

Un cadre d'économie circulaire pour les déchets de verre renforcé chimiquement en fin de vie

Lucas Hof¹, Sabrina Gravel², Seyed Ali Delbari¹, Emmanuel Brousseau³, Jean-Philippe Leclair¹, Guillaume Villeneuve¹

¹ Département de Génie Mécanique, École de Technologie Supérieure

² Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST)

³ Cardiff University (Royaume-Uni)

Applications du verre



Source : www.en.wikipedia.org



Source : www.istockphoto.com



Source : www.walmart.ca/



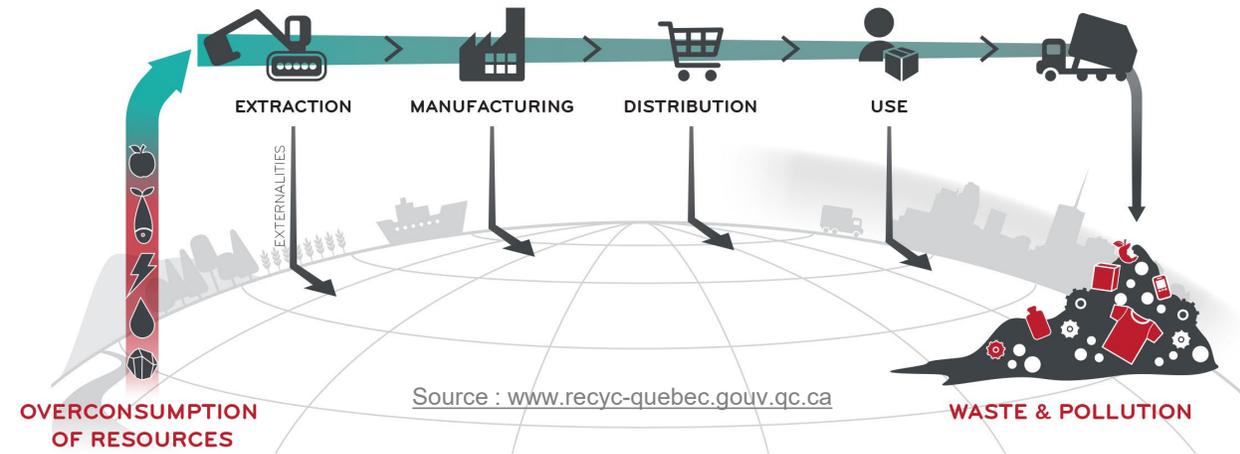
Source : www.uline.ca



Source : en.wikipedia.org

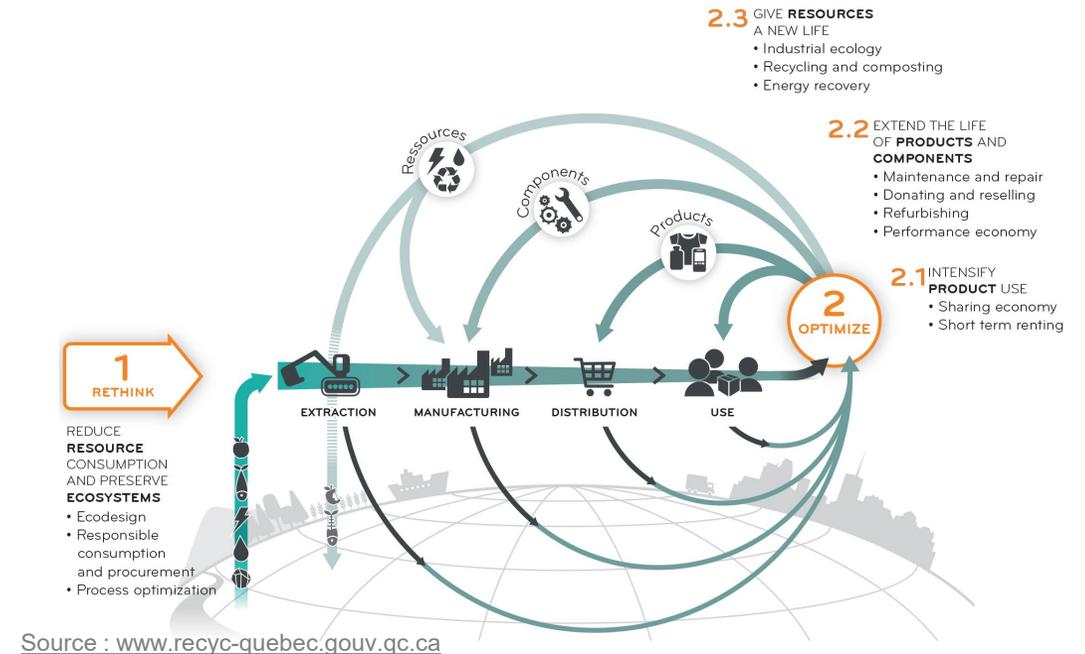
- Le verre est 100% recyclable
- Il peut être recyclé indéfiniment sans perte de qualité
- Toutefois, le modèle d'**économie linéaire** reste prédominant dans cette industrie

Économie linéaire



- Modèle économique traditionnel pour l'industrie manufacturière
- Priorité au **profit** plutôt qu'au **développement durable**

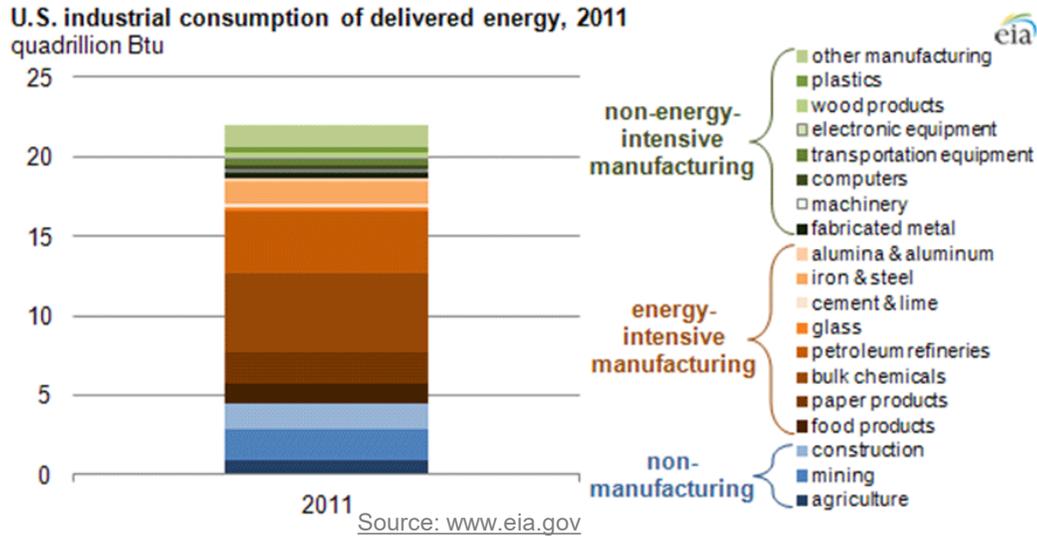
Économie circulaire (EC)



