

VERRE ET MECANIQUE

ENCADREMENT PROJET

Coordinateurs : Franck Pigeonneau (CEMEF)

Encadrants : Pierre-Olivier Bouchard, Guillaume Corvec, Christophe Pradille, Morgane Rondet (CE- MEF), Wilfried Blanc, Matthieu Bellec (Int. Phys. de Nice)

Centre de recherche concerné : CEMEF

Lieux : Paris & CEMEF

RESUME

Au cours de ce MIG le métier d'ingénieur R&D en science et technique du verre sera entrevu. La première semaine sera consacrée aux bases fondamentales de l'état vitreux, aux principes de l'élaboration et à sa production à l'échelle industrielle. Des producteurs et utilisateurs de verre présenteront les enjeux techniques et économiques de la filière verre en France. Deux visites, l'une d'un centre de R&D industriel et l'autre d'une usine de production sont au programme. Les deux autres semaines seront consacrées aux mini-projets réalisés au sein du Centre de Mise en Forme des Matériaux de Sophia-Antipolis. Pour cette édition, la mécanique des verres sera développée plus en détail. La résistance mécanique de fibres de renforcement seront étudiées à l'aide de la mise au point d'expériences. La nécessité d'avoir des données matériaux sera traitée par l'utilisation de technique d'apprentissage automatique conjointement avec des bases de données.

Mots-clés : Verre, mécanique, fibre, apprentissage automatique, analyse vibratoire, thermique.

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

Il devient inutile de lister les produits de notre vie courante réalisés à base de verre. Transparent par nature, le verre est le matériau idéal pour laisser passer la lumière voire transporter de l'information à l'aide des fibres optiques. Utilisées dans les matériaux d'isolation thermique ou phonique des maisons, les fibres de verre sont employées comme renfort dans les matériaux composites. Ces fibres se différencient par leur composition et les procédés de mise en forme. La FIGURE 1 montre les photographies de trois procédés de fibrage. Au cours de ce projet, une dimension particulière à la mécanique des verres sera développée. La rupture de ce matériau sera étudiée expérimentalement. Les propriétés des verres seront également abordées à la fois en utilisant des méthodes d'apprentissage automatique. Des méthodes simples pour mesurer certaines propriétés seront également à mettre en place.

(a) Procédé TEL (laine de verre)



(b) Filière de fibres de renforcement



(c) Fibre optique



Figure 1 – Procédés de fibrage du verre (a) laine de verre, (b) fibres de renforcement et (c) fibres optique.

OBJECTIFS, TRAVAIL ET ORGANISATION

Dans un premier temps, une initiation à la science du verre et à sa production industrielle sera faite. Les bases fondamentales de l'élaboration des verres ainsi que des outils permettant de prédire la demande en énergie et la pollution seront présentes. Deux visites sont au programme, l'une dans un centre de recherche et l'autre dans une usine de production. Les deux semaines suivantes permettront de travailler sur des points spécifiques par l'intermédiaire de mini-projets permettant de renforcer les acquis de la première semaine.

Quatre mini- projets seront proposés au cours desquels des expériences et des simulations numériques seront mises en place. Le rapport à fournir pour le 22 décembre devra être rédigé dès le début du MIG. Pour le bon fonctionnement du MIG, un responsable du groupe sera nommé au lancement du cours.

PROGRAMME PREVISIONNEL

Au cours de la première semaine, des cours introductifs sur la nature particulière du verre, de son élaboration et des procédés associés seront dispensés. Les outils numériques (logiciels, base de données) seront présentés. Des séminaires donnés par des ingénieurs de l'industrie verrière agrémenteront cette première semaine. Un exposé sera également consacré aux fibres de renforcement avec une intervention d'Anne Berthereau, directrice R&D d'Owens Corning. Wilfried Blanc, directeur de recherche CNRS à l'Institut Physique de Nice, présentera les récents développements sur les fibres optiques. Xavier Capilla de l'Institut du Verre, responsable environnement pour l'industrie du Verre, présentera les enjeux environnementaux de la filière verre en France.

