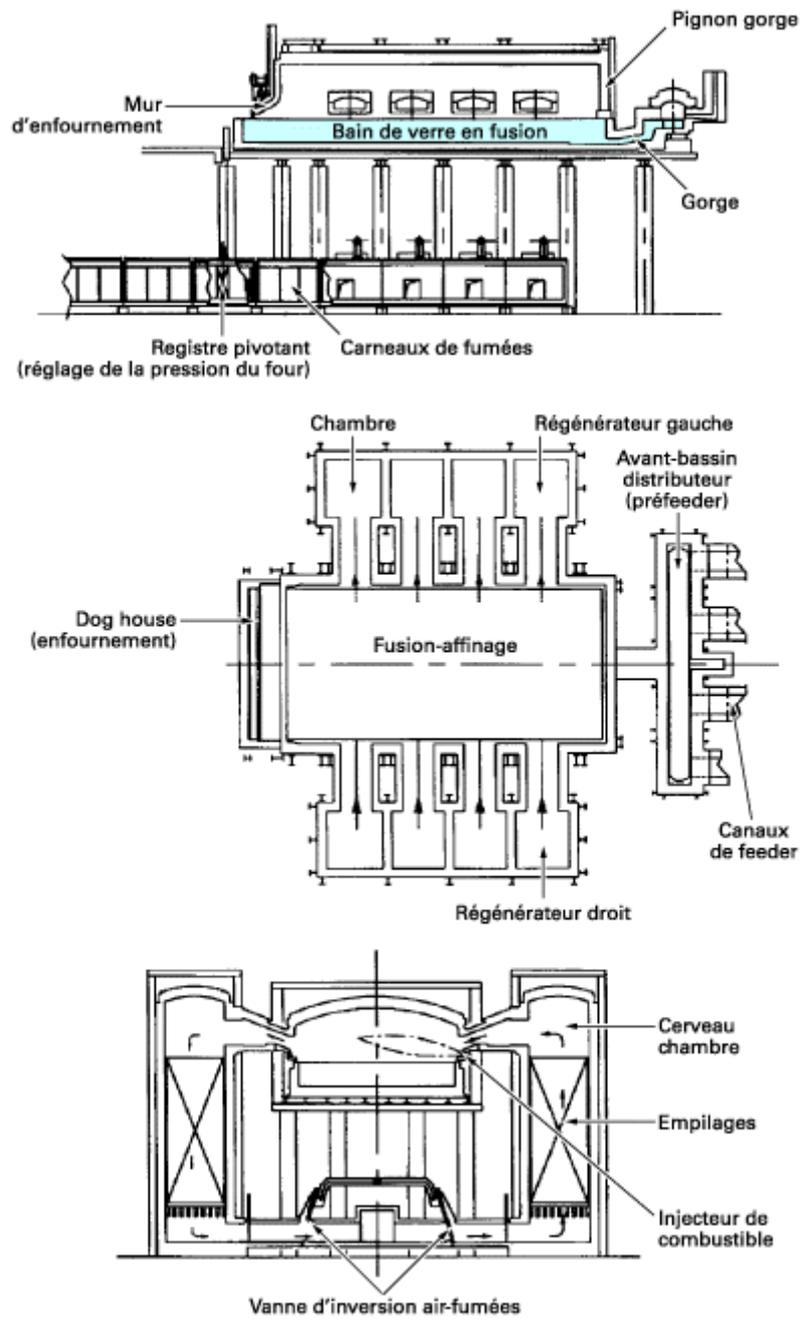


Figure 31 - Four à régénérateurs pour verre creux, chauffage par brûleurs latéraux

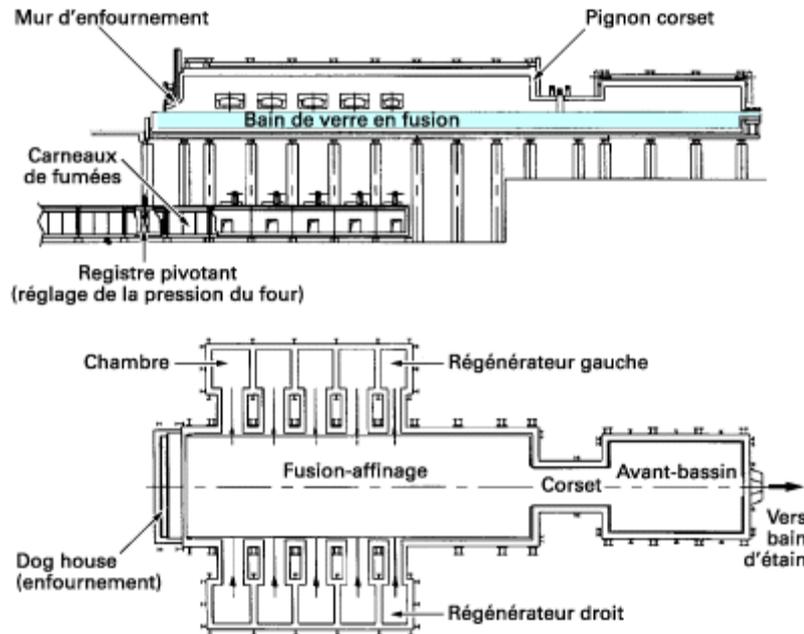


Figure 32 - Four « float » à régénérateurs, chauffage par brûleurs latéraux

a. Caractéristiques

Les colliers de brûleurs sont placés dans les pièces du four. Ces fours comportent entre trois et huit colliers de brûleurs par côté.

Les régénérateurs constitués de chambres séparées, une chambre par collier de brûleurs, sont placés de part et d'autre du four (il existe encore des fours avec des régénérateurs à une chambre unique, mais cette technique tend à disparaître). Ils emmagasinent la chaleur des gaz brûlés afin de préchauffer l'air entrant dans le four.

L'enfournement se fait par l'arrière du four au moyen d'une ou plusieurs enfourneurs.

b. Avantages

Possibilité de régler la combustion dans chaque zone de brûleur (température et atmosphère), permettant de contrôler le profil de température longitudinale. Indispensable dans le cas des fours « float » pour contrôler la température dans l'avant-bassin.

Possibilité de fours de très grandes dimensions puisque l'on peut augmenter le nombre de couples de colliers de brûleurs.

c. Inconvénients

Montant d'investissement relativement important (coût des colliers de brûleurs et des équipements d'inversion) toujours plus élevé que celui d'un four à boucle de même production.

Consommation spécifique un peu plus élevée que celle d'un four à boucle de même production car les pertes thermiques par les parois latérales sont plus importantes dans la zone des colliers de brûleurs, et l'utilisation de la flamme est moins efficace.

De plus, cette technique est difficilement applicable aux fours de petites dimensions. En effet, il est souhaitable d'avoir, entre colliers antagonistes, une distance minimale de 5,5 à 6 m pour que la flamme puisse se développer complètement. Dans le cas contraire, la combustion risque de se terminer dans le « cerveau » de la chambre antagoniste ce qui serait préjudiciable au rendement thermique et à la tenue des empilages.

D'un point de vue pratique, la surface du bassin de fusion minimale se situe autour de 60 m² et il faut un minimum de trois brûleurs par côté.

B. Four type à flamme en boucle

C'est le four qui s'est le plus développé à partir des années 1970 dans l'industrie du verre d'emballage. Il consiste à chauffer le verre avec une unique flamme disposée à l'arrière du bain. Pendant longtemps, on a pensé qu'il n'était pas souhaitable de dépasser une surface de 30-35 m² pour ce type de four. L'utilisation du fioul ou du gaz naturel et les améliorations apportées aux injecteurs de combustible font que l'on construit maintenant des fours de 150 m² qui permettent d'atteindre des productions de 300 à 400 t/j. Les figures 3 et 4 donnent des schémas de ce type de four.

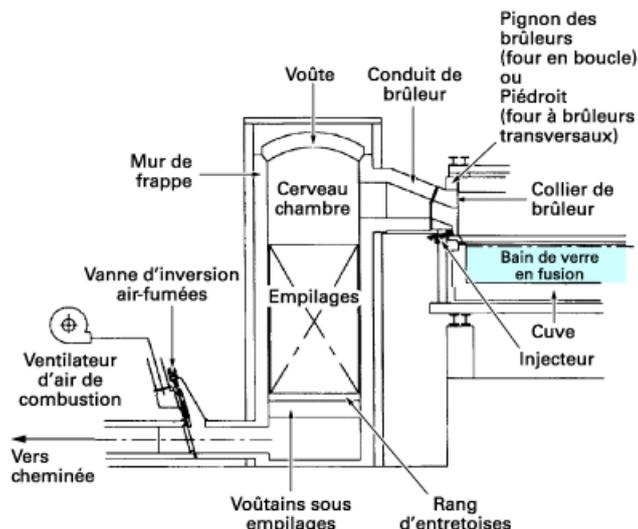


Figure 33 - Chambre de régénérateur

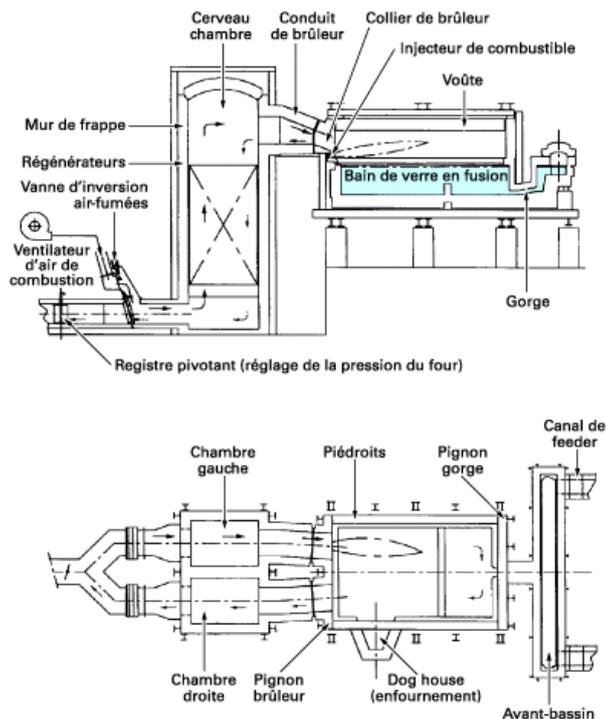


Figure 34 - Four à régénérateurs, chauffé par flammes en boucle (simple chambre)

a. Caractéristiques

Les colliers de brûleurs sont placés dans le pignon arrière du four et les régénérateurs sont placés derrière le four.

L'enfournement se fait latéralement par un ou deux « dog houses » suivant la capacité du four.

Les régénérateurs peuvent être à simple ou double passage.

b. Avantages

Très bon rendement thermique car les superstructures du four peuvent être calorifugées sur trois côtés.

Consommations spécifiques les plus basses de tous les types de fours.

Nota : le terme « consommation spécifique », généralement utilisé, est la consommation rapportée au kilogramme ou à la tonne de verre sorti du four.

Coût d'investissement plus faible que pour un four à régénérateurs et brûleurs transversaux de même capacité.

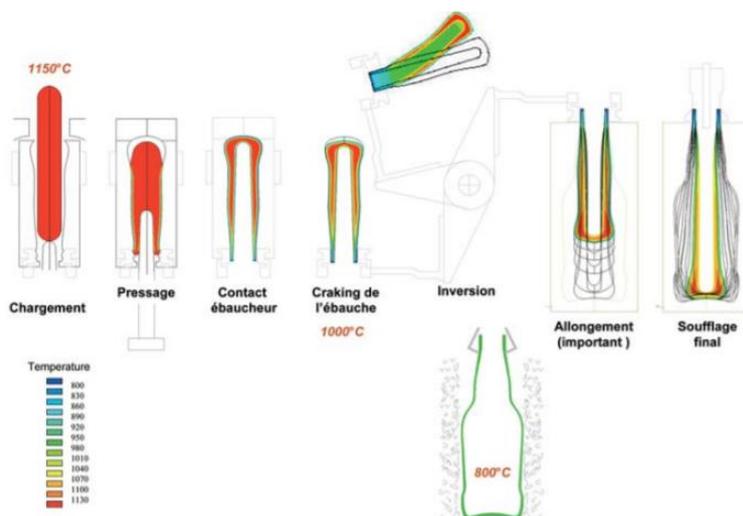
Conduite du four assez stable.

c. Inconvénient

Difficulté pour ajuster avec précision le profil de température longitudinal du four.

3. Formage du verre creux

Lors du formage du verre creux, le verre est divisé à la sortie du four dans différents canaux, les feeders. Ceux-ci ont la double action de refroidissement et de distribution du verre vers les chaînes de production. Le verre en sortie de feeder est découpé en goutte, puis façonné dans des moules métalliques par différentes méthodes. On trouve dans l'industrie deux méthodes principales (le soufflage-soufflage ou le pressage-soufflage). On commence toujours par former le haut de la bouteille puis on retourne l'ébauche pour lui donner sa forme finale en soufflant.



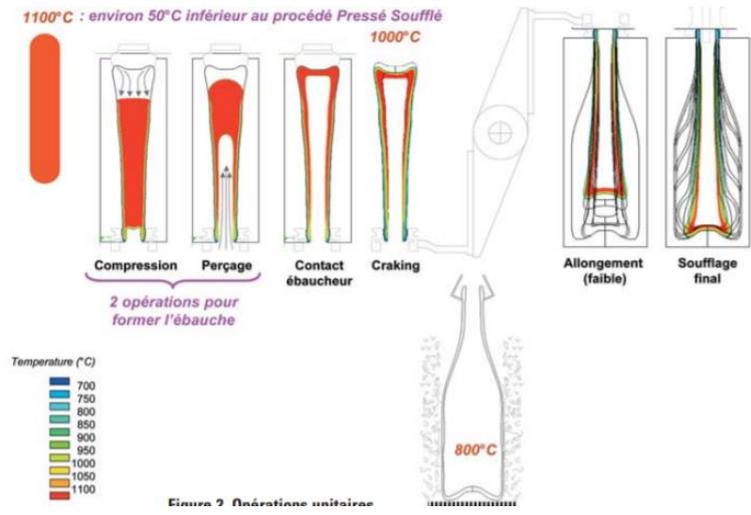


Figure 35 – Les 2 méthodes de formage du verre creux le pressage-soufflage en haut, le soufflage-soufflage en bas, (Pajean, 2007)

Annexe III. Mini projets

1. Fusion du calcin

A. Bilan Carbone de Saverglass

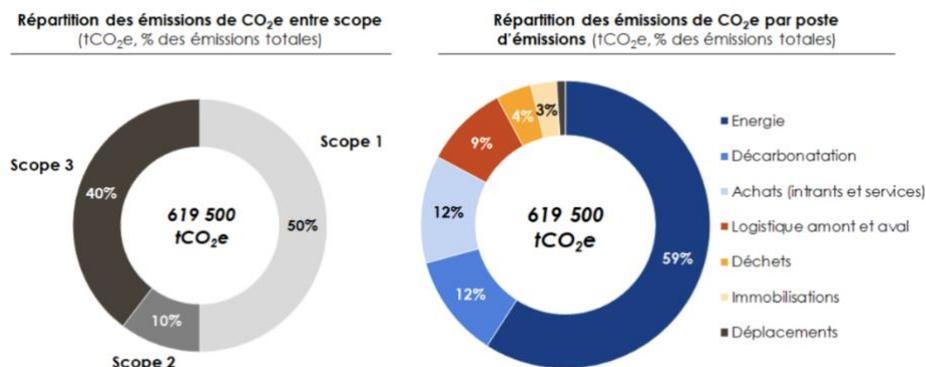


Figure 36 – Bilan carbone de Saverglass

B. Analyse de cycle de vie

a. Impacts pris en compte dans l'ACV

Les impacts calculés par notre méthode sont les suivants : freshwater ecotoxicity, non carcinogenic effects, carcinogenic effects, minerals and metals, climate change biogenic, climate change fossil, climate change land use, climate change total, freshwater and terrestrial acidification, freshwater eutrophication, marine eutrophication, terrestrial eutrophication, ionising radiation, ozone layer depletion, photochemical ozone creation, respiratory effects, dissipated water, fossils, land use.