- Basé sur les 6R :

réduire, réutiliser, récupérer, reconception, refabrication, recyclage

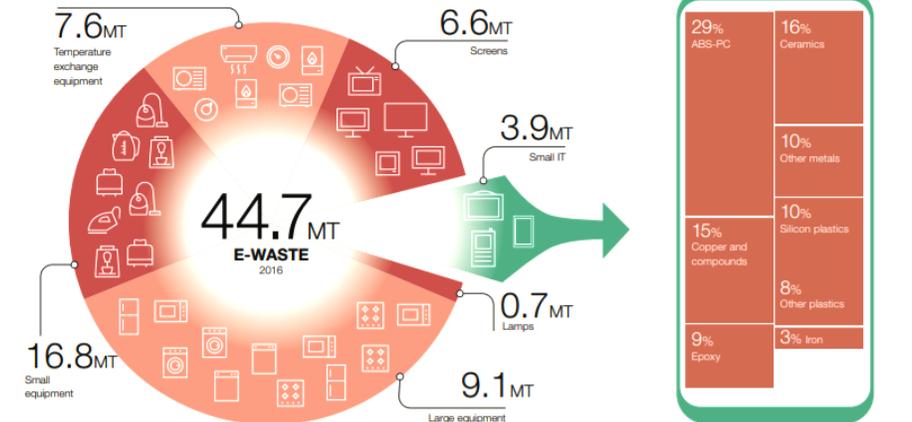
Une industrie énergivore



- L'industrie du verre est responsable d'environ **86 Mt d'émissions de CO2** (~ 0,3 % des émissions mondiales).

Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE)

WHAT IS E-WASTE?



- Production annuelle d'environ 75 Mt de DEEE d'ici 2030.
- Environ 15000 – 20000 t de déchets de verres chimiquement renforcés (CSG) par an.

Analyse du marché CSG

- Taille Marché:**

2025 : 51,1 Mds \$

2033 : > 85 Mds \$

Taux de croissance annuel : 6%

- Moteurs Clés:**

Électronique : Smartphones (durabilité, légèreté)

Automobile : Sécurité, allègement (voitures, camions, rail)

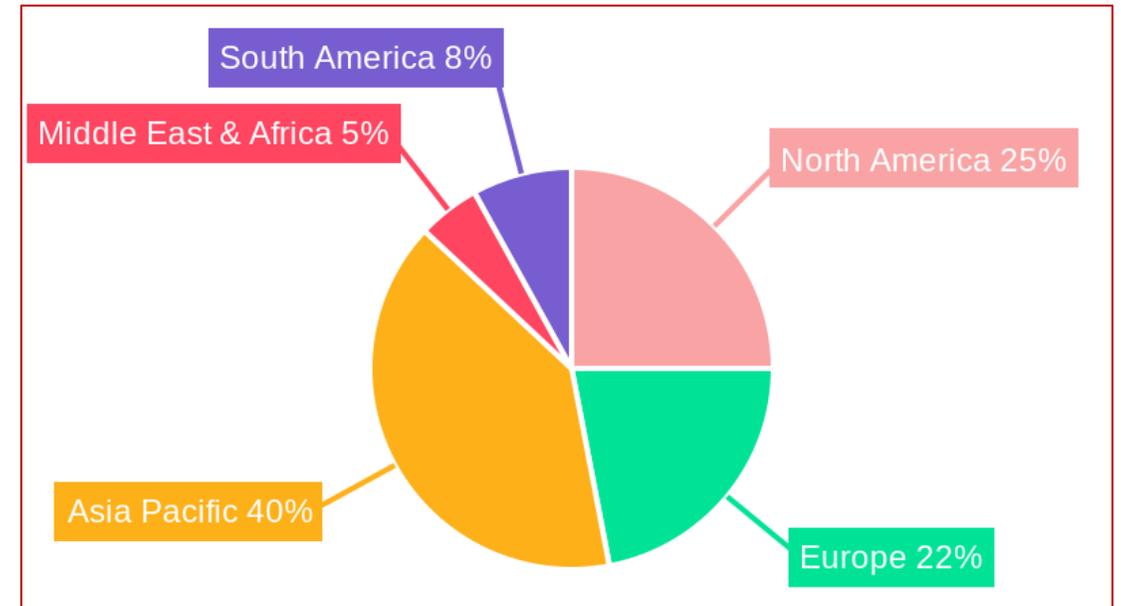
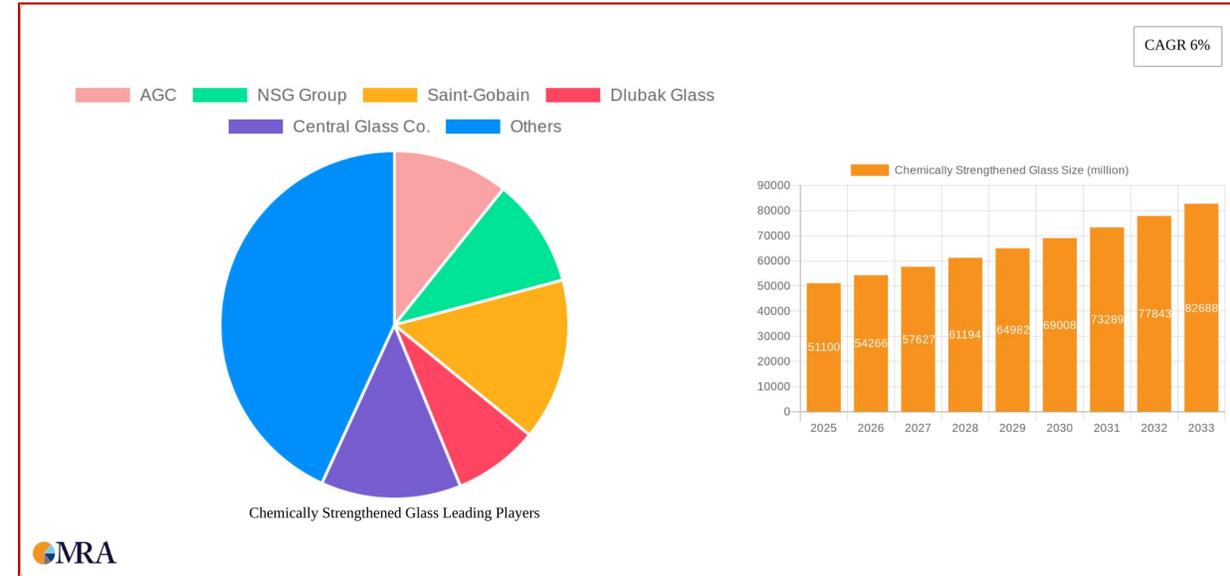
Aviation : Résistance, légèreté