Un cours sur la mécanique du verre sera donné par un des plus grand spécialiste en la matière, René Gy, directeur de département à Saint-Gobain Recherche. Corinne Payen, directrice R&D de Verallia, parlera de la filière de verre d'emballage (pots et bouteilles). Deux chercheurs du CEMEF compléteront l'offre pédagogique sur des aspects plus numériques. Les deux visites prévues au programme sont détaillées plus bas. Néanmoins, il est à remarquer que la première aura lieu dès le premier jour de la période bloquée. Les deux dernières semaines de la période bloquée se dérouleront au CEMEF après un voyage en train. L'emploi du temps de la première semaine est détaillé ci-dessous :

Lundi 20 novembre		
Horaires	Intitulé	Intervenant
8h00–18h00	Visite du centre de recherche de Saint-Gobain Isover, Rantigny	
Mardi 21 novembre		
Horaires	Intitulé	Intervenant
9h00–10h00	Présentation & organisation du MIG	Franck Pigeonneau
10h00–12h00	Introduction sur les verres d'oxydes	
13h30–15h00	La R&D des fibres de renforcements	Anne Berthereau (Owens Corning)
15h30–17h00	Principe de l'élaboration des verres	Franck Pigeonneau
Mercredi 22 novembre		
Horaires	Intitulé	Intervenant
8h30–10h00	Les fibres optiques	Wilfried Blanc (Inst. Phys. de Nice)
10h30–12h00	L'industrie verrière face aux enjeux environnementaux	Xavier Capilla (Institut du verre)
13h30–15h00	Mécanique des verres	René Gy (Saint-Gobain Recherche, Paris)
15h30–17h00	Procédés de fusion	Franck Pigeonneau
Jeudi 23 novembre		
Horaires	Intitulé	Intervenant
09h00–10h30	Introduction à l'analyse numérique	Aurélien Larcher (CEMEF)
11h00–12h30	Vibration des structures	Franck Pigeonneau
13h30–17h00	Visite de l'usine SGD Pharma, Sucy-en-Brie	
Vendredi 24 novembre		
Horaires	Intitulé	Intervenant
9h00–10h30	Introduction à l'apprentissage automatique	Jonathan Viquerat (CEMEF)
11h00–12h30	Les emballages en verre	Corinne Payen (Verallia)
13h30–15h00	Formation documentaire	Sylvain Metafiot
15h30–17h00	Description des mini-projets et constitution des groupes	

LES VISITES

Deux visites sont au programme de ce MIG qui auront lieu au cours de la première semaine. Il est nécessaire d'avoir **une pièce d'identité (CNI ou passeport)** lors de ces visites sous peine de devoir rentrer à la maison ! Il est également nécessaire d'indiquer la pointure pour pouvoir prendre des équipements de sécurité. Des comptes rendus de visite seront à réaliser et à mettre dans le rapport final du MIG.

Centre de Recherche de Saint-Gobain ISOVER de Rantigny, CRIR

Saint-Gobain ISOVER est une société du groupe multinational de Saint-Gobain. Cette société produit et commercialise des matériaux pour l'isolation thermique et phonique des habitats. La R&D d'ISOVER est développée au sein des différents centres de recherche de Saint-Gobain. Le Centre de Recherche de l'Isolation de Rantigny est entièrement dédié à Saint-Gobain ISOVER. Il dispose d'installations pilote qui seront en fonctionnement lors de notre visite. Nous aurons également la visite d'installation permettant la mesure des résistances thermiques de matériaux isolants.

Figure 2 – CRIR situé à proximité de Compiègne (60, Oise).