Certains d'entre eux ne seront pas pris en compte car de valeur négligeable ici : freshwater eutrophication, marine eutrophication, terrestrial eutrophication, ionising radiation, ozone layer depletion, photochemical ozone creation.

b. Influence des colorants sur l'empreinte carbone

Nous voulons savoir si les différences d'empreinte carbone pour la production de verre creux d'emballage en fonction de la couleur sont dues aux colorants eux-mêmes ou au fait que chaque couleur est associée à un taux de calcin propre. Pour cela, on regarde l'empreinte carbone totale de la production sans calcin, par couleur. On dispose directement de ces données pour la zone géographique GLO, et on obtient l'empreinte carbone mondiale moyenne pour chaque couleur de verre produit sans calcin (figure 37) :

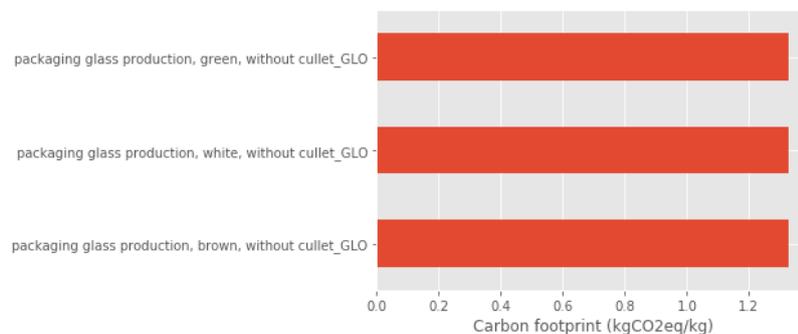


Figure 37 – Empreinte carbone de la production en fonction de la coloration du verre

En conclusion, les colorants n’ont pas d’influence sur l’empreinte carbone totale de la production de verre creux d’emballage, c’est uniquement le taux de calcin qui est à l’origine de valeurs différentes pour chaque couleur de verre.

c. Commentaires détaillés concernant la figure 7

Commentaire sur la figure de l’empreinte carbone: Les valeurs d’empreinte carbone obtenues pour la production allemande sont cohérentes avec les chiffres du bilan carbone 2020 de Saverglass (environ 600g par tonne de production de verre creux) ou encore avec les chiffres réels de la production allemande en 2010.

L’Allemagne a une production verrière toujours moins émissive que la moyenne européenne ce que l’on peut tenter d’expliquer. Frédéric Dupuis, directeur RD chez Saverglass, nous a indiqué que les fours fonctionnaient soit exclusivement au fioul, soit exclusivement au gaz naturel. Supposons que l’Allemagne utilise surtout du gaz naturel (cohérent avec les prix jusqu’à récemment) et qu’en Europe, en moyenne, il y ait plus de fioul. Alors, cela expliquerait la position relative des deux courbes. Cependant, la pente européenne serait dans cette hypothèse supérieure à la pente allemande, ce n’est donc pas une explication satisfaisante. Nous avons interrogé Xavier Capilla (Institut du verre) pour savoir s’il avait des hypothèses pour expliquer ces résultats. Il ne voit pas d’autre possibilité qu’un mélange, dans la base de données, de différents articles. En effet, en Allemagne, ce sont surtout des bouteilles qui sont produites alors qu’en Europe, il y a aussi beaucoup de flaconnage. On compare donc des articles de tailles différentes, des fours de tailles différentes. Bref, il n’y a pas de comparaison pertinente et claire entre les deux courbes.

d. Régression linéaire de la quantité de dioxyde de carbone d’origine fossile en fonction du taux de calcin (Allemagne)

On trouve sur la figure 38 un tracé, pour l’Allemagne de la quantité de dioxyde de carbone fossile en fonction du taux de calcin.

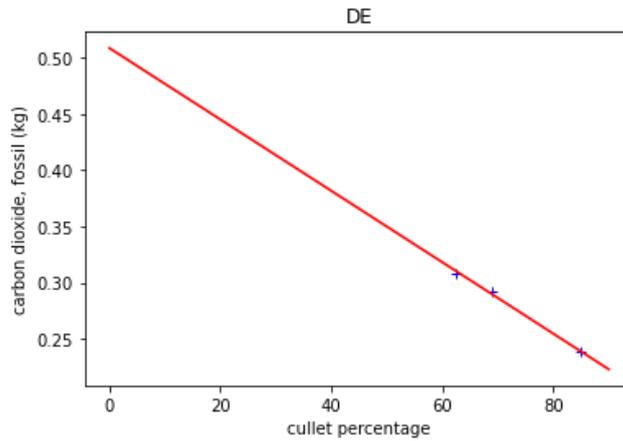


Figure 38 – Quantité de dioxyde de carbone émis, d’origine fossile en fonction du taux de calcin

Le caractère décroissant est logique : plus on a de calcin moins on a besoin de chauffer donc moins on a besoin de combustibles fossiles. Le lien linéaire ne paraît pas non plus très surprenant, dans la mesure où cette quantité est très largement due au chauffage, et que l’énergie nécessaire au chauffage dépend linéairement de la quantité de calcin.

e. Code correspondant au modèle paramétré utilisé pour étudier l’influence du taux de calcin

Création du paramètre “taux de recyclage” :

```

1 taux_recyclage = agb.newFloatParam(name = "Glass_cullet_percentage",
2                                     default = 0.625, min = 0.3, max = 1,
3                                     distrib = agb.stats.DistributionType.TRIANGLE,
4                                     group = "Glass",
5                                     unit = "ratio")

```

Mobilisation des activités prises en compte :

```

: 1 act = [act for act in eidb if 'packaging glass production, white' in act['name']
2     and 'DE' in act['location']][0]
3 act

```

'packaging glass production, white' (kilogram, DE, None)

```

: 1 act_transport = [act for act in eidb if 'transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO6' in act['name']
2     and not 'refrigeration' in act['name'] and 'RER' in act['location']][0]
3 act_transport

```

transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO6' (ton kilometer, RER, None)

```

1 act2 = agb.copyActivity(activity = act,
2                       code = act['name'] + ' adjusted#' + str(act['location']),
3                       loc = act['location'],
4                       db_name = pdb_name)
5
6
7 #remplacement de l'ancienne valeur de 'Carbon dioxide, fossil' par celle dépendant du taux de recyclage
8 #grâce à la régression linéaire trouvée
9 amount_CO2 = act2.getAmount('Carbon dioxide, fossil')
10 act2.updateExchanges({'Carbon dioxide, fossil': DE[0]*taux_recyclage+DE[1]})
11
12 #ajout du transport
13 act2.addExchanges({'act_transport': (40*(1-taux_recyclage)+taux_recyclage*400)*10**-3})
14
15 #Recyclage
16 act2.updateExchanges({'glass cullet, sorted':taux_recyclage * 1.04}) #un peu de perte
17
18 #ajout des principales matières premières
19 for flux in ['silica sand', 'lime', 'feldspar',
20            'soda ash, light, crystalline, heptahydrate', 'dolomite']:
21     amount = act2.getAmount(flux)
22     act2.updateExchanges({'flux':amount*((1 - taux_recyclage)/(1 - 0.625))})
23
24 agb.printAct(act, act2)

```

Calcul pour plusieurs taux de calcin, à distance de transport fixée :

```

1 taux = np.linspace(0,1,10)
2 climate = []
3 for i in taux :
4     df = agb.multiLCAAlgebraic([act, act2],
5                               methods=methods_LT,
6                               Glass_cullet_percentage = i)
7     climate.append(df.T.loc['climate change - climate change total[kg CO2-Eq]',
8                             'packaging glass production, white adjusted#DE[DE]'])
9
10

```

On refait cela pour trois distances différentes, et on place les résultats dans un dataframe :

```

1 df = pd.DataFrame(index = taux)
2 df['distance de 60kms'] = climate
3 df['distance de 200kms'] = climate2
4 df['distance de 400kms'] = climate3
5 df.index.name = 'taux de calcin'

```

On trace les résultats :

```

1
2 df.plot(kind = 'area', stacked = False, alpha = 0.3)
3 plt.ylabel('carbon footprint, total kgCO2e/kg')

```

C. Détermination de la fraction surfacique d'air des échantillons

a. Traitement d'images avec ImageJ

Après avoir découpé les creusets où nous avons fait fondre le calcin à l'aide d'une lame diamantée, nous avons pris des photos de ces coupes avec une loupe binoculaire ou un appareil photo. Il fallait lors de cette étape s'assurer que la lumière était répartie de façon homogène pour pouvoir exploiter les contrastes. Un exemple de telle image est donné figure 1.

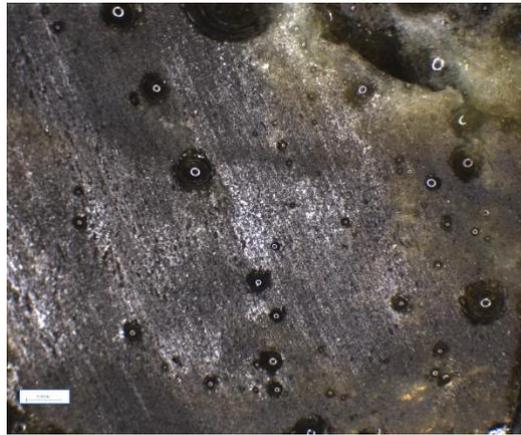


Figure 39 - Exemple d'image à analyser

Avec le logiciel ImageJ, nous avons ensuite traité la photo pour détecter les bulles. Nous avons commencé par convertir l'image en noir et blanc et en résolution 8-bits, pour ensuite régler le contraste et le seuillage de noir et de blanc afin d'obtenir une image où les bulles ressortent bien, comme par exemple sur la figure 2.

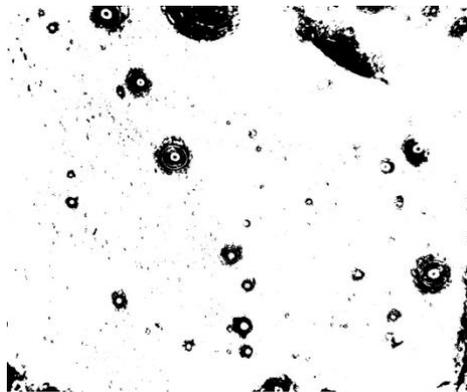


Figure 40 - Image binarisée

Nous avons choisi les caractéristiques dont la mesure nous intéresse (en particulier l'aire), puis à l'aide de la fonction "analyze particles", qui permet d'identifier les bulles et de les analyser, nous obtenons une image des contours des bulles (figure 3), ainsi qu'une base de données correspondant à ces bulles (figure 4). Nous avons vérifié visuellement l'identification correcte des bulles, et nous avons retouché et remesuré au besoin. Il est également possible de régler la surface minimale à partir de laquelle on considère qu'il s'agit de bulles, de sorte à supprimer le bruit.

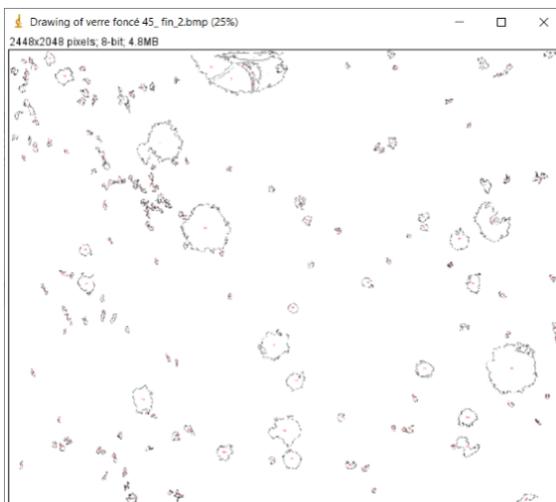


Figure 41 - Contours des bulles

Label	Area	Mean	Min	Max	%Area	
473	verre foncé 45_fin_2.bmp	1452	252.541	0	255	99.036
474	verre foncé 45_fin_2.bmp	191	249.660	0	255	97.906
475	verre foncé 45_fin_2.bmp	2544	226.433	0	255	88.797
476	verre foncé 45_fin_2.bmp	741	248.462	0	255	97.436
477	verre foncé 45_fin_2.bmp	138	240.217	0	255	94.203
478	verre foncé 45_fin_2.bmp	505	209.050	0	255	81.980
479	verre foncé 45_fin_2.bmp	420	254.393	0	255	99.762
480	verre foncé 45_fin_2.bmp	114	255.000	255	255	100.000
481	verre foncé 45_fin_2.bmp	103	227.767	0	255	89.320
482	verre foncé 45_fin_2.bmp	831	236.282	0	255	92.659
483	verre foncé 45_fin_2.bmp	2134	234.806	0	255	92.081
484	verre foncé 45_fin_2.bmp	632	253.386	0	255	99.367
485	verre foncé 45_fin_2.bmp	106	250.189	0	255	98.113
486	verre foncé 45_fin_2.bmp	252	252.976	0	255	99.206
487	verre foncé 45_fin_2.bmp	1847	249.339	0	255	97.780
488	verre foncé 45_fin_2.bmp	225	242.533	0	255	95.111
489	verre foncé 45_fin_2.bmp	446	253.285	0	255	99.327
490	verre foncé 45_fin_2.bmp	262	253.053	0	255	99.237
491	verre foncé 45_fin_2.bmp	134	243.582	0	255	95.522
492	verre foncé 45_fin_2.bmp	107	247.850	0	255	97.196

- Base de données récupérées

b. Analyse d'une base de données avec pandas

Une fois en possession de bases de données satisfaisantes, nous avons créé un notebook pour les analyser avec la librairie pandas (python). En codant des fonctions permettant de récupérer le fichier, de sommer les aires des bulles, puis de diviser par la surface totale de l'image, nous avons finalement obtenu le pourcentage surfacique d'air dans le verre (figure 43).

Out[22]:

	Numero	nomfichier	aire	moyenne	min	max	pourcentageAire
0	1	verre foncé 45_fin_2.bmp	545	252.661	0	255	99.083
1	2	verre foncé 45_fin_2.bmp	114	255.000	255	255	100.000
2	3	verre foncé 45_fin_2.bmp	1623	244.787	0	255	95.995
3	4	verre foncé 45_fin_2.bmp	236	255.000	255	255	100.000
4	5	verre foncé 45_fin_2.bmp	713	252.496	0	255	99.018

Figure 43 - conversion de la base de données en DataFrame pandas

Pour fonce_101_results_100.txt, 4.924998563878677 % de la surface est occupée par des bulles
 Pour fonce_102_results_100d.txt, 13.196159811580882 % de la surface est occupée par des bulles
 Pour fonce_301_results_100t.txt, 10.403635824196572 % de la surface est occupée par des bulles
 Pour fonce_302_results_100t.txt, 11.968238711606647 % de la surface est occupée par des bulles
 Pour fonce_303_results_100t.txt, 8.315796342517823 % de la surface est occupée par des bulles
 Pour fonce_451_results_100.txt, 16.15335302415237 % de la surface est occupée par des bulles

Figure 44 - Résultats

D. Calcul de la fraction volumique d'air présente dans le verre après fusion

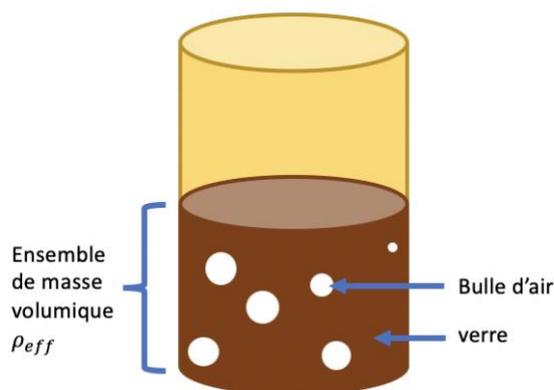


Figure 45 – Schéma d'un creuset

Avant d'introduire le calcin dans un creuset, on mesure la masse du creuset ainsi que la masse d'eau équivalente du creuset pour obtenir son volume via

$$V(\text{creuset}) = \frac{m(\text{eau dans le creuset})}{\rho(\text{eau})}$$

Suite à la fonte du verre, on mesure la masse de verre ($m_{\text{creuset+verre}} - m_{\text{creuset}}$) ainsi que son volume.

Ce dernier s'obtient en ajoutant de l'eau pour remplir totalement le creuset que l'on pèse et, connaissant alors la masse d'eau ajoutée on a : $V(\text{verre}) = \frac{m(\text{eau ajoutée})}{\rho(\text{eau})}$

On a alors directement accès à la masse volumique apparente du verre fondu qui contient encore de l'air.

Si on note $\alpha = \frac{\text{volume}_{\text{air}}}{\text{volume}_{\text{échantillon}}}$ la fraction volumique d'air, on a par ailleurs :

$$m_{\text{échantillon}} = m_{\text{verre}} + m_{\text{air}}$$

$$\frac{m_{\text{échantillon}}}{\text{volume}_{\text{échantillon}}} = \frac{m_{\text{verre}}}{\text{volume}_{\text{échantillon}}} + \frac{m_{\text{air}}}{\text{volume}_{\text{échantillon}}}$$

$$\rho_{\text{échantillon}} = \frac{m_{\text{verre}}}{\text{volume}_{\text{verre}}} * \frac{\text{volume}_{\text{verre}}}{\text{volume}_{\text{échantillon}}} + \frac{m_{\text{air}}}{\text{volume}_{\text{air}}} * \frac{\text{volume}_{\text{air}}}{\text{volume}_{\text{échantillon}}}$$

$$\rho_{\text{échantillon}} = \rho_{\text{verre}} * \frac{\text{volume}_{\text{verre}}}{\text{volume}_{\text{échantillon}}} + \rho_{\text{air}} * \frac{\text{volume}_{\text{air}}}{\text{volume}_{\text{échantillon}}}$$

$$\rho_{\text{échantillon}} = \rho_{\text{verre}} * \frac{\text{volume}_{\text{échantillon}} - \text{volume}_{\text{air}}}{\text{volume}_{\text{échantillon}}} + \rho_{\text{air}} * \alpha$$

$$\rho_{\text{échantillon}} = \rho_{\text{verre}} * (1 - \alpha) + \rho_{\text{air}} * \alpha$$

Dès lors, on peut isoler $\alpha = \frac{\rho_{\text{échantillon}} - \rho_{\text{verre}}}{\rho_{\text{air}} - \rho_{\text{verre}}}$, que l'on détermine expérimentalement.