- Facteurs :**

Technologie : ↓ Coûts, ↑ Efficacité

- Géographie :**

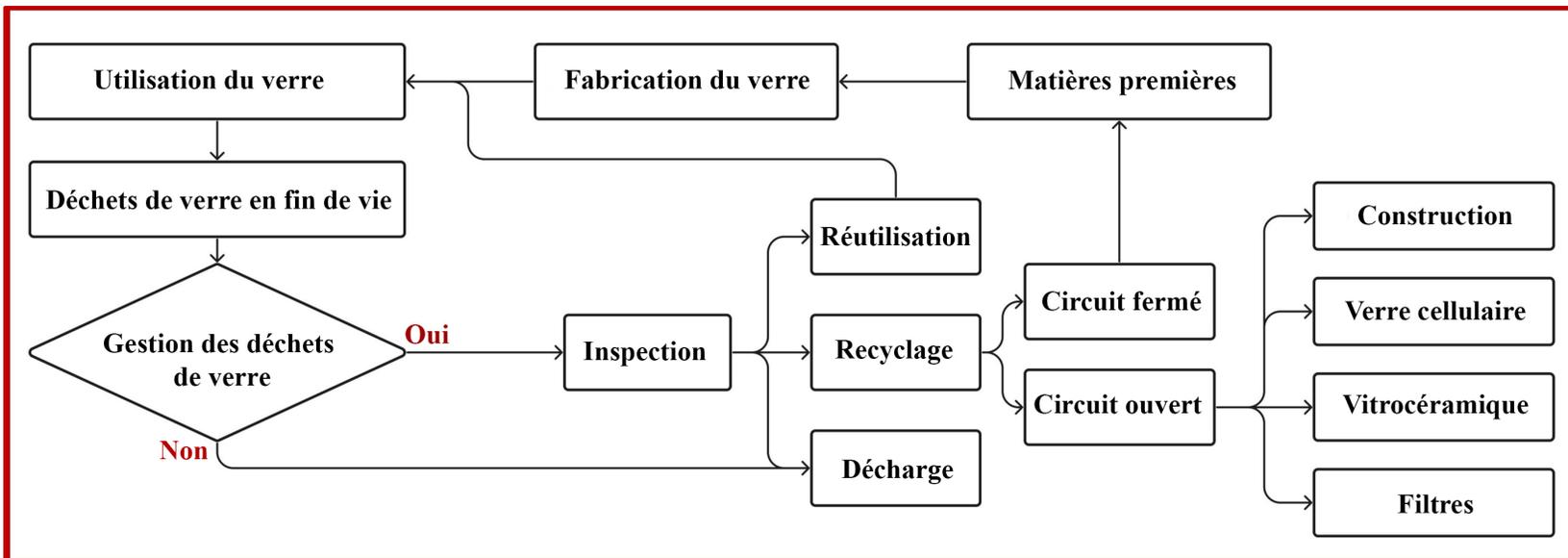
« Leaders » : Amérique du Nord & Asie-Pacifique (production, demande)



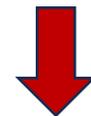
Économie circulaire du verre

- Pourquoi le verre est un **déchet complexe** à recycler :
 - Des couleurs différentes
 - Des compositions différentes
 - Différentes formes
 - Différents post-traitements

Économie circulaire du verre conventionnel



Une solution plus durable



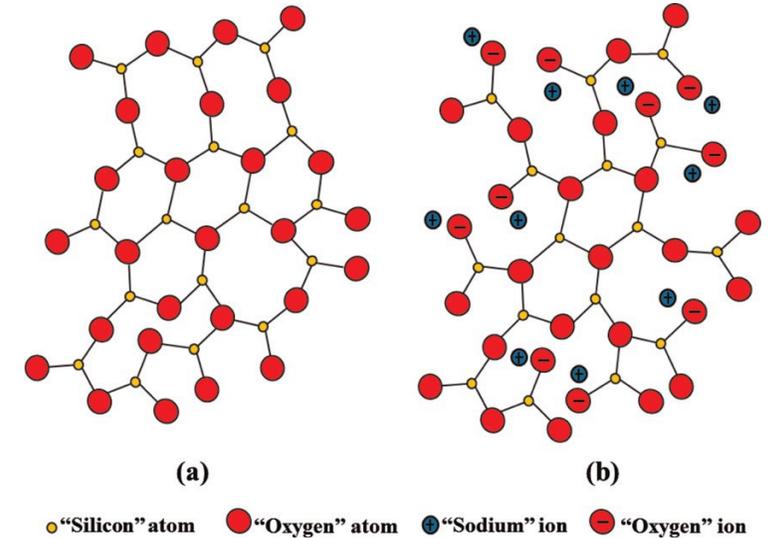
1st étape : Élargir nos connaissances sur la nature du verre

Qu'est-ce que le verre ?

- Solide amorphe sans d'ordre atomique à longue portée.
- Cette structure désordonnée résulte du refroidissement rapide d'un matériau en fusion
- Le SiO₂ est la base des verres de silice
- Des oxydes alcalins tels que Na₂O sont ajoutés au verre de silice en tant que modificateurs de réseau.

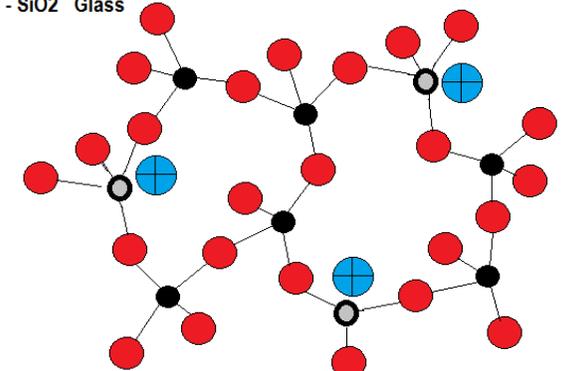
Quel est le rôle des modificateurs de réseau ?