Nous serons accueillis par Jean-Marc Flesselles qui nous fera également un exposé sur la R&D de Saint-Gobain ISOVER. Le détail de la journée sera fourni prochainement. Pour se rendre sur place, nous utiliserons le train de banlieue depuis la gare du nord pour aller jusqu'à la gare de Liancourt-Rantigny. Le reste se fait à pied (1,8 km) selon le chemin détaillé ci-dessous :

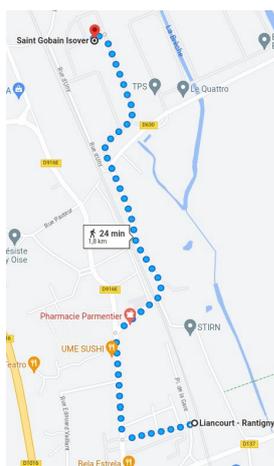


Figure 3 – Chemin pour aller de la gare de Liancourt-Rantigny au centre de recherche de l'isolation, adresse 19 rue Emile Zola, 60290 Rantigny.

SGD Pharma, Sucy-en-Brie

La société SGD Pharma produit des emballages destinés au marché pharmaceutique. Il s'agit principalement de petits contenants comme représentés sur la Figure 4. SGD Pharma dispose de trois sites industriels en France. Pour cette visite, nous irons sur celui localisé dans le Val de Marne à Sucy-en-Brie, facilement accessible en RER.

L'adresse de SGD Pharma est 4 route de Bonneuil, 94370 Sucy-en-Brie. En prenant comme point de départ, l'école des Mines, le trajet en transport en commun est le suivant :

1. RER B en direction du nord depuis le Luxembourg jusqu'à Châtelet-Les Halles ;
2. RER A, direction Boissy-Saint-Léger, de Châtelet-Les Halles à Sucy-Bonneuil ;
3. Le reste se fait à pied (450 m).
4. Nous sommes attendus à 13h30. Notre contact à l'usine sera Anne Corsini



Figure 4 – Emballages produits par SGD Pharma destinés au marché pharmaceutique.

MINI-PROJETS

L'objectif global du MIG est d'initier les élèves aux différents aspects de R&D dans le domaine particulier du verre. Le groupe sera décomposé en quatre sous-groupes en charge de projets. Des études de natures expérimentale et de modélisation seront abordées. Des points d'avancement seront réalisés avec des industriels. Les quatre mini-projets sont détaillés ci-dessous.

M.-P. 1 : Propriétés des verres en fonction de la composition chimique

Encadrants : Morgane Rondet

Les propriétés thermique, mécanique ou encore électrique dépendent principalement de la composition en oxydes du verre. Pour avoir des données sur l'ensemble des propriétés à partir d'une composition donnée, on dispose de base de données matériau. La recherche de propriétés pour une composition n'appartenant pas aux bases nécessite de faire des interpolations dans la base. Dans ce mini-projet, on mettra à profit la base de données Intergrad V8 pour mettre au point des modèles d'apprentissage automatique basés sur la construction de réseaux de neurones artificiels.

Les points développés au cours de ce mini-projet sont les suivants :

1. Développement de réseaux de neurones < naïf > utilisant la base de données ;
2. Développement de réseaux de neurones basés sur des modèles théoriques et physiques ;
3. Prédiction de propriétés mécaniques et comparaisons avec les données expérimentales du M.-P. 3.

M.-P. 2 : Fracture des fibres de verre et statistique de Weibull

Encadrants : Guillaume Corvec, Pierre-Olivier Bouchard

Les verres sont connus pour leur fragilité. Intrinsèquement, leur limite à la rupture est assez élevée. En pratique, les valeurs trouvées sont bien plus basses et également très variables. La cause est principalement liée au fait que la casse est provoquée par des défauts en surface. Il est alors plus pertinent de déterminer les probabilités de rupture. Dans ce mini-projet, on étudiera la probabilité de casse de fibres de verre, type Advantex, fournis par la société Owens Corning. De même, des expériences sur des fibres optiques dopées ou non en oxydes de terres rares seront testées.

