

# Mini-projet 1

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

2 décembre 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 fabriquants, 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 *Interglad* 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. En effet, si il existe de nombreux algorithmes visant à prédire les propriétés du verre à partir de sa composition, il n'en existe pas qui permette de prédire une composition optimale à partir de propriétés spécifiques.

La composition ainsi obtenue sera utilisée pour créer notre propre verre, sur lequel nous pourrons 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 *Interglad* 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 que l'on retrouve dans la plupart de verres :  $SiO_2$ ,  $NaO_2$  et  $CaO$ . Pour cela nous avons modifié la fonction de tirage au sort pour se limiter aux mélanges de ces 3 éléments. Nous avons ensuite trié la liste de compositions obtenues afin de trouver celle qui correspond le mieux à nos exigences.

La composition obtenue a été utilisée pour la première fusion du verre.

## 2.3 Elaboration d'un algorithme génétique

# 3 Fonte d'un premier verre

Dans la suite, on réfèrera à ce verre comme le verre 0.

## 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  $Na_2O$ . Cette composition molaire est la suivante :

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

Les propriétés de ce verre prédictes par la base de données sont les suivantes :

- Température de fusion :  $T_m = 1258^\circ C$
- Température de transition vitreuse :  $T_g = 502^\circ C$
- Module de Young :  $E = 73,6$
- Masse volumique :  $2,57 g/cm^3$

Cette composition est très proche de celle utilisée par les égyptiens il y a plus de 2500 ans, connue grâce aux 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 composition sont les composants les plus classiques, du fait de leurs rôles respectifs dans la formation du verre. Il n'est donc 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 complexe, 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, de modèle RHF 14/15 (voir en annexe ses capacités). Le support du creuset a été taillé 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 fondu 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 toute la nuit avec le verre à l'intérieur. Cette étape permet la suppression des contraintes.

Nous avons ainsi obtenu notre premier verre.



FIGURE 1 – photographie au microscope optique du verre issu de la première fusion

### 3.4 Analyse des propriétés du verre

#### 3.4.1 Observation des contraintes

Le verre obtenu est ensuite analysé. Il est tout d'abord exposé à de la lumière polarisante afin de vérifier si les contraintes ont bien disparue.



FIGURE 2 – observation des contraintes dans le verre à la lumière polarisée

[Commenter cette photo (je sais pas trop quoi dire... on voit des contraintes ou en n'en voit pas ?)]

### 3.4.2 Observation au microscope optique

Il est ensuite observé au microscope optique, où l'on peut voir la présence de rares infondus. Ce passage au microscope optique nous a permis également d'observer les bulles présentes dans le verre et de les compter.



FIGURE 3 – infondus observés au microscope optique



FIGURE 4 – Bulle d'air observée au microscope optique

Les bulles d'airs sont dues à la viscosité importante du verre, d'environ 1000 fois celle de l'eau lorsque le verre est en fusion. En effet, les bulles d'air sont donc piégées et s'échappent lentement. Pour un verre sans bulles, il aurait fallu maintenir la fusion pendant plus longtemps. Dans les fours industriels, le verre en fusion reste en moyenne plusieurs jours dans les fours.

### 3.4.3 Mesure de dureté et de densité

Le verre a ensuite été découpé afin de pouvoir mesurer sa dureté de Vicker et sa densité.

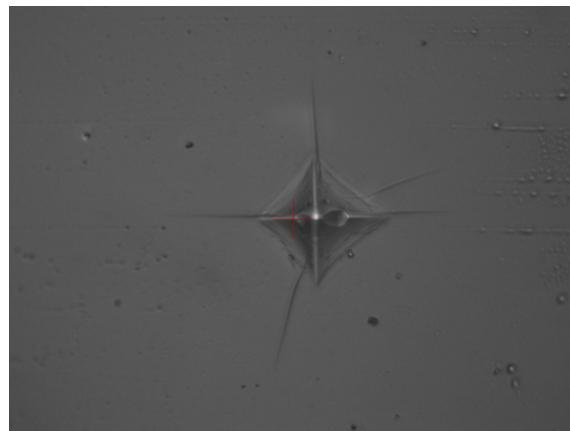


FIGURE 5 – Mesure de la dureté de Vicker

[Commenter cette photo]

La densité du verre a été mesurée à l'aide d'un densimètre, utilisant une balance de précision pour mesurer la masse et des particules fines pour mesurer le volume.

## 4 Fusion d'un verre plus complexe

Dans la suite, on réfèrera à ce verre comme le verre 1.

### 4.1 Composition

Nous avons réalisé un algorythme génétique utilisant le réseau de neurones fournis par notre encadrant afin de trouver une nouvelle composition.

— 53,4 % de  $SiO_2$

- 3,51 % de  $CaO$
- 18,7 % de  $Na_2O$
- 2,13 % de  $Al_2O_3$
- 2,65 % de  $MgO$
- 9,44 % de  $ZnO$

Les propriétés de ce verre prédictes par l'algorithme génétique sont les suivantes :

- Température de fusion :  $T_m = 1154^\circ C$
- Température de transition vitreuse :  $T_g = 563^\circ C$
- Module de Young : 81,2
- Masse volumique : 2,81  $g/cm^3$

## 4.2 Fusion du verre

Le verre est mis dans un four déjà à la température de 1200°C.