- L'augmentation des modificateurs accroît le rapport oxygène/silicium.
- Rupture du réseau 3D et formation de liaisons oxygène non pontantes (NBO)
- Réduction de la connectivité du réseau et du point de fusion



Source : Martin, 2006

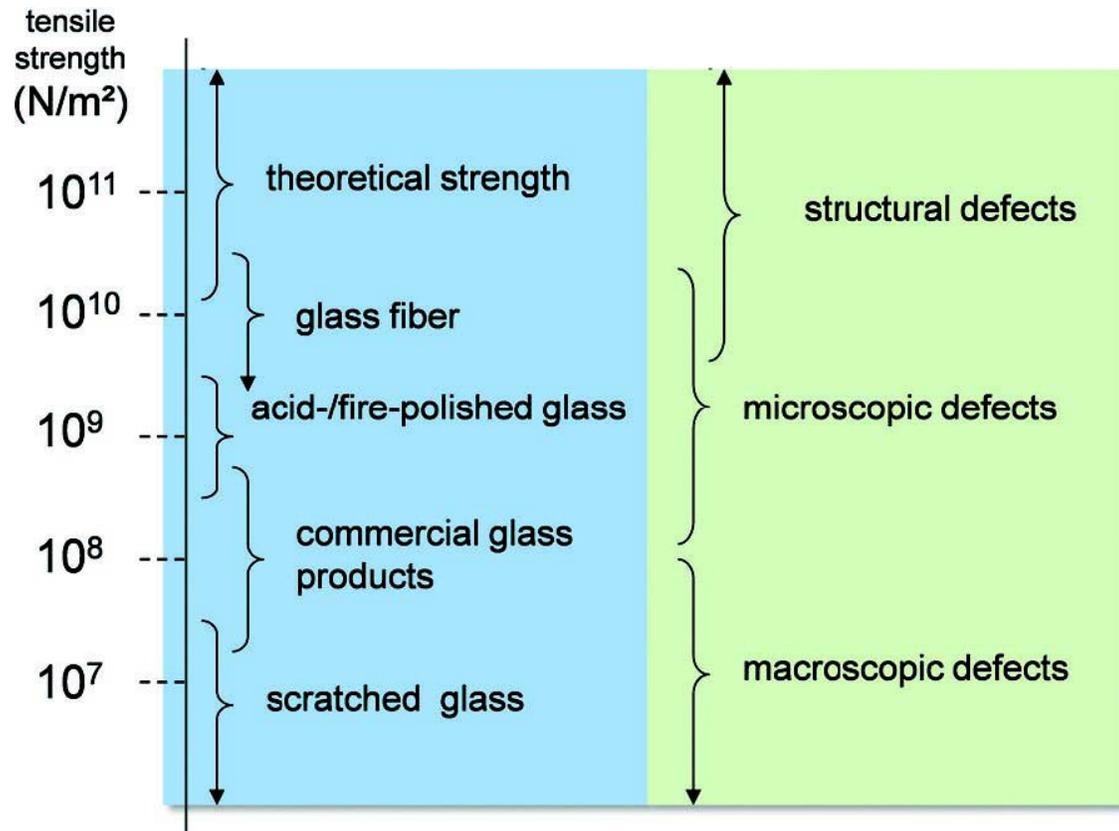
Na₂O - Al₂O₃ - SiO₂ Glass



Source: Macrelli, 2017

Principales limitations : Fragilité et défauts de surface

Problème des défauts de surface



Source : Wondraczek et al : Wondraczek et al, 2011

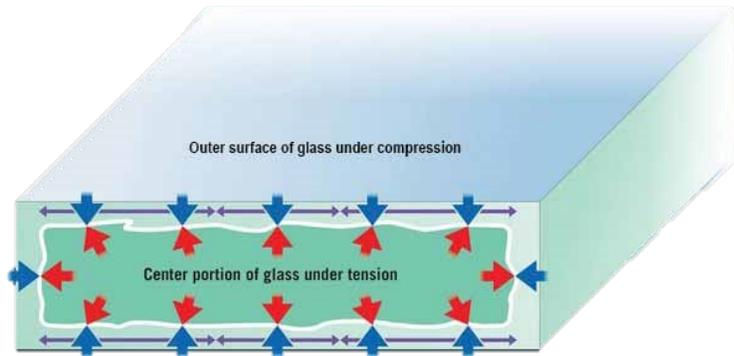
Solutions de renforcement du verre:

- Stratification avec une couche intermédiaire polymère
- Revêtements polymères
- Polissage à chaud
- **Contrainte de compression en surface**