E. Lien entre granulométrie et taille des bulles

Pour déterminer la taille caractéristique des bulles qui peuvent être formées dans le verre en fonction de la granulométrie initiale, nous avons utilisé un modèle simple dans lequel le calcin est représenté par des grains sphériques agencés dans un réseau cubique à faces centrées, réseau d'empilement le plus compact. On retrouve alors par des calculs classiques de cristallographie la taille des sites interstitiels tétraédriques (*Introduction à La Cristallographie/Taille Des Sites Interstitiels — Wikiversité, 2018*) dans lesquels peuvent naître les bulles. On a :

$$r_{\text{tétra}} = r \left(\sqrt{\frac{3}{2}} - 1 \right)$$

Où r correspond au rayon des grains de calcin. Il est donc direct que plus la granulométrie est grossière, plus il y a de place entre les grains pour la formation de grosses bulles.

F. Calcul de la vitesse de remontée d'une bulle en fonction de sa taille

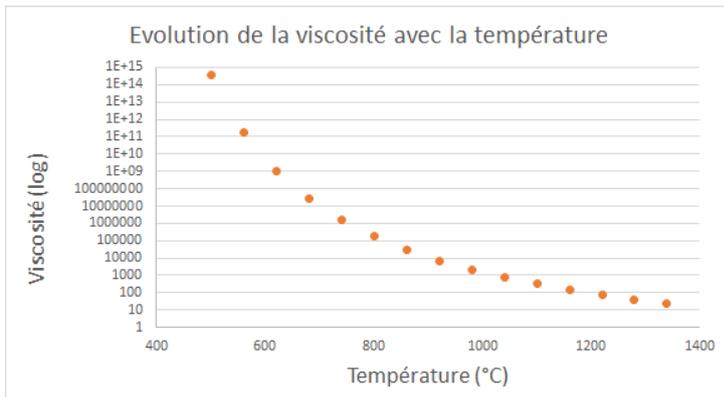
Nous cherchons ici à établir la vitesse de remontée des bulles en fonction de leur taille. Nous nous plaçons pour ce faire en régime permanent et appliquons le principe fondamental de la dynamique à une bulle d'air de rayon a qui monte à vitesse uniforme v dans du verre à 1100°C. Cette bulle est soumise à son poids, la poussée d'Archimède et la traînée, dont l'expression pour une bulle diffère de la loi de Stokes qui s'applique à un solide (Hadamard, 1911). On obtient en projetant sur l'axe de déplacement :

$$-4\pi\eta av + \frac{4}{3}\pi a^3(\rho_{\text{air}} - \rho_{\text{verre}})g = 0$$

D'où, en négligeant la masse volumique de l'air (plus de 2000 fois inférieure à celle du verre) :

$$v = \frac{\rho_{\text{verre}} g a^2}{3\eta}$$

Nous sommes alors confrontés à un nouveau problème, qui est de déterminer la viscosité du verre qui dépend fortement de la température. On trouve dans la littérature des modèles paramétrés comme le suivant (Scholze, 2012) :



$$\eta = 10^{A + \frac{B}{T - T_0}}$$

$$A = -2,5835$$

$$B = 4331,6$$

$$T_0 = 247,6^\circ\text{C}$$

Figure 46 – Evolution de la viscosité avec la température

Nous calculons alors la viscosité du verre à 1100°C : ≈315 Pa.s

Nous pouvons ensuite calculer le temps nécessaire pour qu'une bulle d'un certain rayon remonte à la surface d'un creuset de 6cm de haut (hauteur typique que nous avons utilisée), les résultats étant regroupés sur la figure en échelle log-log. Nous avons ajouté en orange la limite de 15 min, temps de cuisson de plusieurs de nos échantillons pour voir la limite entre les bulles ayant le temps de remonter et celles restant piégées. Cette limite s'effectue pour un rayon de 1,60 mm. Nous remarquons par ailleurs que ce rayon correspond au rayon maximum effectivement observé dans nos échantillons.

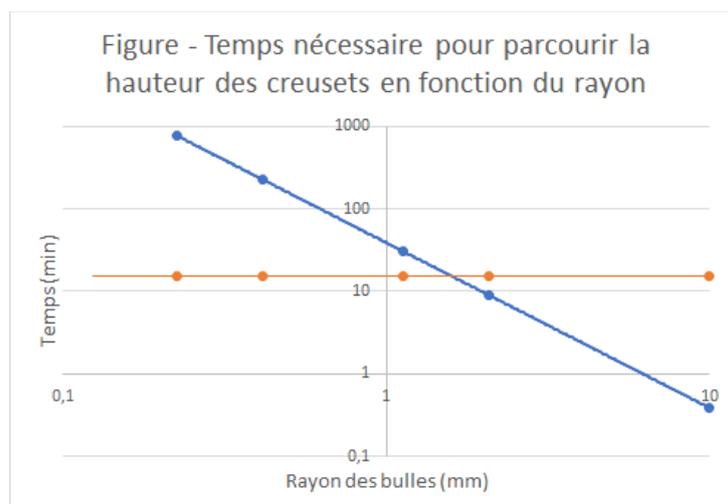


Figure 47 – Temps nécessaire pour parcourir la hauteur des creusets en fonction du rayon

Cette étude justifie ainsi le fait que les bulles les plus petites restent piégées dans le verre, et donc la nécessité d'ajouter des affinants qui forment de plus grosses bulles dont la vitesse de remontée est augmentée.

Exemple de granulométrie de calcin externe :

Size (mm)	Cumulative fraction (wt%)
< 10	> 60 %
< 3	20 %
< 1	< 10 %

Exemple de composition de verre ambre en pourcentages massiques :

SiO2	Al2O3	Na2O	K2O	CaO	MgO	Fe2O3	Cr2O3	SO3
71,7	2,0	12,2	0,8	10,7	1,8	0,4500	0,0500	0,0400

G. Quelques précisions sur l'influence négligeable de la granulométrie sur le temps de fonte dans le cadre de notre étude.

On cherche à déterminer le temps caractéristique des transferts thermiques pour un mélange de calcin de granulométries que l'on considère selon 4 catégories : "petit" (< 1 mm), "moyen" (entre 1 et 2,5 mm), "gros" (entre 2,5 et 4 mm) et "très gros" (> 4 mm). L'objectif est de vérifier qu'il ne faut pas considérer des comportements de transferts thermiques différents entre granulométrie dans les mélanges que l'on étudiera.

On modélise les creusets par des cylindres de rayon $R = 1,35$ cm et de hauteur H



Figure 48 - Photo de nos creusets remplis de grains "gros".

Dans ce cas le temps caractéristique du transfert thermique est $\tau = \frac{L^2}{D}$ avec D le coefficient de diffusion du milieu. L correspond à la taille caractéristique des transferts thermiques, on peut ici l'identifier au rayon de nos creusets R .

$D = \frac{\lambda}{\rho c}$ avec λ la conductivité thermique du milieu, ρ sa masse volumique, c sa capacité thermique massique.

On détermine ces grandeurs pour nos grains :

$$C_{eff} = C_{verre} * \text{fraction massique verre} + C_{air} * \text{fraction massique air}$$

Donc $C_{eff} \approx C_{verre}$ en négligeant la part d'air en masse.

ρ_{eff} est déterminé selon le protocole suivant :

A l'aide d'une balance de précision 10^{-4} g, on mesure la masse de creuset seul, du creuset rempli d'eau et du creuset rempli de calcin. On peut ainsi aisément trouver le volume du creuset et donc la masse volumique du mélange calcin + verre.

λ_{eff} est déterminé selon un modèle établi par Zehner et Schlünder (Zehner & Schlünder, 1972).

L'expression suivante est utilisé dans notre cas :

$$\lambda_{eff} = \lambda_{gaz} \left(1 - \sqrt{1 - \varphi} + \frac{2k\sqrt{1 - \varphi}}{k - B} \left(\frac{k(k - 1)B}{(k - B)^2} \ln \left(\frac{k}{B} \right) - \frac{1 + B}{2} - \frac{k(B - 1)}{k - B} \right) \right)$$

avec $k = \frac{\lambda_{solide}}{\lambda_{gaz}}$ $B = 1,25 \left(\frac{1 - \varphi}{\varphi} \right)^{10/9}$

On trouvera ci-dessous des mesures réalisées par Franck Pigeonneau dans le cadre de la comparaison de ces deux modèles (Pigeonneau, 2021). On remarquera que les deux modèles se recoupent à 1100 °C sauf dans le cas du Grog. Or ce dernier est le seul de granulométrie très supérieure au calcin que nous utiliserons et est constitué d'autre part d'une matière poreuse ce qui peut expliquer ces résultats. Notre calcin est plus proche du comportement de l'alumine et du sable.

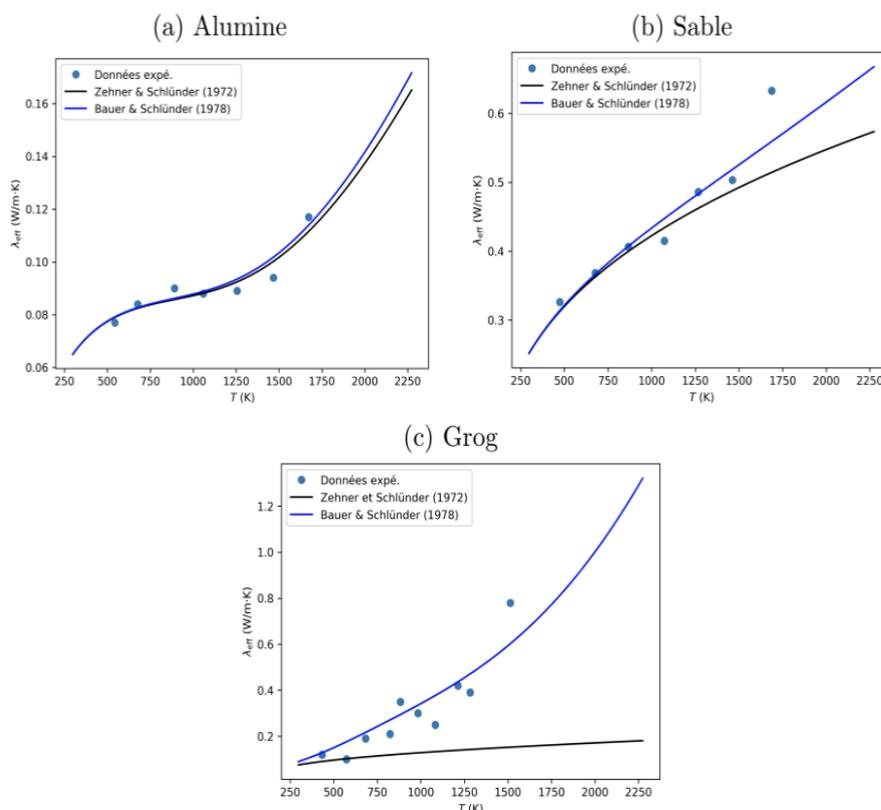


Figure 49 – λ_{eff} ($W m^{-1}K^{-1}$) en fonction de $T(K)$ pour (a) l'alumine, (b) le sable et (c) le grog. Comparaison avec les modèles donnés par les équations (8) et (11)

(8) Modèle de Zehler et Schlunder. (Zehner & Schlünder, 1972)

$$\frac{\lambda_{\text{eff}}}{\lambda_g} = \left(1 - \sqrt{1 - \varphi}\right) (1 + \varphi\kappa_r) + \sqrt{1 - \varphi} [\varphi_s\kappa + (1 - \varphi_s)k_c], \quad (11)$$

avec

$$\kappa_r = \frac{4\sigma\epsilon_r T^3 d}{(2 - \epsilon_r)\lambda_g}, \quad (12)$$

$$k_c = \frac{2}{N} \left[\frac{B(\kappa + \kappa_r - 1)}{\kappa N^2} \ln\left(\frac{\kappa + \kappa_r}{B}\right) + \frac{(B + 1)(\kappa_r - B)}{2B} - \frac{B - 1}{N} \right], \quad (13)$$

$$N = 1 + \frac{\kappa_r - B}{\kappa}. \quad (14)$$

(11) Modèle de Bauer et Schlunder. (Bauer & Schlünder, 1974)

Mesure de la fraction volumique d'air dans le grain avant cuisson :

Il est possible de mesurer la masse volumique du mélange grain air en pesant le grain et en mesurant le volume de creuset. Ce volume est déterminé en pesant le creuset rempli d'eau. La masse volumique de notre verre étant connue, il est possible de remonter au volume de verre introduit et donc au volume qu'il reste à occuper à l'air. Il est ainsi possible de remonter à la conductivité thermique effective de notre milieu.

L'ensemble de nos mesures et résultats est disponible dans le tableau 5 :

	fin	moyen	gros	très gros
masse calcin (g)	47,8647	47,2958	48,3999	49,6766
volume calcin (cm3)	19,20657277	18,9782914	19,42133141	19,93363027
volume d'air (cm3)	15,02722723	15,2555086	14,81246859	14,30016973
fraction volumique air	0,438958784	0,445627088	0,432685492	0,417720783
conductivité thermique équivalente (W/(ms))	0,281	0,276	0,284	0,259
masse volumique effective (g/cm3)	1,398170814	1,381552734	1,413804486	1,451098038
diffusivité effective D (m2/s)	2,8711E-07	2,85393E-07	2,86966E-07	2,54979E-07
temps caractéristique (s)	634,7745251	638,5927177	635,0919269	714,7638307
temps caractéristique (min)	10,57957542	10,64321196	10,58486545	11,91273051

Tableau 5 - caractéristiques du mélange grain/air

On peut donc conclure notre étude sur ces résultats :

L'étude de l'influence de la granulométrie sur le nombre de bulles et la quantité de mousse produite au cours de la cuisson n'aura pas à tenir compte du transfert thermique et du temps de fonte. Ceci nous permettra de simplifier notre modèle et nos explications sans perdre en pertinence.

2. Coloration du verre

A. Etude théorique de la maquette

L'expérience réalisée fait intervenir les 5 grandeurs décrites dans le tableau 6 :

t_m	Temps de mélange
ρ	Masse volumique du fluide en écoulement
η	Viscosité cinématique du fluide
D	Dimension caractéristique de l'agitateur
ω	Vitesse de rotation de l'agitateur

Tableau 6 – Les différentes grandeurs du problème

Les phénomènes en jeu peuvent être mis sous la forme d'une équation de type :

$$F(t_m, \rho, \eta, D, \omega) = 0$$

Nous allons ici appliquer le théorème de Vaschy-Buckingham pour réduire le nombre de paramètres. Celui-ci postule que si l'on fixe trois grandeurs choisies judicieusement (il s'agit généralement de la masse, du temps et de la distance), on obtient un système de (5-3) paramètres.

En choisissant n'importe quelle échelle pour M, L et T, on obtient l'équation sans dimensions :

$$F\left(\frac{t_m}{T}, \frac{\rho}{ML^{-3}}, \frac{\eta}{MLT^{-1}}, \frac{D}{L}, \frac{\omega}{T^{-1}}\right) = 0$$

On prend des échelles liées aux données : $L = D, M = \rho D^3$ et $T = \omega^{-1}$. En reportant ce choix d'unités dans l'équation ci-dessus, on obtient :

$$F\left(t_m \omega, 1, \frac{\eta}{\rho D^2 \omega}, 1, 1\right) = 0$$

$$F'(t_m \omega, Re) = 0$$

Cette équation fait directement apparaître le nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\rho D^2 \omega}{\eta}$$

On en déduit que le produit du temps du mélange et de la vitesse de rotation est fonction du nombre de Reynolds :

$$t_m \omega = f(Re)$$

Une partie des objectifs de ce mini-projet réside donc dans la détermination expérimentale de cette fonction f.