## 5 Annexe mini-projet 1

### 5.1 Protocole de fusion du verre

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

1. Préparation de la composition
2. Enfournement d'une première partie du mélange vitrifiable
3. Montée en température du four à 900°C
4. Palier de 30 minutes
5. Montée en température du four à  $T_m$  en 60 minutes
6. Maintien de la température pendant 1h
7. Enfournement du reste de la composition
8. Remise en température à  $T_m$  pour 1h
9. Coulée du verre dans un moule

### 5.2 Capacités du four électrique utilisé pour la fusion

Les informations ci-dessous ont été fournies par le fabricant (Carbolite) sur son site internet.

|   |             |
|---|-------------|
| Température maximale (°C)               | 1400        |
| Volume (L)                              | 15          |
| Temps de chauffe (min)                  | 35          |
| dimension interne HxLxP (mm)            | 220x220x310 |
| Dimension externe HxLxP (mm)            | 810x690x780 |
| Puissance max (W)                       | 10 000      |
| Puissance de maintien à température (W) | 2900        |
| Poids (kg)                              | 125         |

### 5.3 Prédiction des propriétées des verres

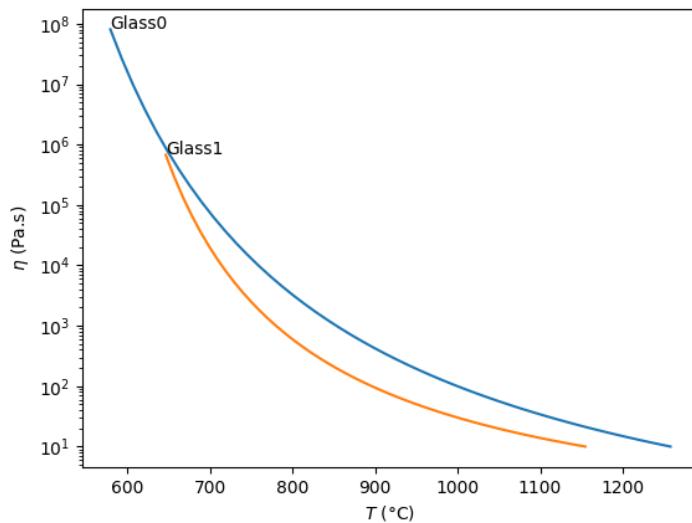


FIGURE 6 – viscosité prévue par IA en fonction de la température

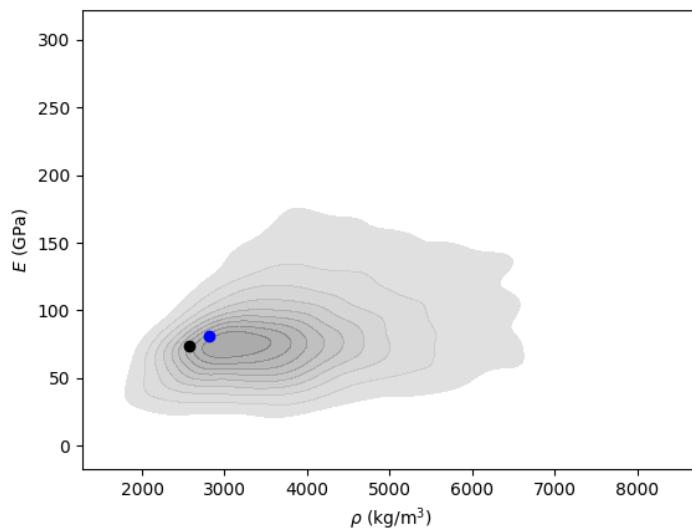


FIGURE 7 – Position prévue par IA des verres dans le plan (E,rho),  
Le verre 0 est représenté en noir, le verre 1 en bleu

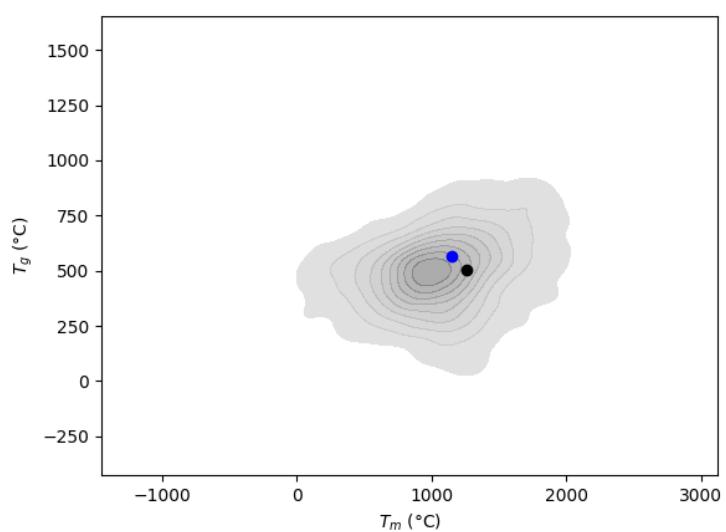


FIGURE 8 – Position prévue par IA des verres dans le plan  $(T_g, T_m)$ ,  
Le verre 0 est représenté en noir, le verre 1 en bleu