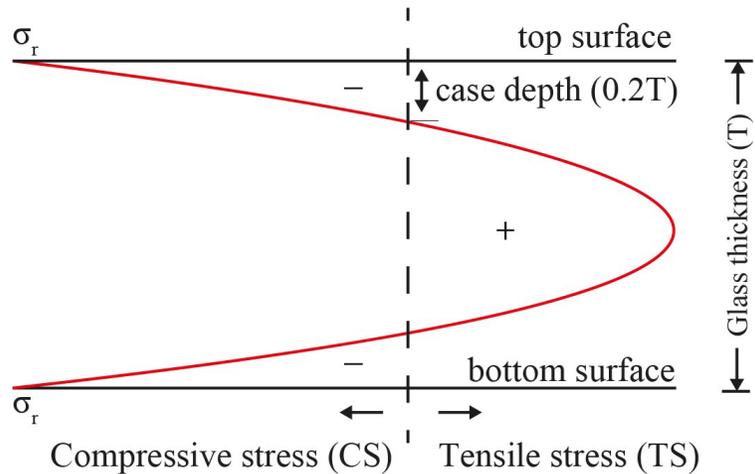


Contrainte de compression superficielle

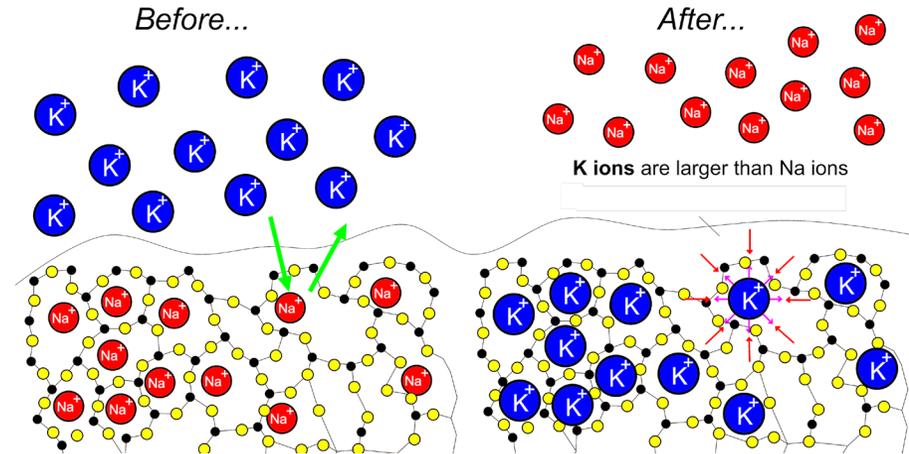
Verre trempé thermiquement



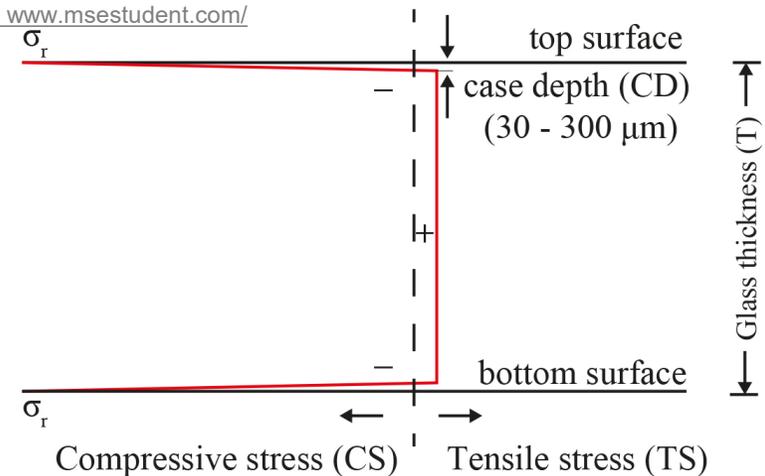
Source : www.constructionspecifier.com/



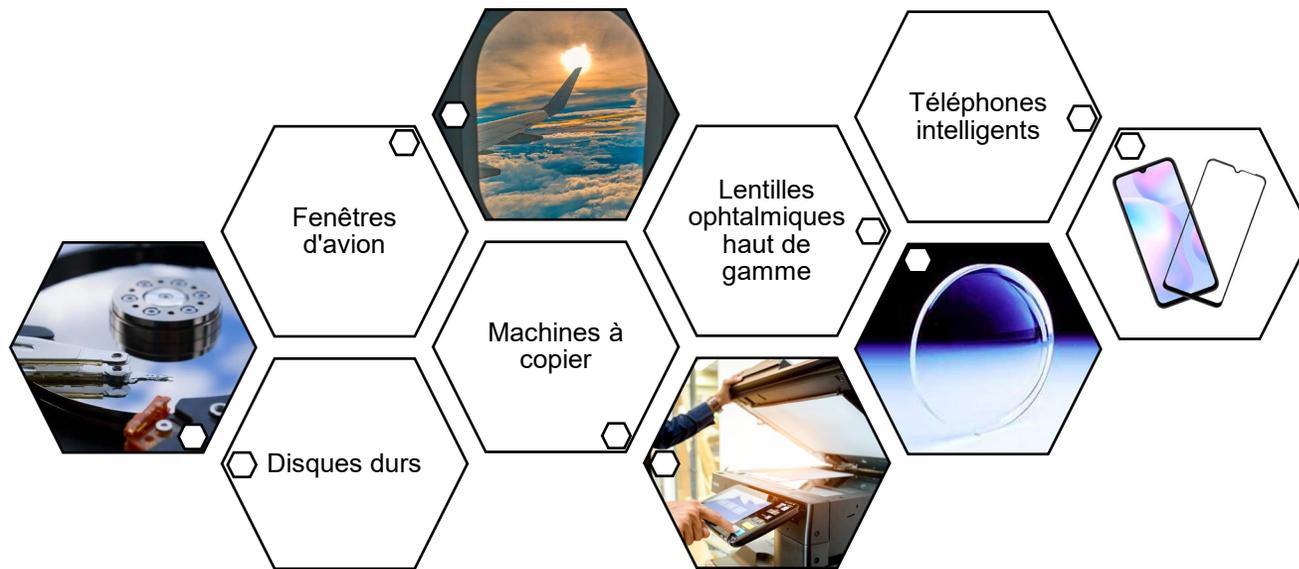
Verre renforcé chimiquement (CSG)



Source : www.msstudent.com/



Applications du verre renforcé chimiquement



Avantages

- Facile à appliquer
- Pas de distorsion optique perceptible
- Convient aux feuilles de verre ultra-minces
- Contrainte de compression très élevée

Inconvénients

- Uniquement pour le verre alcalin
- Coûteux
- Une profondeur de contrainte relativement faible
- **La question des déchets**