Le principe de similitude postule que les arguments de la fonction caractéristique du phénomène doivent être identiques en passant de l'échelle industrielle à l'échelle réduite. On obtient alors deux conditions :

$$t_{m_1} \omega_1 = t_{m_2} \omega_2$$

$$Re_1 = Re_2$$

Les autres grandeurs ayant été fixées par le choix des industriels et ceux de la maquette, ces égalités imposent la vitesse de rotation de notre agitateur :

$$\omega_2 = \omega_1 \frac{\eta_2 \rho_1 D_1^2}{\eta_1 \rho_2 D_2^2}$$

On obtient ainsi la totalité des données pour notre expérience résumées dans le tableau 7 :

	ρ ($kg.m^{-3}$)	η ($Pa.s$)	D (mm)	ω ($tr.min^{-1}$)
Ech. indust.	2365	58,5	360	15
Ech. réduite	1260,8	1,414	72	17

Tableau 7 – Les données pour l'échelle industrielle et l'échelle réduite

B. Dispositif expérimental

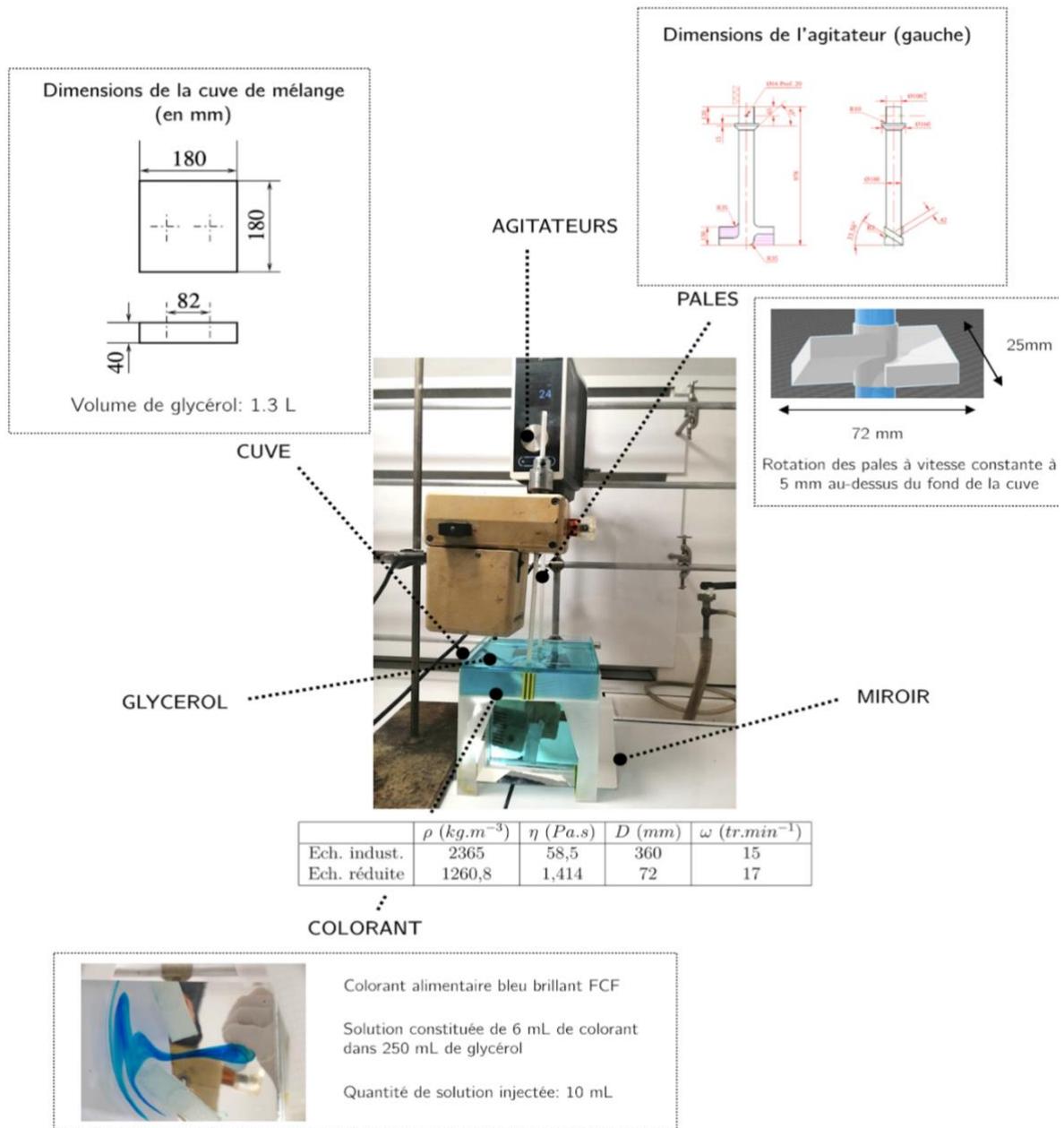


Figure 50 - Détail du dispositif expérimental

La figure 50 présente un récapitulatif des paramètres de la maquette.

C. Descriptif expérimental



Expérience A

Expérience B

Expérience C.1

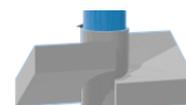
Expérience C.2

Expérience C.3

Figure 51 – Vue de la cuve pour différentes expériences

Homogénéisation à un agitateur

Un seul agitateur tournant à 17 tr/min est placée au centre de la cuve. Après injection d'un colorant orange (Alizarin Yellow), on observe rapidement l'établissement d'un cercle de couleur (Figure 51) dont seul le rayon augmente au cours du temps. En 15 minutes d'expérience, le cercle, présentant un fort gradient coloré, ne disparaît pas : l'expérience met ainsi en évidence la nécessité d'un deuxième agitateur pour l'homogénéisation du glycérol. Nous utiliserons un colorant plus voyant dans la suite (bleu brillant FCF).



Homogénéisation à deux agitateurs identiques tournant dans le même sens

Deux agitateurs identiques sont placés sur l'axe qui découpe la cuve en deux rectangles égaux. Elles tournent dans le même sens, à 21 tr/min. On constate que l'homogénéisation est longue et séparée en deux zones distinctes (Figure 51).



Homogénéisation à deux agitateurs de pas opposé tournant dans des sens opposés

On dispose les deux pales dans la même disposition qu'en B. Les deux agitateurs ont des pas et des sens de rotation opposés. On injecte le colorant avant que le flux ne soit aspiré par les agitateurs (C.1) ou entre les deux agitateurs (C.2). Dans les deux cas, l'homogénéisation est rapide, volumique et totale (Figure 51). Cette méthode correspond à celle des industriels et semble en effet la plus adaptée.



En reprenant la même disposition, on injecte le colorant après que le flux ait été aspiré par les agitateurs. On observe alors une expérience peu reproductible : si le colorant n'est pas déposé au centre de la cuve, il peut se concentrer autour d'un agitateur à l'exclusion de l'autre (Figure 51). Cette situation ne perdure pas dans le temps mais augmente significativement le temps d'homogénéisation. On conclut que cette méthode d'injection n'est pas optimale, comme l'intuition nous le laissait présumer.



Homogénéisation à deux pales adaptées aux fluides très visqueux

On dispose deux agitateurs de forme particulière dans les mêmes conditions que l'expérience C, et on injecte avant les agitateurs. Le modèle des agitateurs est vanté comme plus adapté à l'homogénéisation des fluides visqueux. En reproduisant l'expérience C.1, on remarque que l'homogénéisation n'est sensiblement pas plus rapide, mais qu'elle est plus volumique et à terme meilleure qu'avec les agitateurs classiques. De plus, les zones de stagnation ne sont pas les mêmes qu'avec des agitateurs classiques.



D. Exploitation des résultats expérimentaux.

Traitement des données

Nous allons décrire plus précisément les méthodes de traitement des images utilisées pour quantifier le temps d'homogénéisation et les résultats obtenus.

Lors de nos expériences, nous plaçons des feuilles blanches à la surface de la cuve pour profiter de larges zones de couleur unie où réaliser les mesures. De plus, la luminosité extérieure est fixée en obturant les fenêtres du laboratoire. Les photos sont prises toutes les 2 secondes pendant 1000s.

On les observe à l'œil une première fois pour trouver les zones qui poseront des problèmes d'homogénéisation. Ainsi, on fixe les zones dont les pixels seront étudiés.

Par exemple, dans l'expérience C, les coins haut et bas gauches présentaient des zones de stagnation. Ces zones finissaient par se replier vers le point au centre à gauche. Ces points ont donc fait l'objet d'une étude quantifiée du temps d'homogénéisation (Figure 51).



Figure 51– Identification des différentes zones étudiées

Les valeurs moyennes des pixels de la zone sont ensuite récupérées grâce au logiciel ImageJ et traitées sur un classeur Excel. On trouve la valeur moyenne pour un temps long en moyennant les 100 derniers termes, et on normalise l'intégralité des valeurs par cette valeur finale. On lisse ensuite les valeurs normalisées en prenant une moyenne glissante sur 9 termes. On obtient alors ce type de courbes :

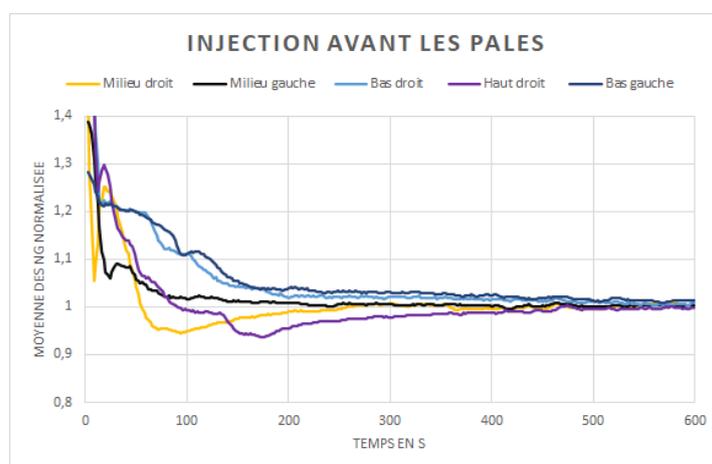


Figure 52 – Moyenne des niveaux de gris des pixels pour 5 zones en fonction du temps

Sur ces courbes, une valeur haute correspond à une couleur claire, tandis qu'une zone foncée correspond à une valeur basse (Figure 52). On part de valeurs hautes car la cuve n'est pas du tout

colorée. Ces valeurs baissent rapidement lorsqu'on injecte le colorant, très foncé, puis la couleur s'éclaircit en se diluant jusqu'à la valeur asymptotique.

On mesure le temps d'homogénéisation, soit le temps mis par les valeurs lissées pour atteindre leur valeur finale à plus ou moins 3%. Le temps obtenu est toujours confronté à une vérification humaine : on regarde les photos correspondant au temps d'homogénéisation trouvé, pour conclure sur l'efficacité de notre mesure. Cela va parfois conduire à corriger la position de la zone d'étude, notamment si on constate que le point intéressant s'est trop déplacé dans la cuve.

Exploitation des résultats

Du point de vue des résultats, on observe tout d'abord une périodicité des écoulements, particulièrement bien observable dans le cas où les deux agitateurs tournent dans le même sens (figure 69) :

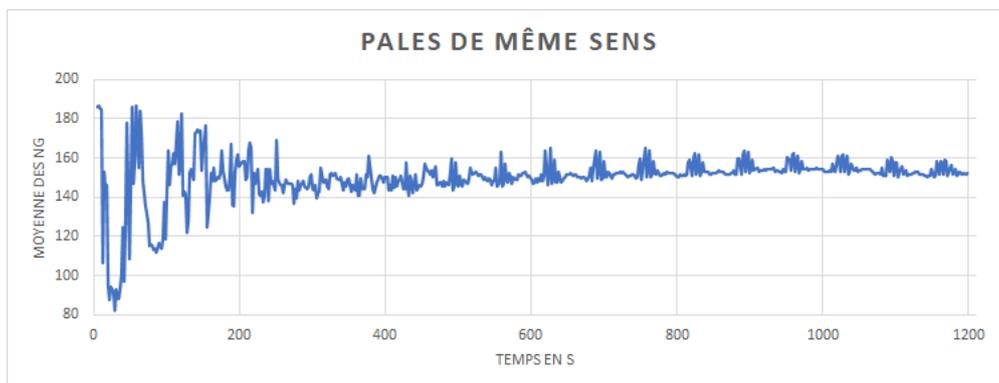


Figure 53 - Moyenne des niveaux de gris des pixels pour une zone en fonction du temps

Sur la figure 69, la période observée est de 69s, et semble due à la légère différence de vitesse de rotation des deux agitateurs.

Ensuite, voici plusieurs expériences qui nous ont permis d'étudier le mélange du colorant :

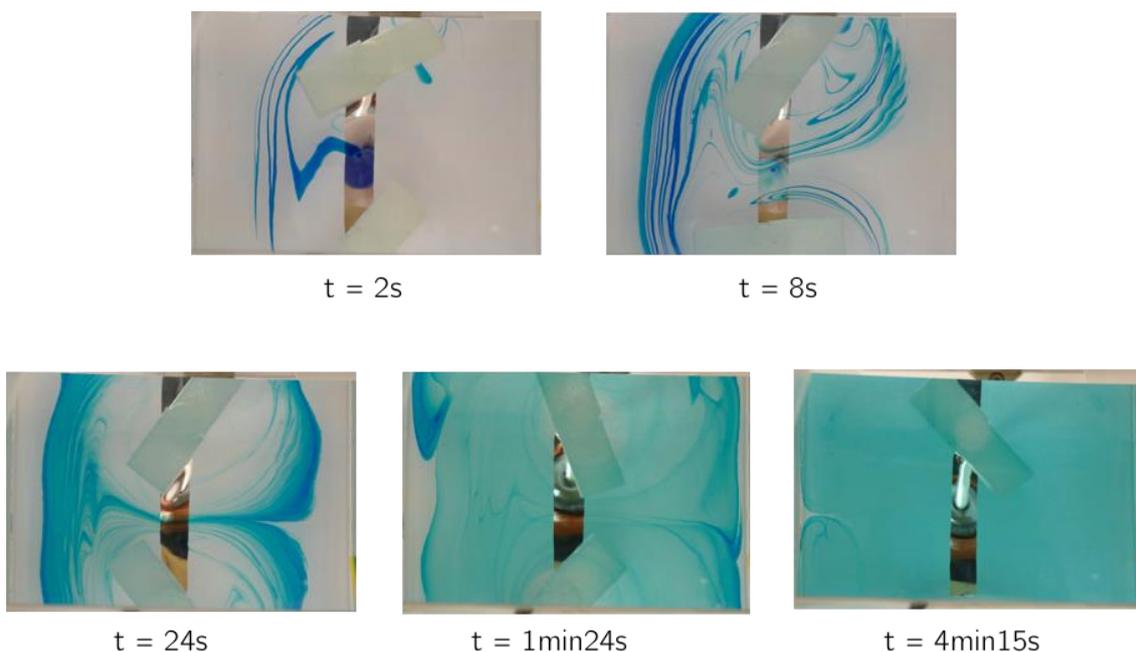


Figure 54 – Photos de l'expérience C.2

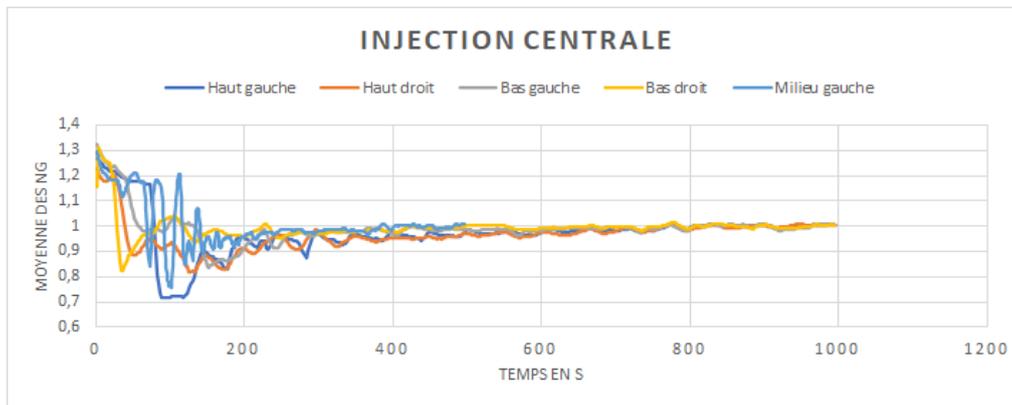


Figure 55 – Evolution de la coloration de zones (en niveaux de gris) pour un dépôt de colorant entre les deux agitateurs.

Bas droit	306
Haut droit	646
Bas gauche	576
Haut gauche	596
Milieu gauche	448
temps max	646
temps visuel d'homogénéisation totale	744
temps visuel d'homogénéisation globale	336

Tableau 8– Temps d'homogénéisation en fonction de la zone étudiée, en secondes

La figure 55 présente les résultats obtenus après traitement des images, que le tableau 8 synthétise. On remarque que les points de stagnation entraînent comme attendu une augmentation du temps d'homogénéisation. Ici, on note que le temps d'homogénéisation pour les zones milieu gauche et bas droit, où il n'y a pas de point de stagnation visible (Figure 54), est plus faible que pour les autres zones.

