

# Mini-projet 1

Kataevskii Mikhail, Ahrend Laurentin-Wilhelm, Garcia Harlouchet Ivan,  
Galliot Noémie, Duhautois Lucas

27 novembre 2024

## 1 Présentation

Le verre est un matériau d'avenir, recyclable à l'infini, mais sa production reste encore très polluante, notamment à cause de l'eau utilisée pour refroidir les systèmes et l'énergie dépensée pour chauffer les fours qui servent à la fusion du verre. De plus, les minéraux présent dans la composition initiale du verre relâchent du  $CO_2$  lors de leur fusion.

De nombreuses pistes pour pallier à ce problème sont envisagées par les fabricant, comme augmenter la proportion de calcin (verre recyclé) dans les préparations initiales, ou encore passer de fours à gaz à des fours électriques ; mais les progrès faits sont encore loin d'être satisfaisant.

Le but de ce mini-projet est donc d'étudier une manière de réduire les émissions lors de la fabrication du verre. Pour cela, nous nous sommes concentrés sur la température de fusion de ce dernier. En effet, abaisser la température de fusion du verre signifie abaisser l'énergie nécessaire à sa fabrication. Cela permettrait aux entreprises de réaliser des économies d'énergies tout en diminuant leurs émissions. Cependant, le verre ainsi obtenu doit répondre au cahier des charges des entreprises et ne pas perdre en propriétés telles que sa dureté, sa flexibilité ou encore son élasticité.

Afin de répondre à cette problématique, nous disposons d'une base de données *Intergrad* regroupant les compositions et les propriétés de plusieurs centaines de milliers de verres.

Notre objectif est de développer un algorithme génétique exploitant cette base de données afin de trouver une composition de verre qui permet de minimiser la température de fusion tout en conservant les propriétés exigées. La composition ainsi obtenue sera utilisée pour créer notre propre verre, sur lequel nous pourrions expérimenter afin de tester ses capacités.

## 2 Utilisation d'un algorithme de Deep Learning

### 2.1 Les propriétés recherchées

Nous disposons de plusieurs modèles entraînés sur la base de données *Intergrad* qui permettent de prédire les propriétés du verre à partir de sa composition. Nous cherchons à déterminer un verre dont les fractions molaires vérifient :

- $0.3 < x_{Si} < 0.75$
- $0.1 < x_{Na_2O} < 0.29$
- $x_{CaO} < 0.35$
- $x_{Al_2O_3} < 0.23$

Nous cherchons à obtenir un verre qui possède les propriétés suivantes :

- $1200^\circ C < T_m < 1300^\circ C$
- $2300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} < \rho < 2800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- $500^\circ C < T_g < 600^\circ C$
- $70 < E < 90$

Pour fabriquer le verre nous avons accès aux composants suivantes :  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $ZnO$ ,  $TiO_2$

## 2.2 Optimisation à partir de composants de base

Nous avons d'abord cherché une composition optimale en se limitant aux 3 composants de base qu'on retrouve dans la plupart de verres :  $SiO_2$ ,  $Na_2O$  et  $CaO$ . Pour cela on a modifié la fonction de tirage au sort afin de se limiter aux mélanges de ces 3 éléments. On a ensuite trié la liste de compositions possibles afin de trouver celle qui correspond le mieux à nos exigences.

## 2.3 Elaboration d'un aglorithme génétique

# 3 Fonte d'un premier verre

## 3.1 Composition

En analysant les bases de données fournies par nos encadrants et celles sur InterGlad, nous avons déterminé une première composition de verre, à l'aide uniquement de  $SiO_2$ , de  $CaO$  et de  $Na_2O$ , dont la température de fusion prédite est comprise entre 1200°C et 1300°C. Cette composition molaire est la suivante :

- 65,4 % de  $SiO_2$
- 11,3 % de  $CaO$
- 23,3 % de  $Na_2O$

Cette composition est très proche de celle utilisée par les égyptiens il y a plus de 2500 ans, d'après les écrits de la bibliothèque du roi Assurbanipal (70 % de  $SiO_2$ , 10 % de  $CaO$ , 20% de  $Na_2O$ ), car le verre est connu depuis très longtemps et sa composition a peu varié.

En effet, un verre est composé des trois éléments principaux :

- un formateur : Le formateur de verre forme la structure du verre. Il s'agit ici de  $SiO_2$ .
- Un fondant : Les fondants permettent la réduction de la température de fusion du verre en rompant certaines liaisons entre les molécules du formateur. Il s'agit ici de  $Na_2O$
- Un ou plusieurs modificateur(s) de réseaux : Les modificateurs de réseaux permettent d'améliorer les propriétés du verre telles que la durabilité chimique ou mécanique. Il s'agit ici de  $CaO$ .

Les trois composants utilisés pour cette première compositions sont les composants les plus classiques, du fait de leurs rôles respectifs dans la formation du verre, il n'est pas étonnant de retrouver une composition similaire à celle utilisée il y a déjà plusieurs milliers d'années.

Par la suite, nous tenterons d'élaborer un verre plus compliqué, notamment à l'aide d'ajouts d'oxydes de minéraux.

## 3.2 Fusion du mélange

Les proportions citées ci-dessus ont ensuite été converties en proportions massiques, afin de réaliser le mélange à l'aide d'une balance de précision. Après homogénéisation, le mélange est introduit dans un creuset, lui-même inséré dans un support, avant d'être mis dans un four électrique. Le support du creuset a été taillé dans du graphite afin d'avoir la même taille que ce dernier et ainsi permettre une meilleure prise pour la pince à la sortie du four.

Le protocole de fusion du verre est donné en annexe. Pour des raisons techniques de taille du creuset, la fonte est réalisée en deux parties. Une première partie du mélange est fondue puis une deuxième partie du mélange est réintroduite dans le liquide, et la fusion se poursuit.

Le liquide obtenu est ensuite coulé dans un moule en acier rectangulaire. Le verre ainsi obtenu est laissé à refroidir à l'air libre.

Toutes les manipulations en contact direct avec le four à de très hautes températures ont été réalisées par Franck Pigeonneau et Cristophe Prady, à l'aide d'équipements de protections contre ces températures.

## 3.3 Recuisson du verre

Le verre obtenu a été refroidi à température ambiante. Cependant, ce refroidissement a donc été inhomogène, plus rapide à l'extérieur qu'à l'intérieur. Cela a induit des contraintes, fragilisant le verre.

Pour pallier à ce problème, le verre est donc recuit. Il est enfourné dans un four dont la température est celle de sa transition vitreuse, soit environ 500°C. Le four est éteint et laissé à refroidir petit à petit avec le verre à l'intérieur. Cette étape permet la suppression des contraintes.

## 4 Annexe mini-projet 1

### 4.1 Protocole de fusion du verre

Lors de la fusion du verre, nous avons suivis le protocole suivant :

- Préparation de la composition
- Enfournement d'une première partie du mélange vitrifiable
- Montée en température du four à 900°C
- Palier de 30 minutes
- Montée en température du four à  $T_m$  en 60 minutes
- Maintien de la température pendant 1h
- Enfournement du reste de la composition
- Remise en température à  $T_m$  pour 1h
- Coulée du verre dans un moule