CORNING

AGC

SCHOTT
glass made of ideas



GLASS FOR FUTURE
Nippon Electric Glass

15000 – 20000 t de déchets de CSG par an

Définition du projet

Une économie circulaire réalisable pour CSG en fin de vie

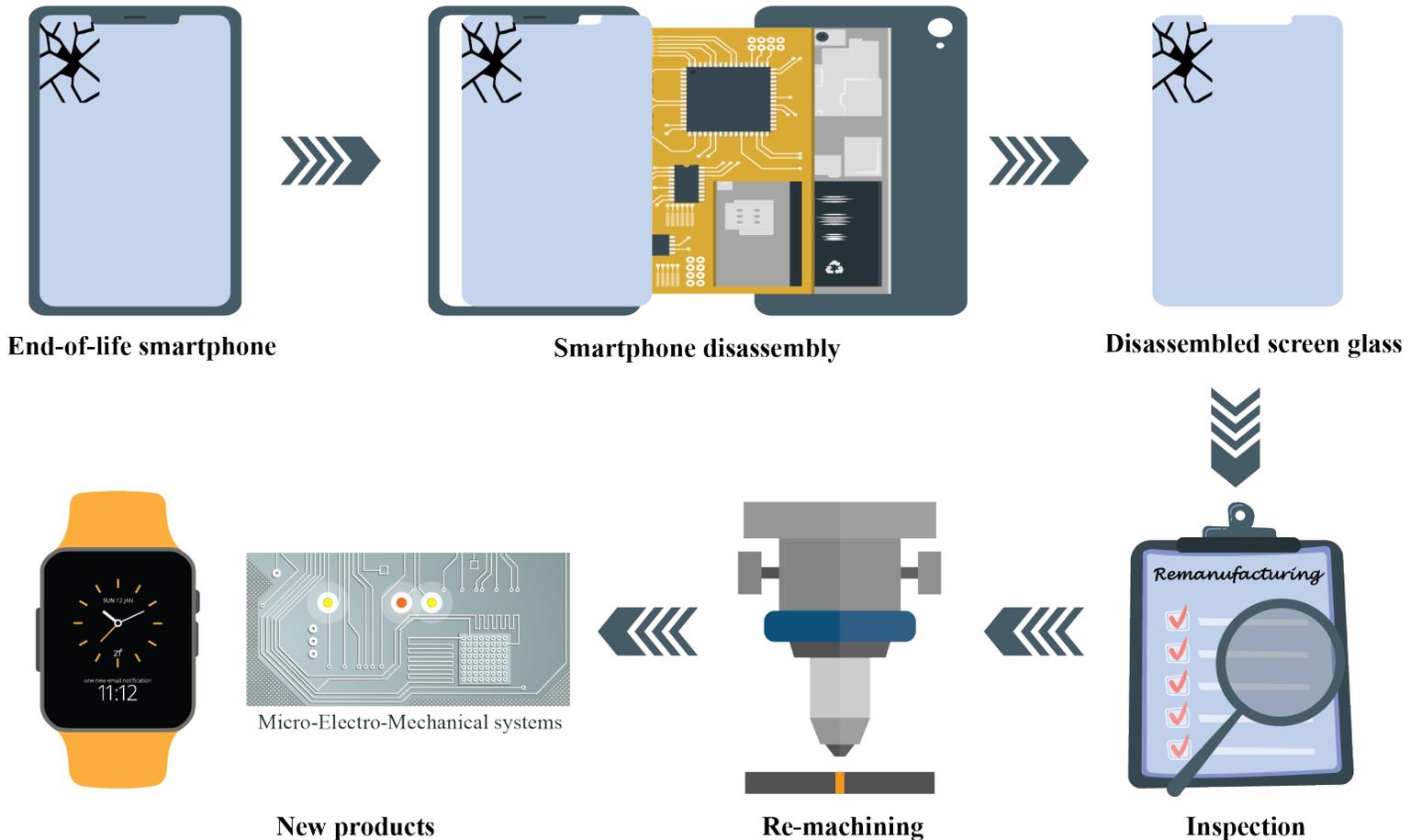
L'importance du projet

Les CSG sont coûteux et possèdent d'excellentes caractéristiques.

Ils finissent dans des décharges après leur durée de vie utile.

Leur reconditionnement est difficile en raison de leur dureté élevée et de la contrainte de compression de leur surface.

Les techniques d'usinage conventionnelles aboutissent souvent à des arêtes de coupe de mauvaise qualité et/ou à des pièces défectueuses.

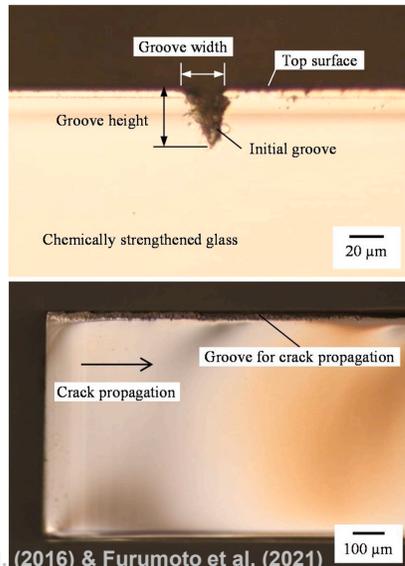


Revue de la littérature

Tentatives précédentes d'usinage de CSG

Laser

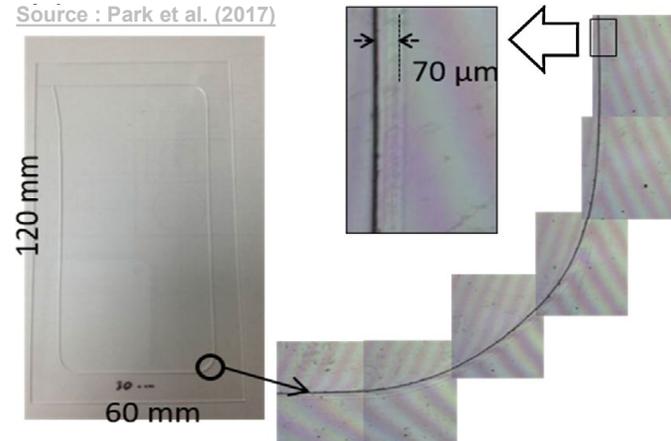
- Création d'une rainure préfabriquée sur la surface du verre pour guider la fissuration.
- Fissuration du verre par l'application d'un choc thermique à l'aide d'un laser.



Laser

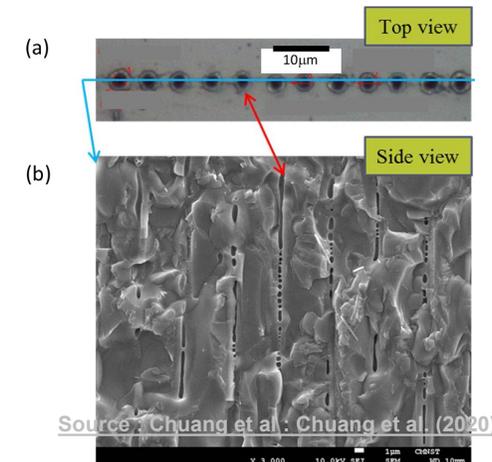
- La fissuration du verre par la fusion et la solidification du verre en un point focal, induisant ainsi une contrainte de traction autour de ce point.
- Guidage de la fissure en déplaçant le laser le long d'une trajectoire souhaitée.

Source : Park et al. (2017)



Laser

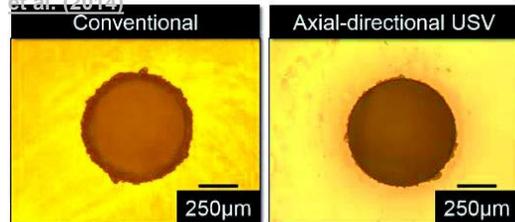
- Création de micro-tranchées sur la surface du verre pour guider la fissuration.
- Chauffer le verre à 200-250 °C.
- Trempe avec des jets de CHF₃ à -80 °C pour induire un choc thermique et des fissures.



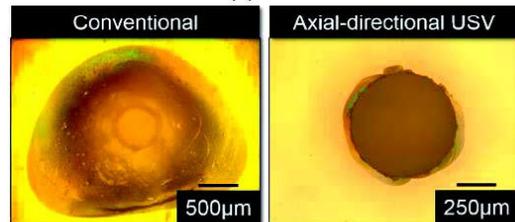
Fraisage hélicoïdal assisté par ultrasons

- L'utilisation du fraisage hélicoïdal assisté par ultrasons et vibrations pour créer des micro-trous traversants a permis d'améliorer la précision de l'usinage, de minimiser l'écaillage et de réduire l'usure de l'outil.