De plus, il nous est apparu intéressant de différencier dans le tableau 8 deux temps d'homogénéisation visuels : un premier global, qui correspond au temps où la majorité de la cuve est homogénéisée (sans compter les coins pathologiques), et un second total qui correspond au temps où les imperfections dues aux zones de stagnation sont effacées. En effet, les zones de stagnation qu'on observe dans la cuve du fait de ses 4 parois, et de ses coins notamment, n'auront pas forcément la même forme dans un feeder sans parties angulaires autour des agitateurs. Le calcul d'un temps global semble donc pertinent dans le cadre d'une coloration industrielle.

En analysant plus précisément les courbes, on remarque que la courbe *milieu gauche* (Figure 55) présente de grandes variations aux alentours de 100s. Cela est dû au fait que le point de stagnation que l'on distingue en haut à gauche de l'image (Figure 54) pour $t=1\text{min}24\text{s}$ se replie progressivement vers le centre. Quand il arrive sur la zone milieu gauche, le mouvement des agitateurs le place et le retire alternativement de la zone étudiée. On a donc à la suite des images très colorées ou très blanches qui apparaissent clairement sur la courbe.

Pour comparer les temps d'homogénéisation, on modifie le point d'injection :

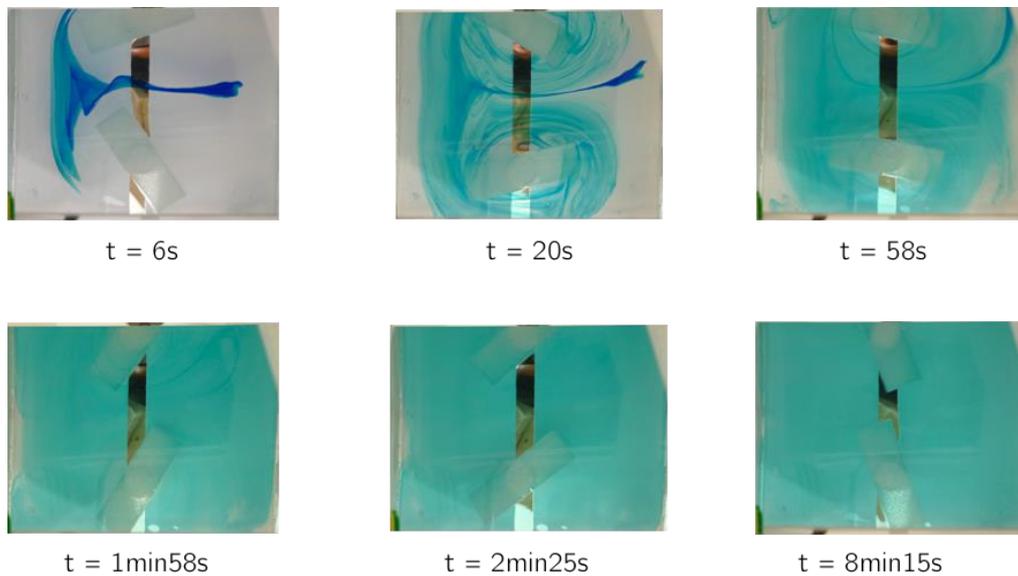


Figure 56 – Photos de l'expérience C.1

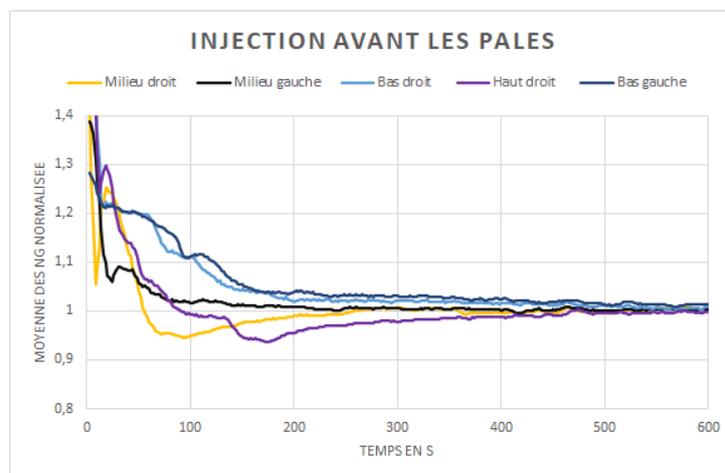


Figure 57 – Evolution de la coloration de zones (en niveaux de gris) pour un dépôt de colorant en amont des deux agitateurs.

Milieu gauche	72
Milieu droit	62
Bas droit	190
Haut droit	244
Bas gauche	340
Temps max	340

temps visuel d'homogénéisation total	210
temps visuel d'homogénéisation global	310

Tableau 9 – Temps d'homogénéisation (en s) en fonction de la zone

On remarque d'abord visuellement qu'aux alentours de 20s sur la figure 56, la cuve est plus homogène que dans l'expérience précédente (Figure 54). On constate dans la même idée que le temps d'homogénéisation de la cuve est moindre quand on injecte le liquide avant les agitateurs plutôt qu'entre eux (Figure 57 et Tableau 9).

On explique cela par l'effet de resserrement puis écartement de l'écoulement au passage des pales. En effet, le colorant est rassemblé en un fin courant entre les deux agitateurs, puis réparti à travers la cuve avec la formation de "plis" de colorants à la sortie des agitateurs (Figure 56). Deux particules fluides colorées auparavant proches se retrouvent alors très éloignées, ce qui permet une bonne homogénéisation. En injectant au centre des agitateurs, on perd l'effet de resserrement avant l'écartement lors du premier passage du colorant entre les agitateurs.

De plus, on remarque que dès 20s de mélange, il y a déjà une homogénéisation volumique (on voit que du colorant est passé sous les agitateurs sur la figure 56) tandis qu'on n'observe pas ce genre de chose si on introduit le colorant entre les agitateurs.

On confirme ces observations en injectant le colorant après les agitateurs. On observe alors que l'homogénéisation se détériore car on ne profite pas directement de la dispersion due aux agitateurs. De plus, l'expérience n'est alors pas reproductible, car si l'injection du colorant n'est pas réalisée exactement au centre, celui-ci sera principalement emporté par un agitateur (Figure 58), rallongeant de beaucoup le temps d'homogénéisation (supérieur à 1000s dans le cas dissymétrique). On voit sur cette dissymétrie bien plus sur l'image de gauche que sur l'image de droite



Figure 58 – Deux résultats différents pour l'expérience C.3 à t=14s

Les expériences avec un autre type d'agitateur ont permis de montrer que changer les agitateurs change l'établissement des points de stagnation. Voici les résultats de l'expérience D (Figure 60). Pour des problèmes techniques, nous n'avons pas pu placer les feuilles sur la cuve, perturbant légèrement les mesures.

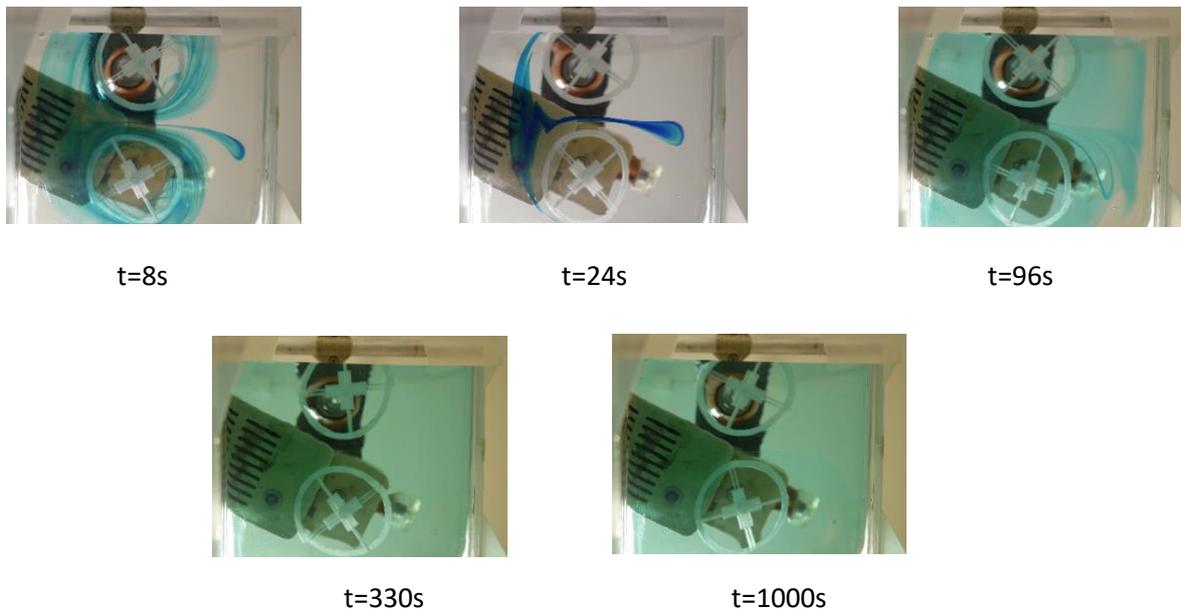


Figure 59 – Photo de l'état de la cuve en fonction du temps pour les nouveaux agitateurs

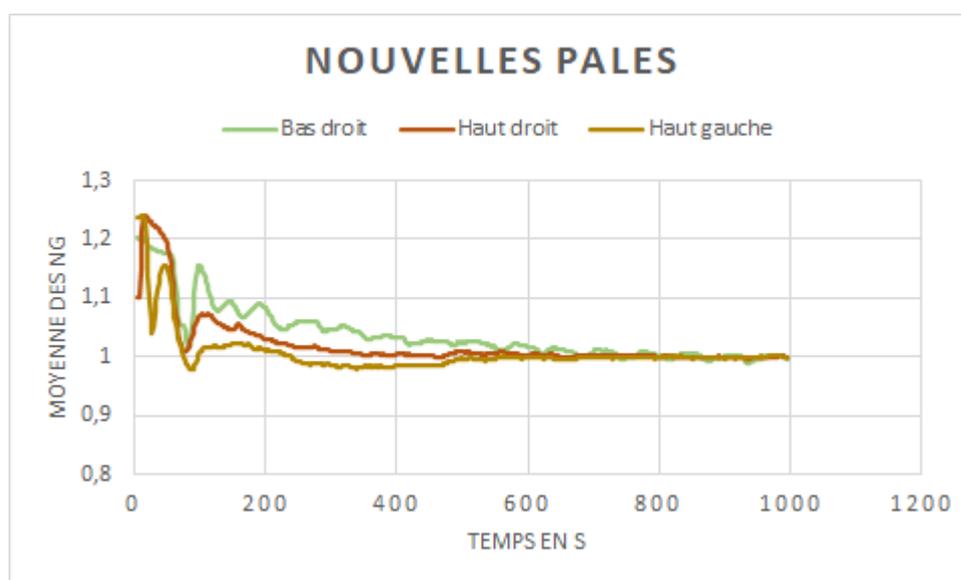


Figure 60 – Moyenne des niveaux de gris en fonction du temps pour trois zones

Bas droit	412
Haut droit	204
Haut gauche	70
Temps max	412
Temps visuel d'homogénéisation globale	340
Temps visuel d'homogénéisation totale	616

Tableau 10 - Temps d'homogénéisation en fonction de la zone, en seconde

On remarque que les points de stagnation que l'on observait en haut et en bas à gauche de la cuve dans l'expérience C.2 s'effacent très rapidement (ici en 70s, sur la figure 59). De plus, lors de l'expérience, on observe que le colorant plonge plus en profondeur et plus rapidement avec ces nouveaux agitateurs qu'avec les précédents.

D'autres expériences ont été moins concluantes du point de vue de l'homogénéisation, mais sont tout de même porteuses d'information :

Expérience A

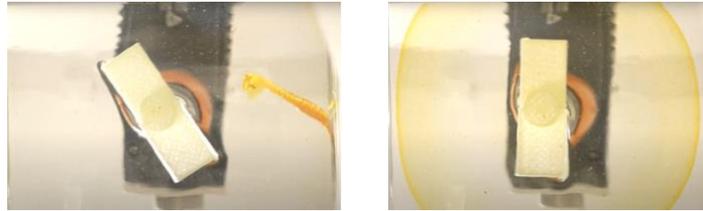


Figure 61 – Photo de l'état de la cuve lors de l'expérience A

Par exemple l'expérience A, avec un seul agitateur montre l'établissement d'un cercle coloré dont le rayon augmente progressivement (Figure 61). Il n'y a pas d'homogénéisation. On observe ici l'extrême régularité des écoulements très visqueux, qui apporte même une certaine réversibilité (Taylor, 1923). Cette expérience nous a aussi conduit à changer de colorant, car le jaune que nous utilisons n'était pas assez foncé pas assez pour être traité numériquement.

Dans le cas de l'expérience B, les deux agitateurs tournaient dans le même sens:

Expérience B



t = 14s



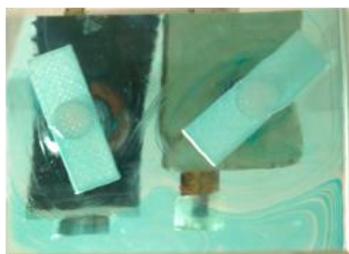
t = 1min15s



t = 4min



t = 5min50s



t = 6min34s



t = 13min16s

Figure 62 – Photo de l'état de la cuve pour deux agitateurs tournant dans le même sens, à différent temps.

On observe une homogénéisation progressive de la cuve, qui reste séparée en deux zones de concentration distinctes (Figure 62). Cette technique d'homogénéisation n'est clairement pas optimale car peu dispersive. Dans la zone basse, on observe bien comment en "pliant" de nombreuses fois la tache de colorant, on aboutit à l'homogénéité.

E. Modélisation et calculs

Equation de Navier-Stokes

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0 \\ \rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\vec{\nabla}P + \rho \vec{g} + \vec{\nabla} \cdot (2\eta \mathbb{D}) \end{cases} \text{ dans la suite du calcul on considère que } \eta \text{ est constant}$$

- $\mathbb{D} = \frac{1}{2} [\vec{\nabla} \vec{u} + (\vec{\nabla} \vec{u})^T]$

- Tenseur de contrainte : $\vec{\nabla} = -P\mathbb{1} + 2\eta \mathbb{D} = -P\mathbb{1} + \eta [\vec{\nabla} \vec{u} + (\vec{\nabla} \vec{u})^T]$

$$\vec{\nabla} \cdot [\vec{\nabla} \vec{u}] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right]$$

$$\vec{\nabla} \cdot [(\vec{\nabla} \vec{u})^T] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] = 0$$

$$\vec{\nabla} \vec{\nabla} = -\vec{\nabla}P + \eta \vec{\nabla}^2 \vec{u} \text{ On reconnaît bien la forme usuelle de l'équation de NV}$$

- $\rho \vec{g} = \vec{\nabla}(\rho \vec{g} \cdot \vec{x})$ On peut donc rentrer le ρ dans le terme $\vec{\nabla}P$

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\vec{\nabla}P + \vec{\nabla} \cdot [2\eta \mathbb{D}] \text{ (on néglige } \rho g \text{ car on a pas d'effet volumique et que } \rho \text{ est cst)}$$

On obtient donc que :

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0 \\ \rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\vec{\nabla}P + \vec{\nabla} \cdot (2\eta \mathbb{D}) \end{cases}$$

- Enfin on calcule le nombre de Reynolds

$$Re = \frac{\rho v D}{\eta} = \frac{\rho \omega D^2}{\eta} = \frac{2365 \times 15 \times 2\pi \times (0,36)^2}{60 \times 58,5} = 8,23$$

Nous avons donc un écoulement laminaire.

Afin de résoudre l'équation de NV, nous allons donc utiliser la méthode des éléments finis afin d'approcher la solution.