Le mini-projet sera articulé autour des points suivants :

1. Mise au point du dispositif expérimental ;
2. Rupture de fibres uniques Advantex et détermination de la loi de probabilité de casse ;
3. Rupture de fibres Advantex longues et courtes et détermination de la loi de probabilité de casse
4. Rupture de fibres optiques longues et courtes et détermination de la loi de probabilité de casse.

Des correspondants d'Owens Corning suivront les avancées de ce travail. De même, Wilfried Blanc sera consulté pour les fibres optiques.

M.-P. 3 : Détermination du module de Young et de la dureté Vickers de verres

Encadrants : Franck Pigeonneau, Christophe Pradille

Le module de Young est l'une des propriétés mécaniques essentielles à connaître. A cause de la fragilité du verre, les techniques usuelles comme la flexion trois points ou la traction sont peu fiables. On utilisera dans ce mini-projet la mise au point d'un banc de mesure basé sur la vibration sonore de poutres. L'analyse en mode propre dépend de la vitesse du son dans un corps homogène et isotrope qui est directement liée au module de Young, E . En parallèle de cette détermination, des mesures de dureté Vickers seront réalisées. On cherchera à trouver une relation entre les deux données. Les échantillons de verre nous seront fournis par un producteur de verre de flaconnage italien, Bormioli Luigi. On cherchera à voir l'effet de la composition sur le module de Young et la dureté Vickers.

1. Mise au point d'un banc de mesure de E
2. Détermination de E et analyse des erreurs ;
3. Mesure de HV sur un micro-indenteur Vickers ;
4. Comparaison avec les prédictions du M.-P. 1.

Ce groupe correspondra avec Emanuela Fava de Bormioli Luigi.

M.-P. 4 : Chauffage par laser femto-seconde

Encadrants : Christophe Pradille, Franck Pigeonneau, Matthieu Bellec

Les fibres optiques sont utilisées pour faire des détecteurs. Pour cela, les cœurs des fibres sont dopés à l'aide d'oxydes de terres rares, Er ou La. Lors de la mise en forme de ces fibres, une séparation de phase apparaît produisant la formation de nano-particules. Lors de l'étirage, ces nano-particules s'allongent. Certaines se cassent mais d'autres restent étirées sans rompre. Pour arriver à les casser, on souhaite les chauffer à l'aide d'un laser femto-seconde. Pour vérifier le niveau de température espéré, une expérience modèle est à développer avant les tests sur les fibres. L'objectif ici est de vérifier si l'échauffement attendu est conforme au modèle théorique.

Le projet sera construit autour des étapes suivantes :

1. Modélisation théorique de la chauffe par laser ;
2. Détermination de la température maximale d'échauffement en fonction des paramètres laser (énergie et fréquence de répétition des impulsions) ;
3. Réalisation d'échantillons en verre avec introduction de thermocouples ;
4. Etude de l'échauffement avec un laser femto-seconde.

Les expériences avec le laser seront réalisées à l'Institut Physique de Nice sous la responsabilité de Matthieu Bellec. Ce groupe communiquera avec Wilfried Blanc.

DETAILS PRATIQUES POUR LES ELEVES / CONTACT(S)

La première semaine aura lieu à l'école. Les salles seront communiquées dès qu'elles auront été attribuées. Les deux semaines suivantes auront lieu au CEMEF à Sophia-Antipolis. Les élèves s'y séjourneront dans la résidence Néméa située à Sophia Antipolis. Des chambres ont été déjà réservées pour tous les élèves venant réaliser leur MIG à Sophia Antipolis. Le voyage de Paris se fera en train depuis Paris jusqu'à Antibes. Ensuite, on organisera des navettes pour conduire les élèves de la gare d'Antibes au Néméa.

Pour tous renseignements, contacter :

- **Franck Pigeonneau** : franck.pigeonneau@minesparis.psl.eu / Tel. 06 31 26 04 72.