Source : Noma et al. : Noma et al. (2014)



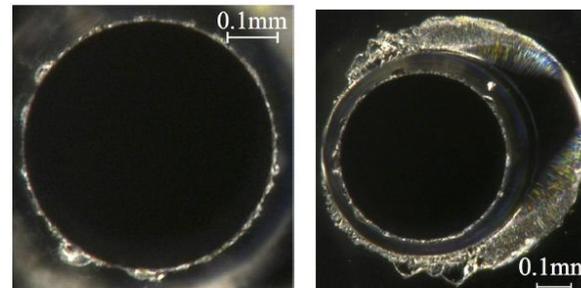
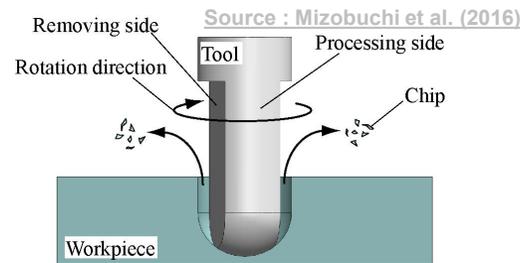
(a) Inlet



(b) Outlet

Forage au diamant

- Conception d'un outil diamanté électrodéposé pour améliorer les performances et la qualité des forages CSG.
- Amélioration de l'éjection des copeaux pendant le perçage grâce à l'enlèvement partiel des côtés de l'outil cylindrique.



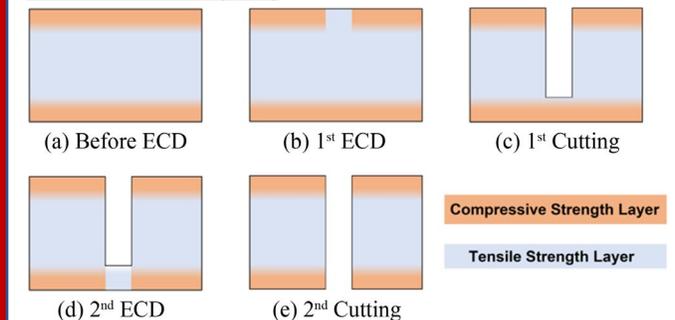
(a) Inlet side

(b) Outlet side

DPE + broyage

- Inverser l'échange d'ions sur la surface supérieure en utilisant un processus de décharge électrochimique (ECD).
- Meulage jusqu'à la couche de contrainte de compression inférieure.
- Un deuxième processus ECD pour éliminer la couche de contrainte de compression inférieure.
- Un processus de meulage final.

Source : Kim et al. (2024)



Lacunes/défis

Récapitulatif de la littérature

- Mauvaise qualité de coupe/fraisage des arêtes.
- Éclats importants, surtout du côté de la sortie.
- Qualité imprévisible de la surface de rupture lors de l'utilisation de techniques de rupture contrôlée.
- L'usure des outils et, par conséquent, les frais de révision élevés dans l'usinage à l'aide d'outils.
- Techniques d'échange d'ions inversé qui prennent du temps.
- Difficultés liées à l'usinage de formes complexes avec les techniques les plus anciennes.
- Risque de défaillance aléatoire des pièces (rupture) dans toutes les techniques.

Solution proposée SACE / ECDM

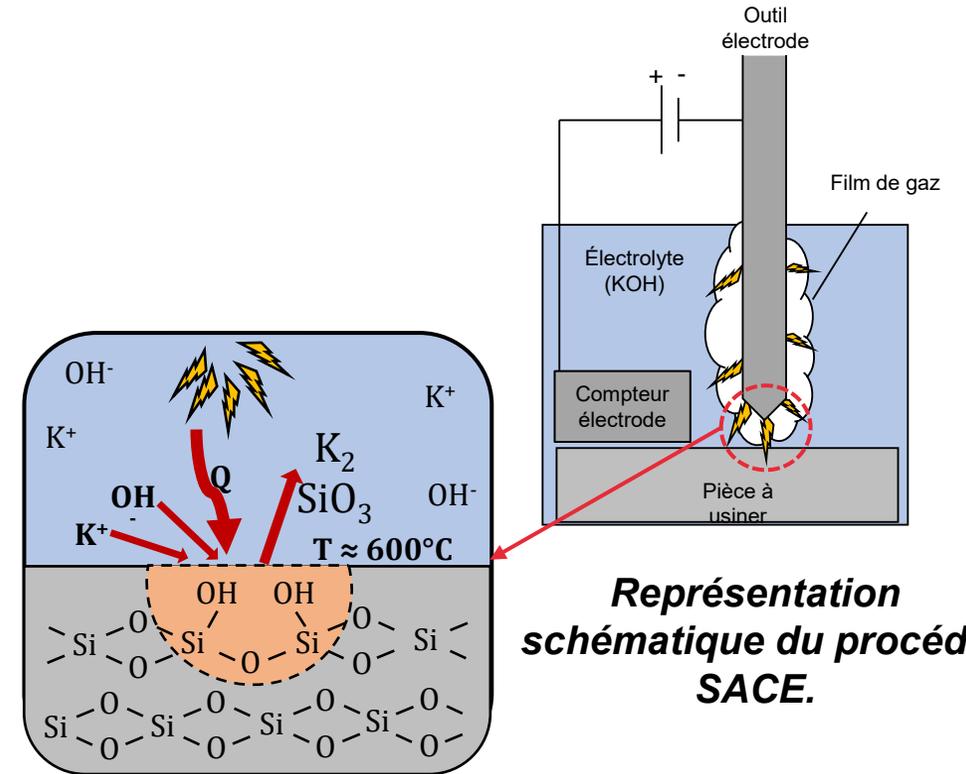
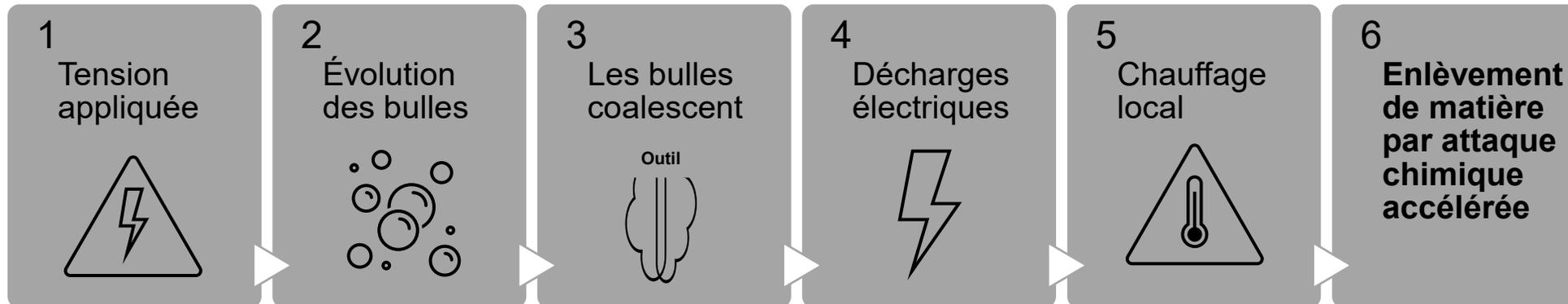
Qu'est-ce que la gravure chimique assistée par étincelle (SACE) ?