Formulation variationnelle

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0 \\ \rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\vec{\nabla}P + \vec{\nabla} \cdot (2\eta \mathbb{D}) \end{cases}$$

Condition limite

$$\vec{u} = \vec{0} \quad \forall \vec{x} \in \partial\Omega_D \text{ Condition limite essentiel (à coder)}$$

$$\begin{cases} \vec{u} \cdot \vec{n} = 0 \\ (\vec{\nabla} \cdot \vec{n}) \wedge \vec{n} = 0 \end{cases} \text{ Cisaillement nulle surfacique, condition limite naturelle}$$

$$\vec{v} = \{ \vec{v} \in H(\Omega) \mid \vec{v} = \vec{0} \quad \forall x \in \partial\Omega_D \}$$

Carré sommable et dérivé

$$q = \{q \in L_2(\Omega) \mid \int q \cdot dV = 0\}$$

Carré sommable

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot [\nabla \vec{u}] \right) = -\vec{\nabla} P + \vec{\nabla} (2\eta \mathbb{D})$$

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot [\nabla \vec{u}] \cdot \vec{v} \right) = -\vec{v} \cdot \vec{\nabla} P + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} (2\eta \mathbb{D})$$

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot [\nabla \vec{u}] \cdot \vec{v} \right) &= - \int_{\Omega} \vec{v} \cdot \vec{\nabla} P \cdot dV + \int_{\Omega} \vec{v} \cdot \vec{\nabla} (2\eta \mathbb{D}) \cdot dV \\ &= \int_{\Omega} \vec{\nabla} \cdot [-P\vec{v} + \vec{v}2\eta D] \cdot dV - \int_{\Omega} (-P\vec{\nabla}\vec{v} + 2\eta D : \vec{\nabla}\vec{v}) \cdot dV \end{aligned}$$

Double produit contracté : $\vec{A} : \vec{B} = A_{ij} \times B_{ij}$

On utilise le théorème d'Ostrogradski

$$\int_{\Omega} \rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [\nabla \vec{u}] \cdot \vec{v} \right) = \int_{\partial\Omega} \vec{v} \cdot [-P\vec{n} + 2\eta D] \cdot \vec{n} \cdot dS + \int_{\Omega} P\vec{\nabla} \cdot \vec{v} \cdot dV - \int_{\Omega} 2\eta \mathbb{D}(\vec{u}) : \mathbb{D}(\vec{v}) \cdot dV$$

On retire les composantes au bord qui s'annule :

$$\int_{\Omega} \rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot [\nabla \vec{u}] \cdot \vec{v} \right) = \int_{\frac{\partial\Omega}{\partial\Omega_D}} \vec{v} \cdot [-P\vec{n} + 2\eta D] \cdot \vec{n} \cdot dS + \int_{\Omega} P\vec{\nabla} \cdot \vec{v} \cdot dV - \int_{\Omega} 2\eta \mathbb{D}(\vec{u}) : \mathbb{D}(\vec{v}) \cdot dV$$

La formulation variationnelle est à la base de la résolution par la méthode des éléments finis.

On applique la même méthode pour q.

F. Mesure de la viscosité du glycérol

Dans le cadre de l'expérience, une mesure précise de la viscosité du glycérol est nécessaire. Cette mesure a été réalisée en laboratoire à l'aide d'un rhéomètre (Figure 64). Notre machine était asservie en couple, et a mesuré la vitesse de rotation d'une géométrie en contact avec le fluide (ici, un disque). Les mesures réalisées nous ont permis de tracer la viscosité en fonction du taux de cisaillement. Lors de la mesure, le taux de cisaillement augmente jusqu'à 100 /s puis rediminue jusqu'à 0.1 /s. La courbe obtenue peut être modélisée par une droite horizontale (Figure 63) : l'approximation du glycérol comme fluide newtonien est pertinente.

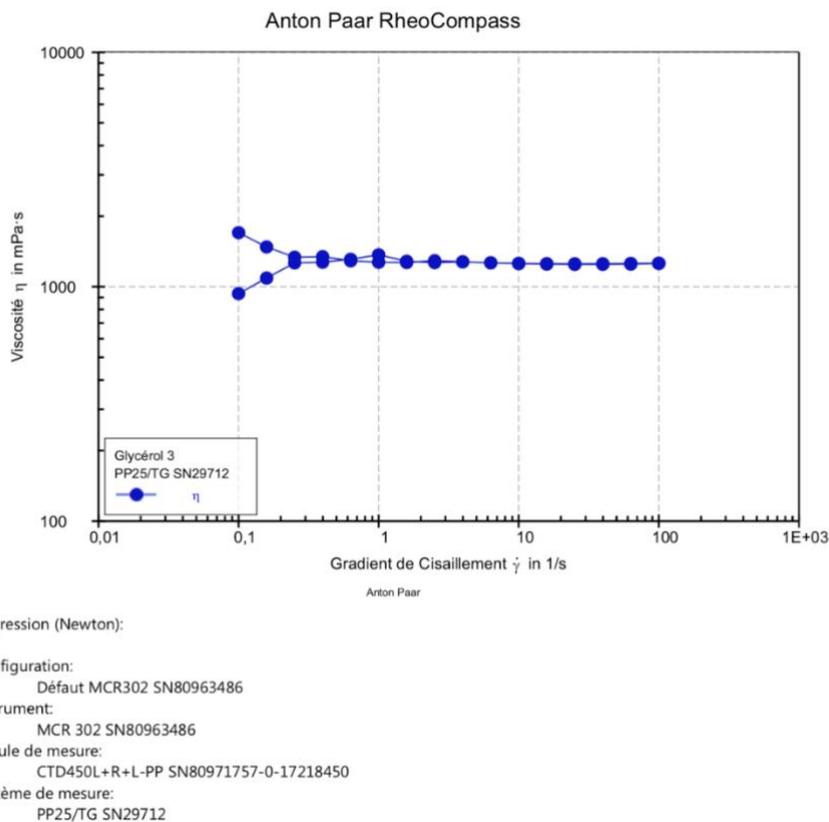


Figure 63 – Évolution de la viscosité du glycérol en fonction du taux de cisaillement



Figure 64 – Photos du dispositif de mesure de viscosité

G. Influence de la baisse du nombre de jours de transition sur les émissions carbone fossiles

On note : $CO_{2,f,m,1}$ la quantité de $CO_{2\text{éq}}$ fossiles émises pour la production d'un kg de verre quand le nombre de jours de transition pour changement de couleur est de $transi$. $CO_{2,f,m,2}$: cette quantité quand le nombre de jours de transition devient $\frac{transi}{f}$. $CO_{2,f,m}$ correspond aux émissions totales annuelles de CO_2 fossiles. $Prod_j$ correspond à la production journalière, dans un jour sans $\frac{transition}{pause}$. On cherche à relier le CO_2 émis dans le cas d'un nombre $transi$ de jour de transition contre le cas avec $\frac{transi}{f}$ jours de transition. Pour cela on exprime chacun d'eux, puis on calcule la différence et enfin on trouve le rapport de ces deux grandeurs :

$$\begin{aligned}
 CO_{2,f,m,1} &= \frac{CO_{2,f,a}}{prod_a} = \frac{CO_{2,f,a}}{prod_j \cdot (365 - transi)} \\
 CO_{2,f,m,2} &= \frac{CO_{2,f,a}}{prod_a} = \frac{CO_{2,f,a}}{prod_j \cdot (365 - \frac{transi}{f})} \\
 CO_{2,f,m,1} - CO_{2,f,m,2} &= \frac{CO_{2,f,a}}{prod_j} \left(\frac{1}{365 - transi} - \frac{1}{365 - \frac{transi}{f}} \right) \\
 &= \frac{CO_{2,f,a}}{prod_j} \left(\frac{365 - \frac{transi}{f} - 365 + transi}{(365 - \frac{transi}{f})(365 - transi)} \right) \\
 CO_{2,f,m,1} - CO_{2,f,m,2} &= \frac{CO_{2,f,a}}{prod_j} transi \left(1 - \frac{1}{f} \right) \left(\frac{1}{(365 - transi)(365 - \frac{transi}{f})} \right) \\
 CO_{2,f,m,1} - CO_{2,f,m,2} &= CO_{2,f,m,1} transi \left(\frac{1 - \frac{1}{f}}{365 - \frac{transi}{f}} \right) \\
 CO_{2,f,m,1} \left(1 - transi \left(\frac{1 - \frac{1}{f}}{365 - \frac{transi}{f}} \right) \right) &= CO_{2,f,m,2}
 \end{aligned}$$

On trouve ainsi un rapport d'environ 0.8 entre ces grandeurs, en prenant $transi = 75j$ (données Saverglass qui font environ 14 transitions par an) et $f = 8.6$ dans le cas où l'on fait 14 transitions durant 15h chacune (durée d'une transition dans un feeder). **Autrement dit, en termes d'émissions, les économies espérées en termes d'émissions fossiles sont de l'ordre de 20%.**

3. Formage à froid

A. Mesure des contraintes de rupture

1. Détermination du module d'Young

Les courbes force/déplacement nous permettent de remonter au module d'Young via une modélisation affine selon la relation $E = \frac{a * L^3}{48 I}$ avec a le coefficient directeur de la courbe de régression linéaire, L la longueur entre les deux points d'appui inférieurs et I le moment quadratique dépendant de la géométrie de la section : $I = \frac{h^3 * b}{12}$ avec h l'épaisseur de la plaque et b sa largeur.

La mesure du déplacement du mobile par la machine est imprécise en raison du léger jeu au niveau du contact entre les mors et la partie qui appuie sur l'éprouvette.

Pour résoudre ce problème, une caméra capturant des images à une fréquence de 10 Hz est utilisée. On mesure alors le déplacement du mobile image par image. Pour tracer la force en fonction de ce déplacement-là, on doit interpoler les valeurs des déplacements du mobile aux instants où la force est relevée par la machine.

On obtient alors une courbe plus proche de la réalité de l'expérience (figure 65).

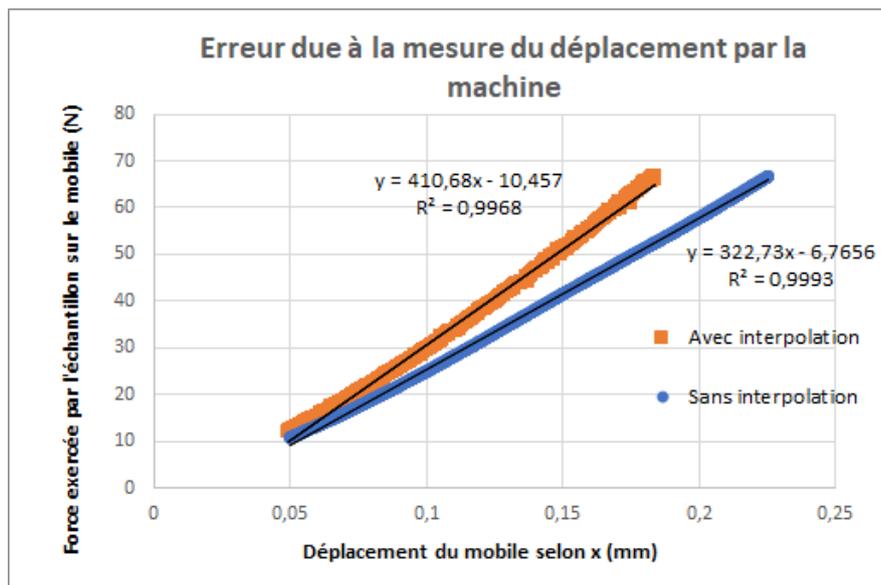


Figure 65 - Graphique obtenu pour la même série de mesure avec déplacement caméra (avec interpolation) et déplacement machine (sans interpolation)

Sans interpolation, c'est-à-dire en utilisant directement la mesure du déplacement par la machine, on obtient un module d'Young de 50 MPa. Avec, on obtient 64 MPa ce qui est plus cohérent avec la littérature ("Mémento matériaux." Serge BERTORELLO, <http://serge.bertorello.free.fr/math/formulaire/format.html>). L'interpolation permet donc d'éliminer en grande partie les erreurs présentes dans la mesure par la machine du déplacement.

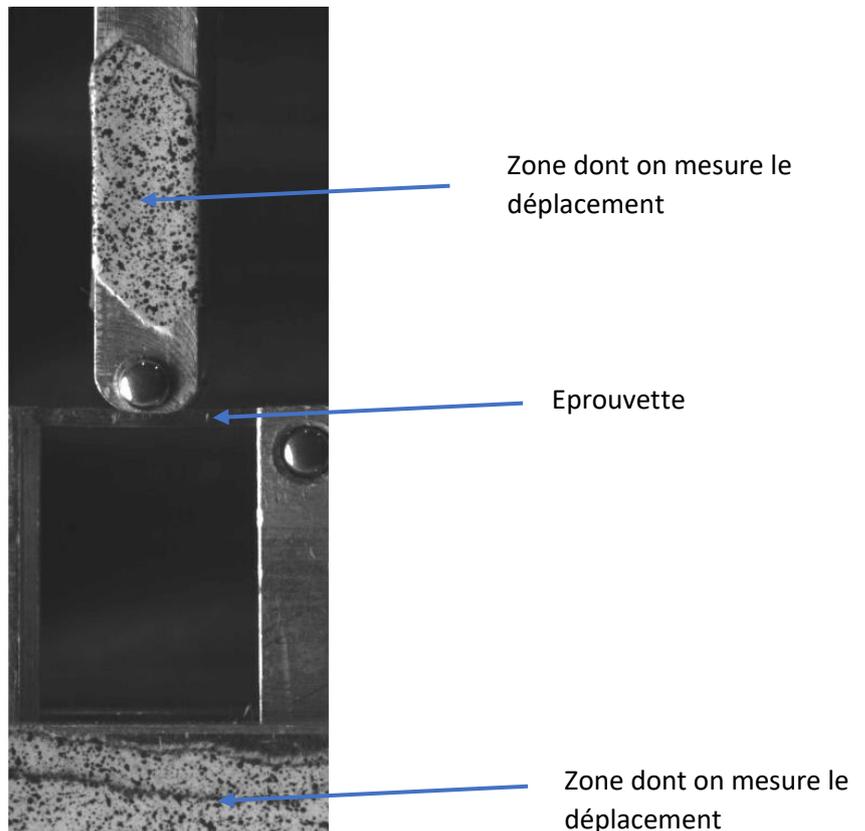


Figure 66 - Image prise par la caméra lors du test de flexion trois points

Erreur due au protocole expérimental

Pour préparer nos échantillons, nous avons dû couper les lames de verre nous même à l'aide d'une lame à pointe diamant. Toutefois, notre découpe était loin d'être parfaite : des irrégularités sur le côté de la découpe se voyaient à l'œil nu.

Pour déterminer si ces irrégularités avaient généré des micro-défauts fragilisant la structure de nos échantillons, nous avons comparé les contraintes à rupture de 2 lames, l'une découpée comme dans nos essais d'origine et l'autre non découpée, présentant à priori beaucoup moins de micro défauts.

On a alors obtenu une contrainte à rupture de 70 MPa pour la lame découpée manuellement et de 122 MPa pour l'autre. La découpe a donc eu une réelle influence sur nos résultats.

Pour résoudre ce problème, on fait l'hypothèse que la contrainte diminue du même facteur d'un échantillon à l'autre avec la découpe. On corrige ainsi les valeurs de contraintes à rupture précédentes en les multipliant toutes par 1,42.

2. Théorie de Weibull

La théorie de Weibull modélise la distribution de défauts dans un matériau selon une loi de Poisson : $P(X = k) = \frac{(\lambda V)^k}{k!} * e^{-\lambda V}$ où V est le volume de l'échantillon, un paramètre λ , k le nombre de défauts activés et X la variable aléatoire donnant le nombre de défauts activés.

On considère que le verre étant un matériau fragile, la présence d'un seul défaut activé entraîne sa rupture. On définit alors une probabilité de rupture :

$$P_F = \sum_{k=1}^{\infty} P(X = k) = 1 - P(X = 0) = 1 - e^{-\lambda V}$$

La théorie de Weibull modélise ainsi : $\lambda = \frac{\sigma^m}{V_0 \sigma_0^m}$ où m , V_0 et σ_0 sont des paramètres à déterminer expérimentalement et σ la contrainte à laquelle notre échantillon est soumis (figure 5). De plus, la théorie de Weibull fonctionnant pour une traction, dans notre cas de flexion trois points, on utilise le volume efficace défini par $V_{eff} = \frac{V}{(m+1)^2}$. On utilise alors

$P_f = 1 - \exp\left(-\frac{V_{eff} \sigma^m}{V_0 \sigma_0^m}\right)$ pour obtenir m et $V_0 \sigma_0^m$ d'où P_f , la probabilité de rupture à contrainte donnée.

On peut remonter à notre plaque de départ en changeant le volume V .

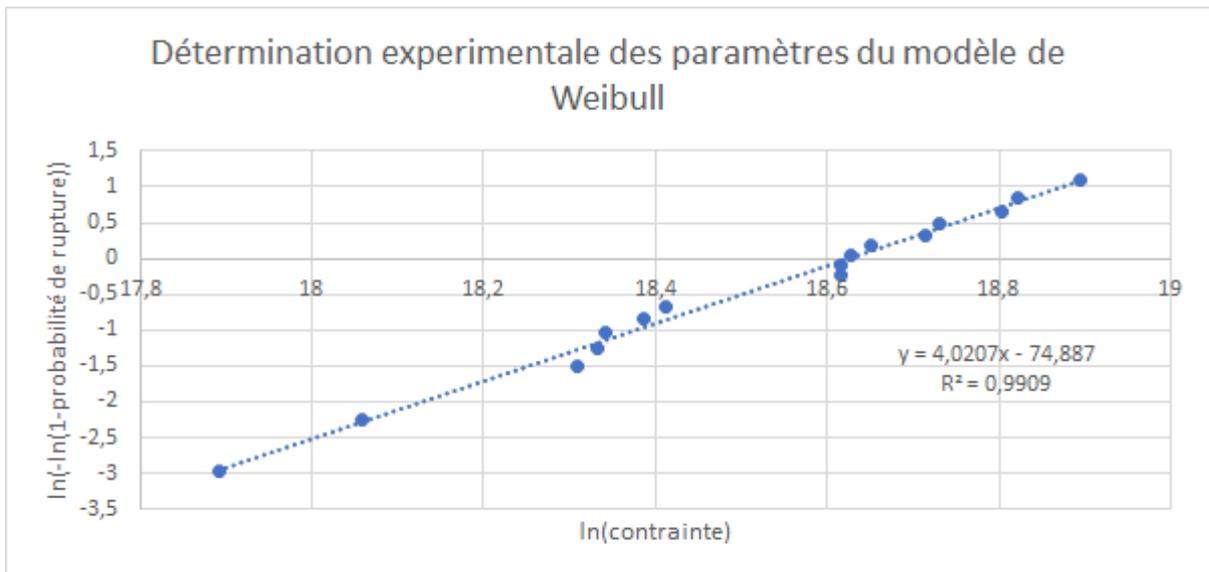


Figure 67 - Détermination des paramètres m et $V_0 \sigma_0^m$ grâce au coefficient directeur et à l'ordonnée à l'origine

3. Vérification des hypothèses par la simulation Abaqus

Nous modélisons la moitié du dispositif car il existe une symétrie au niveau du support mobile. On remarque alors qu'un gradient de contraintes apparaît dans l'épaisseur de la plaque de verre. (Figure 68)

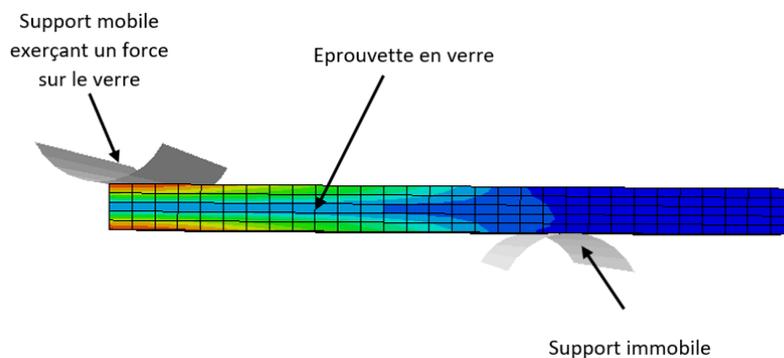


Figure 68 - Modélisation de la flexion 3 points

La simulation permet aussi de mettre en évidence les limites de la théorie des poutres aux extrémités. Les bords étant libres, la contrainte est plus faible aux extrémités qu'au centre de l'éprouvette (figure 69).

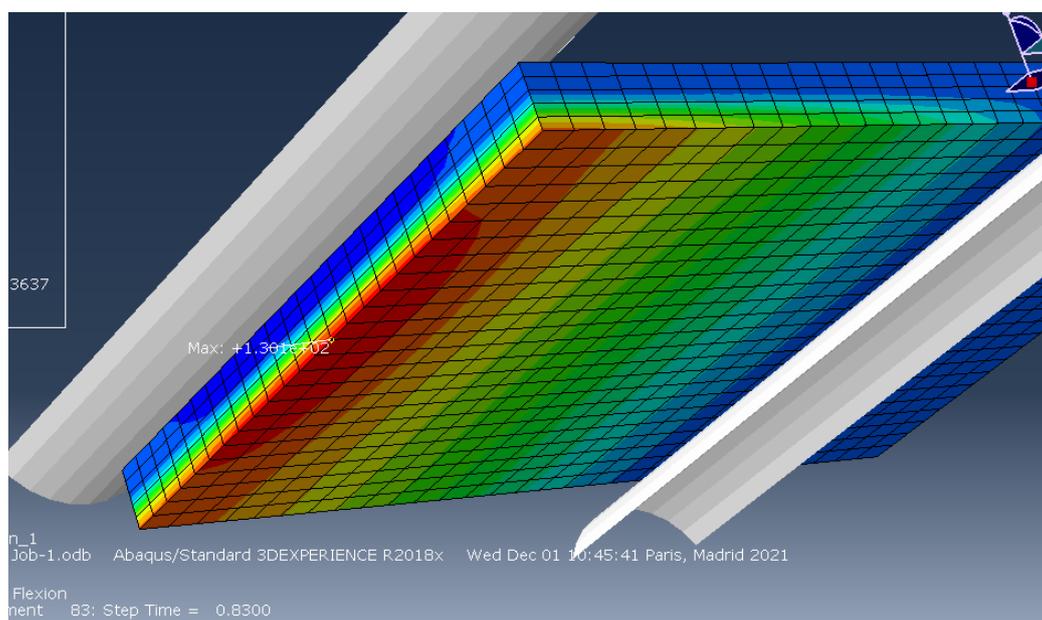


Figure 69 - Variation des contraintes sur la largeur de la plaque de verre

4. Erreur due au protocole expérimental

Pour préparer nos échantillons, on a dû couper les lames de verre nous même à l'aide d'une lame à pointe diamant. Toutefois, notre découpe était loin d'être parfaite : des irrégularités sur le côté de la découpe se voyaient à l'œil nu.

Pour déterminer si ces irrégularités avaient généré des micro-défauts fragilisant la structure de nos échantillons, on a comparé les contraintes à rupture de 2 lames, l'une découpée comme dans nos essais d'origine et l'autre non découpée, présentant à priori beaucoup moins de micro défauts.

On a alors obtenu une contrainte à rupture de 70 MPa pour la lame découpée manuellement et de 122 MPa pour l'autre. La découpe a donc eu une réelle influence sur nos résultats.

Pour résoudre ce problème, on fait l'hypothèse que la contrainte diminue du même facteur d'un échantillon à l'autre avec la découpe. On corrige ainsi les valeurs de contraintes à rupture précédentes en les multipliant toutes par 1,42. Pour avoir des valeurs plus correctes, il faudrait refaire l'expérience avec des échantillons mieux découper.

B. Simulations Abaqus

1. Processus de formage à froid dans la réalité et dans la simulation

La simulation numérique comporte trois étapes : le déplacement de la plaque de verre nue jusqu'à son rayon de courbure souhaité, l'étape de mise contact entre la plaque déformée et les couches plastiques (simulation 1) ou le cadre de renfort (simulation 2) avec une déformation du verre maintenue, suivi de l'étape de retour élastique de la plaque de verre.

La seule différence entre la simulation numérique et la réalité est dans l'étape du déplacement de la plaque. Dans la réalité, le formage à froid est réalisé en déformant une plaque de verre à l'aide d'un poinçon. Les films plastiques sont ensuite déposés sur la plaque tout juste formée à l'aide de colles dopées anti-UV, le support en ABS-PC en forme de cadre est ensuite collé par-dessus les couches de films plastiques.

Dans la simulation numérique, nous avons donné les formes finales aux différentes couches de plastique avant d'imposer un champ de déplacement à toute la face inférieure de la plaque de verre, ce qui est sans réalité physique. Cependant, puisque seuls les résultats de la simulation du retour élastique ainsi que les valeurs du champ de contraintes nous intéressent, ces résultats rendent compte de la réalité.

2. Tableau des caractéristiques physiques des matériaux utilisés lors des simulations
Les caractéristiques des matériaux utilisés sont regroupées dans le tableau 11.

matériaux	module d'Young E (en Gpa)	coefficient de Poisson ν	masse volumique (g/mm ³)	épaisseur de la plaque (en mm)
Verre "fin" Aluminosilicate	85	0,3		0,3
Verre "épais" Sodocalcite	70	0,22		1,5
Plastique TPU	1,00E-02	0,38	1,07E-03	1,3
Plastique PC	2,3	0,38	1,20E-03	0,5
Plastique ABS-PC	3	0,42	1,10E-03	entre 10 et 15

Tableau 11 - Caractéristiques physiques des matériaux utilisés lors des simulation

3. Influence de la gravité

On souhaite vérifier la pertinence de négliger le poids de la plaque dans la simulation Abaqus de formage à froid. Pour cela, on réalise une nouvelle simulation en cherchant à visualiser uniquement l'effet de la gravité sur une plaque de verre ayant les dimensions de celle qui nous intéresse.

Dans le cas où la plaque est uniquement tenue au milieu, l'effet de la gravité permet à lui seul une rupture.

En revanche, lorsque notre plaque est tenue sur les 4 côtés, le déplacement induit est très faible devant celui qu'on veut atteindre par formage (figure 70). Par conséquent, en se mettant dans ces conditions de fabrication, on arrive à éliminer quasi totalement les effets de la pesanteur.

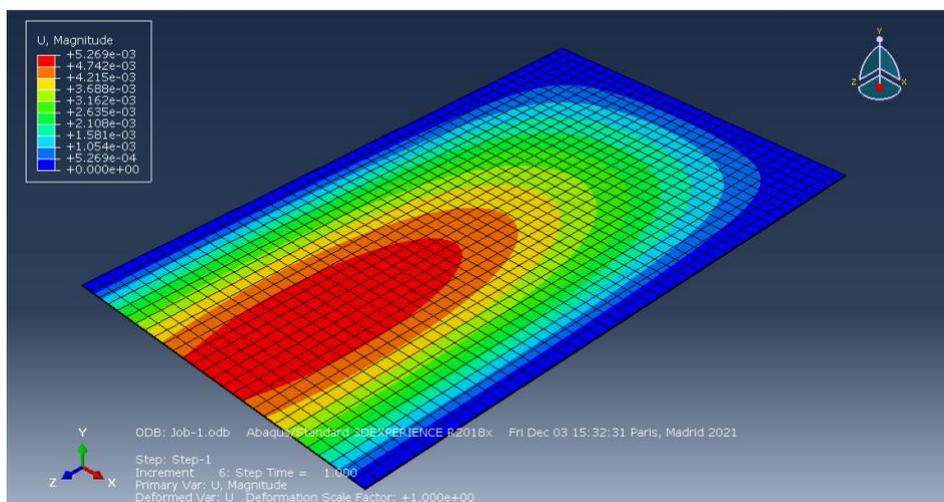


Figure 70 - Déformation de la plaque tenue sur les côtés par effet de la pesanteur

4. Influence du maillage sur les résultats de simulation

Pour les calculs en éléments finis, le maillage est une part décisive de la simulation et peut avoir des conséquences importantes sur les résultats. Plus le maillage est fin (i.e. plus on a d'éléments à simuler) et plus la précision sur les résultats est grande. Néanmoins, en faisant cela, les calculs deviennent beaucoup plus longs. Il peut alors apparaître des problèmes de divergence dans les calculs.

Lors des simulations nous avons choisi de mettre 3 éléments dans les épaisseurs des différentes couches et une taille approximative de maille de 10mm afin de réduire le temps de calcul. Il nous fallait tout de même vérifier la pertinence de nos résultats (qui sont avec 3 éléments) en effectuant des tests avec un maillage plus fin. Les résultats de ces tests sont renseignés dans le tableau 12.

Taille de maille (mm)	Nombre de point dans l'épaisseur	Contrainte (Mpa)	RE (mm)
10	3	18,53	28,15
10	5	20,06	28,82
5	5	20,43	28,95

Tableau 12 - Simulations avec différents maillages

On obtient une erreur relative de 9 % pour la contrainte, et de 2,8% pour le retour élastique. En considérant les approximations faites précédemment, nous pouvons considérer que les résultats au niveau de la contrainte, comme du retour élastique, sont tout à fait corrects pour les paramètres choisis.

5. Calcul d'un nouveau rayon de courbure pour le sur-formage

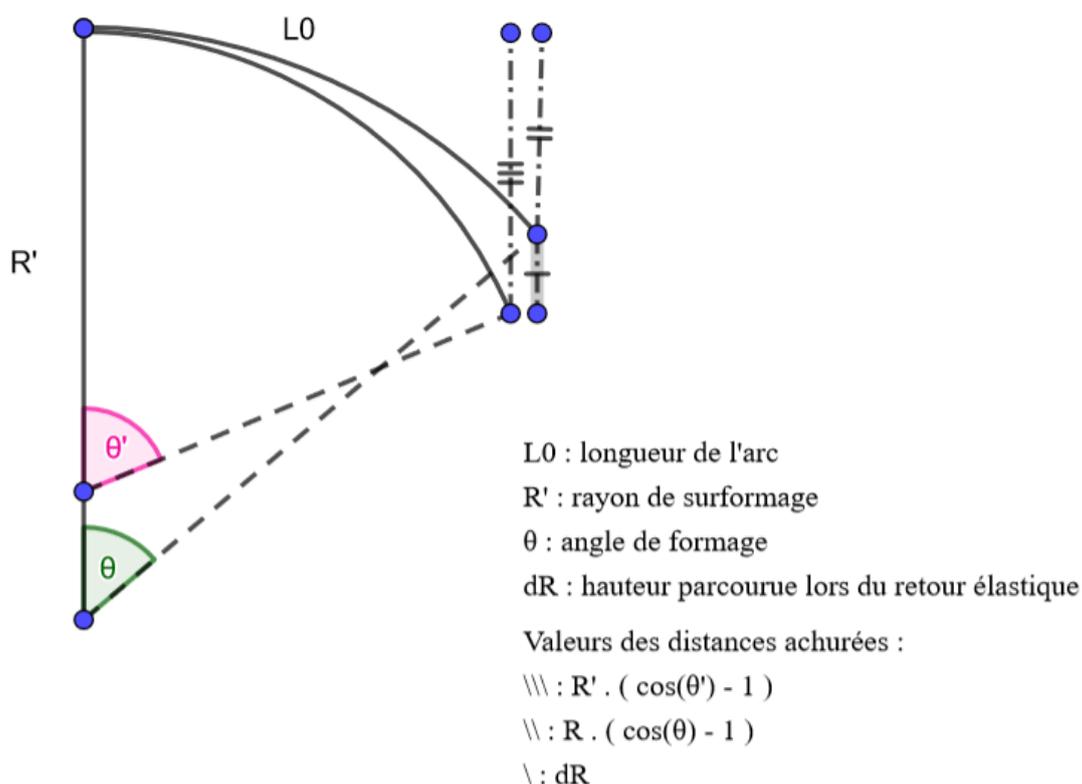


Figure 71 - Explication du calcul du nouveau rayon de courbure R' en fonction de R et du retour élastique

Du schéma 71 découle l'égalité :

$$R' * (\cos(\theta') - 1) = R * (\cos(\theta) - 1) - dR \quad (1)$$

On a de plus la relation :

$$\theta' = \frac{L0}{R'} \quad (2)$$

En injectant (2) dans (1) on obtient une équation d'inconnue R'.

Sa résolution est alors possible par une méthode numérique (par la méthode de Newton par exemple).

6. Détails de simulation Abaqus de la plaque avec support

Le logiciel Abaqus nous permet, après les calculs effectués, de visualiser les déplacements et d'avoir accès aux données que nous voulons étudier (principalement le champ de déplacement et le champ de contraintes).

La figure 72 nous montre la plaque de verre au début de la simulation. La plaque de verre n'est pas encore formée. La figure 73 nous montre la plaque de verre juste après formage : le contact verre-support est établi à cette étape. La figure 74 nous montre la plaque de verre et le support après le retour élastique, les extrémités de la plaque remontent. Le logiciel affiche à toutes les étapes le champ de contraintes (S, Mises à gauche sur les figures 72,73 et 74). Nous pouvons voir que les contraintes sont les plus importantes juste après l'étape de formage (figure 73), ce qui correspond à ce qui est attendu dans la réalité.