SACE est un procédé d'usinage thermo-chimique hybride.

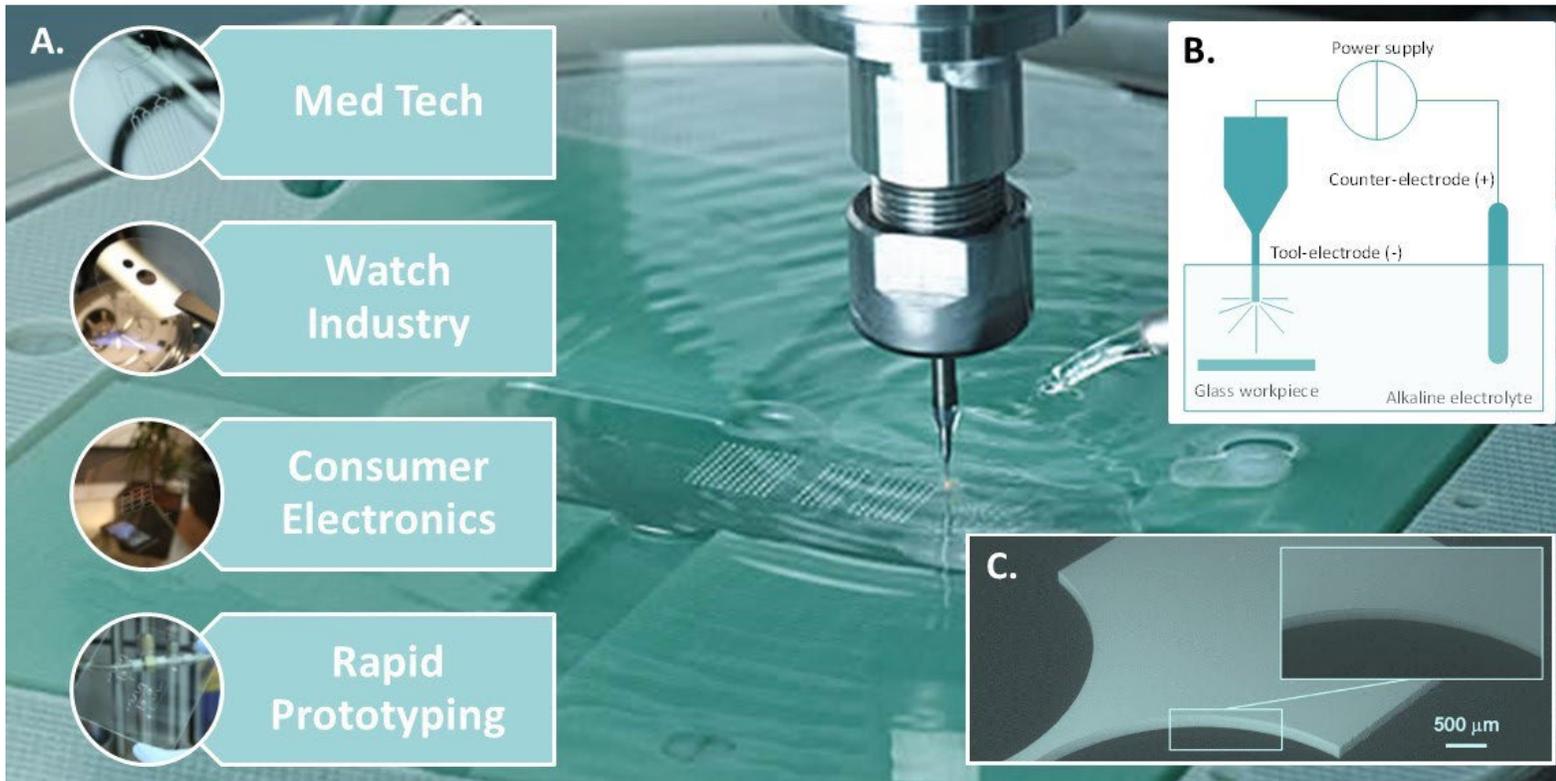
Il combine des décharges électriques et une attaque chimique pour usiner des matériaux non conducteurs comme le verre.

Le SACE est également appelé ECDM (usinage par décharges électrochimiques).

Mécanisme du procédé SACE :



Applications SACE et machine commerciale Posalux SA



Source: Hof, 2018



Source: www.posalux.com/

Conclusion

- **Le défi:** La réintégration des déchets de CSG, difficiles à retraiter, est un obstacle majeur à l'économie circulaire.
- **Cadre de solution proposé:** nous proposons une voie circulaire : CSG en fin de vie → démantèlement → ré-usinage par SACE → nouveaux produits à haute valeur ajoutée.
- **SACE est la clé:** La gravure chimique assistée par étincelle (SACE) est identifiée comme la technologie essentielle permettant l'étape de ré-usinage dans ce cadre.
- **Processus optimisé et efficace:** Le SACE offre un processus 'lean' et précis, capable d'usiner efficacement les déchets de CSG, surmontant les limites des méthodes conventionnelles.
- **Valorisation des déchets:** Ce cadre, basé sur le SACE, permet la transformation des déchets de CSG en ressources valorisables, fermant ainsi la boucle matière.
- **Vers une circularité réelle:** la mise en œuvre de cette voie de ré-usinage par SACE rend possible une véritable économie circulaire pour le verre renforcé chimiquement.



Réseau de recherche
en économie circulaire
du Québec

Fonds
de recherche

Québec 



Laboratoire de
Fabrication
Intelligente &
Circulaire

LFIC Laboratory of
Intelligent &
Circular
Manufacturing

ÉCOLE DE
TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE
Université du Québec

ÉTS
Le génie pour l'industrie

Merci pour votre attention!

Questions?

Lucas.hof@etsmtl.ca

Seyed-ali.delbari.1@ens.etsmtl.ca



Grands partenaires



Partenaire des activités scientifiques