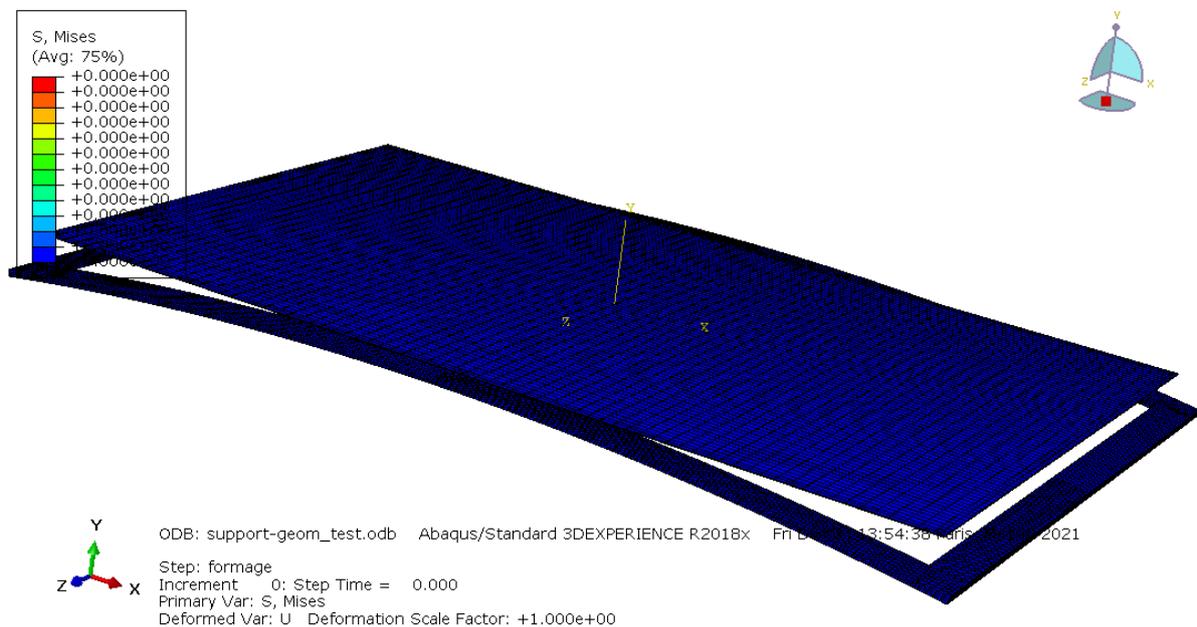


Figure 72 - Visualisation du modèle avant formage

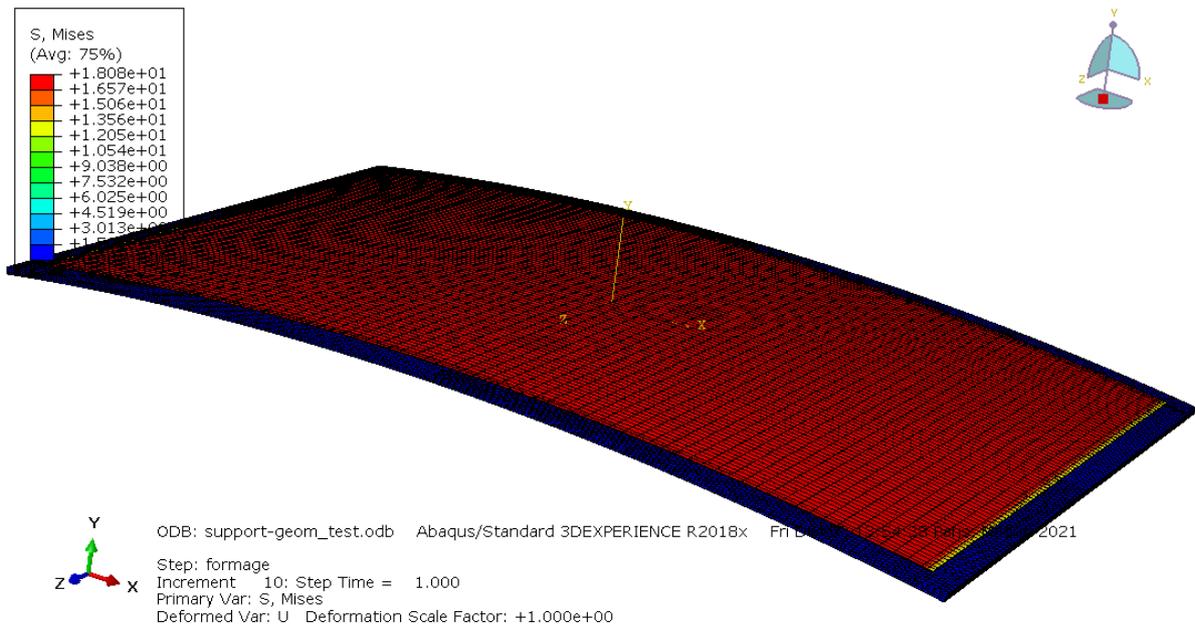


Figure 73 - Visualisation du modèle après formage au moment du contact verre-support

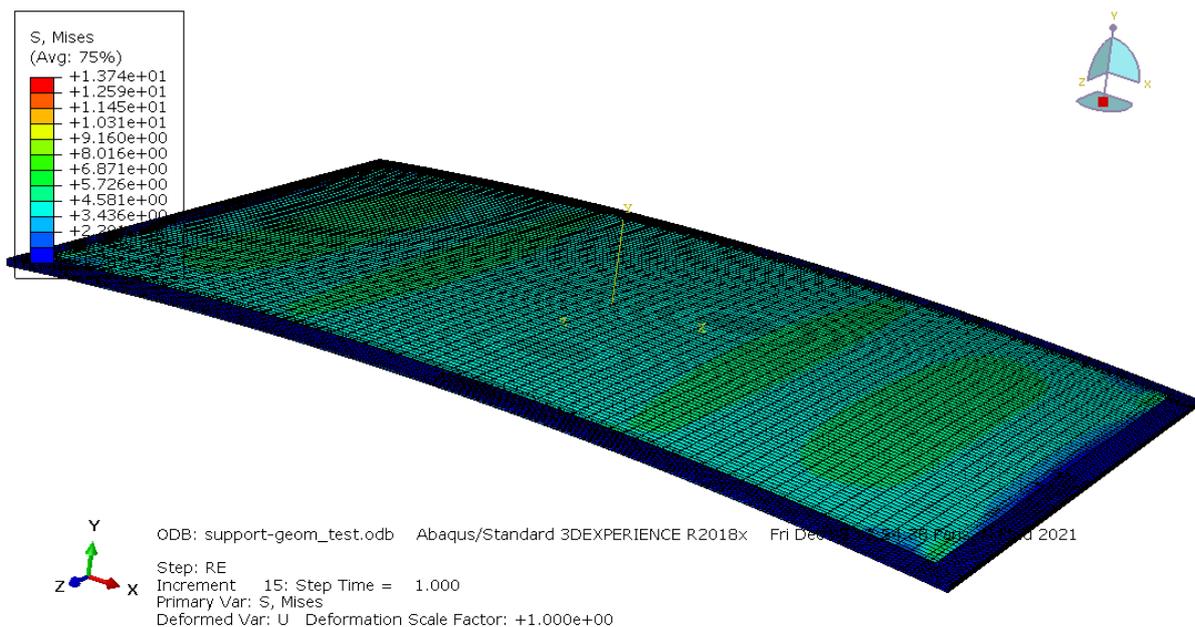


Figure 74 - Visualisation du modèle après retour élastique

7. Limiter le retour élastique avec des géométries variables

1. Influence du moment quadratique

Lorsqu'une poutre, au comportement élastique, est soumise à un chargement qui provoque une flexion, son axe neutre se déplace par rapport à sa position d'origine. Ce déplacement est appelé flèche de poutre. La théorie des poutres nous donne les liens entre moment quadratique, module d'Young, dimensions de la poutre, force et flèche maximale. En fonction du type de flexion (3 points, 4 points, poutre console, etc.), quelques coefficients peuvent changer, mais nous avons la formule suivante :

$$\Delta_{max} = \frac{P * L^3}{k * E * I}$$

Avec Δ_{max} la flèche maximale, P l'effort appliqué lors de la flexion, L la longueur de la poutre (ou la plaque), E le module d'Young, I le moment quadratique et k un facteur.

Cela veut dire que pour un effort fixé, le fait d'augmenter le module d'Young ou d'augmenter le moment quadratique engendre une flèche plus petite et donc a tendance à rigidifier la poutre (ou dans notre cas le support). Ainsi, en augmentant le moment quadratique, on diminue le retour élastique.

2. Les différentes géométries de support simulées

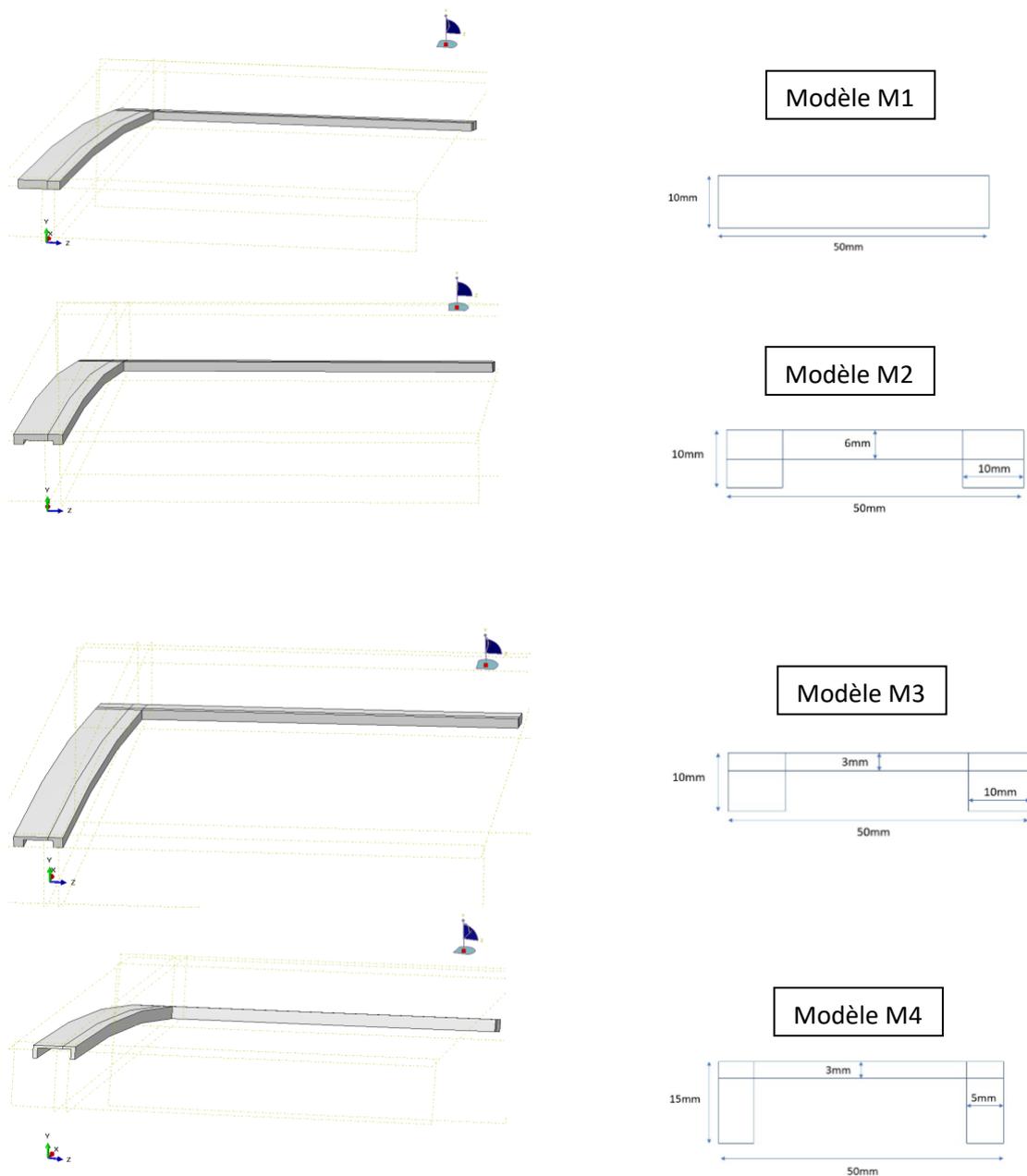


Figure 75 - Les 4 modèles de support simulés

C. Analyse de cycle de vie relative au formage à froid

On veut déterminer les quantités de matières mobilisées et la quantité de CO2 émises directement par le chauffage du verre lors d'un formage à chaud.

1. Calcul de la quantité de gaz mobilisé pour le chauffage et émissions dues à la combustion

Système thermodynamique fermé :

Etat initial : Une plaque de verre de taille $1405 * 830 * 0.5 \text{ mm}^3$ de température initiale $T_i = 30^\circ\text{C}$

Etat final (formage à chaud) : La plaque de verre à la température finale $T_f = 600^\circ\text{C}$

Bilan d'énergie du premier principe de la thermodynamique:

$$\Delta U + \Delta Em = Q + W$$

$$\Delta U = Q$$

$$m * c_m * \Delta T = Q$$

Avec :

- $m = \rho * V = 1.5 \text{ kg}$ (masse de verre)

- $c_m = 720 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ (capacité thermique massique)

- ΔT (différence de température entre l'état initial et final, soit ici 570 K)

D'où, dans notre cas :

Formage à chaud : $\Delta U = 6.1 * 10^2 \text{ J} = 1.7 * 10^{-4} \text{ kWh}$

Pour ce qui est des usines françaises, notre correspondante chez Verallia nous a indiqué qu'au moment du formage, on utilisait des brûleurs à gaz (très répandu) ou de l'électricité (encore rare). Nous avons donc pris l'hypothèse d'un chauffage au gaz.

Et sachant que l'on a, pour le gaz naturel un contenu énergétique d'environ $9 - 12.5 \text{ kWh/m}^3$ et des émissions directes correspondant à $443 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$, on déduit les chiffres suivants (tableau 13) :

Pour une plaque de verre	Formage à chaud	Formage à froid
Quantité de gaz naturel brûlé (en m ³)	1.5×10^5	0
Quantité de CO2 émis par combustion (en kg)	7.0×10^6	0

Tableau 13 - Quantité de gaz naturel brûlé durant le formage et émissions de CO2 associées

2. Calcul des quantités de plastique mobilisées pour chaque formage

Les quantités de plastique mobilisées sont regroupées dans le tableau 14.

Matériaux	Formage à chaud	Formage à froid
PC	0	7 x 10 ⁻¹ kg
TPU	2.24 x 10 ⁻¹ kg	2.24 x 10 ⁻¹ kg
ABS	0	1.43 x 10 kg

Tableau 14 - Quantité de plastique utilisées pour chaque formage

3. Exploitation de la base de données

Avec les données de la base de données et les calculs précédents, on trouve les émissions de dioxyde de carbone de nos différentes activités. Puis, on somme pour avoir les émissions totales :

```
#masses (en kg) et volumes (en m^3)
m_ABS = 1.43
m_PC = 7 * 10**(-1)
m_TPU = 2.24 * 10**(-1)
V_gaz_chaud = 1.5*10**(-2)

#activités
list_act1=[act for act in eidb if 'polycarbonate production' in act['name'] if 'RER' in act['location']]
list_act2=[act for act in eidb if 'polyurethane production, rigid foam' in act['name'] if 'RER' in act['location']]
list_act3=[act for act in eidb if 'crylonitrile-butadiene-styrene copolymer production' in act['name'] and 'RER' in act['location']]
gas = [act for act in eidb if 'market' in act['name'] and 'natural gas, high pressure' in act['name'] and 'FR' in act['location']]
df_impact1, DF1, DFt1, DFb1 = analyze_list_of_activities(list_act1[0], index_name = 'name')
df_impact2, DF2, DFt2, DFb2 = analyze_list_of_activities(list_act2, index_name = 'name')
df_impact3, DF3, DFt3, DFb3 = analyze_list_of_activities(list_act3, index_name = 'name')
df_impact4, DF4, DFt4, DFb4 = analyze_list_of_activities(gas, index_name = 'name')

#émissions dues à la prod des mat prem
CO2_ABS = m_ABS *float(df_impact3.loc[:,'climate change total'])
CO2_PC = m_PC *float(df_impact1.loc[:,'climate change total'])
CO2_TPU = m_TPU *float(df_impact2.loc[:,'climate change total'])
CO2_gaz_chaud = V_gaz_chaud*float(df_impact4.loc[:,'climate change total'])
CO2_gaz_froid = V_gaz_froid*float(df_impact4.loc[:,'climate change total'])

#émissions directes (combustion)
CO2_chaud = 7.5 * 10**(-2) #en kg
CO2_froid = 8.9 * 10**(-3) #en kg

#émissions totales des deux formages
CO2_tot_froid = CO2_ABS + CO2_PC + CO2_TPU + 10*CO2_froid + 10*CO2_gaz_froid
CO2_tot_chaud = CO2_TPU + 10*CO2_chaud + 10*CO2_gaz_chaud
```

D’où les émissions de CO2 résultantes suivantes pour un rendement de 100 % , regroupées dans le tableau 15 :

	Formage à chaud	Formage à froid
Production Gaz naturel (en kgCO2eq)	7.5*10 ⁻²	0
Combustion Gaz naturel (en kgCO2eq)	7.3*10 ⁻³	0
Plastiques (en kgCO2eq)	1.1	14
Total Emissions (en kgCO2eq)	1.1	14

Tableau 15 – Empreinte carbone totale du formage pour un rendement de 100% lors du chauffage

D'où les émissions de CO2 résultantes suivantes pour un rendement de 10 %, regroupées dans le tableau 16 :

	Formage à chaud	Formage à froid
Production Gaz naturel (en kgCO2eq)	$7.5 \cdot 10^{-1}$	0
Combustion Gaz naturel (en kgCO2eq)	$7.3 \cdot 10^{-2}$	0
Plastiques (en kgCO2eq)	1.1	14
Total Emissions (en kgCO2eq)	1.9	14

Tableau 16 – Empreinte carbone totale du formage pour un rendement de 10% lors du chauffage