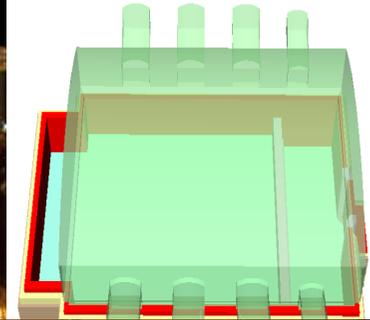


Fours Industriels conventionnels

J.M. Combes
Saint-Gobain Conceptions Verrières

Ecole GDR, 01 Avril 2015



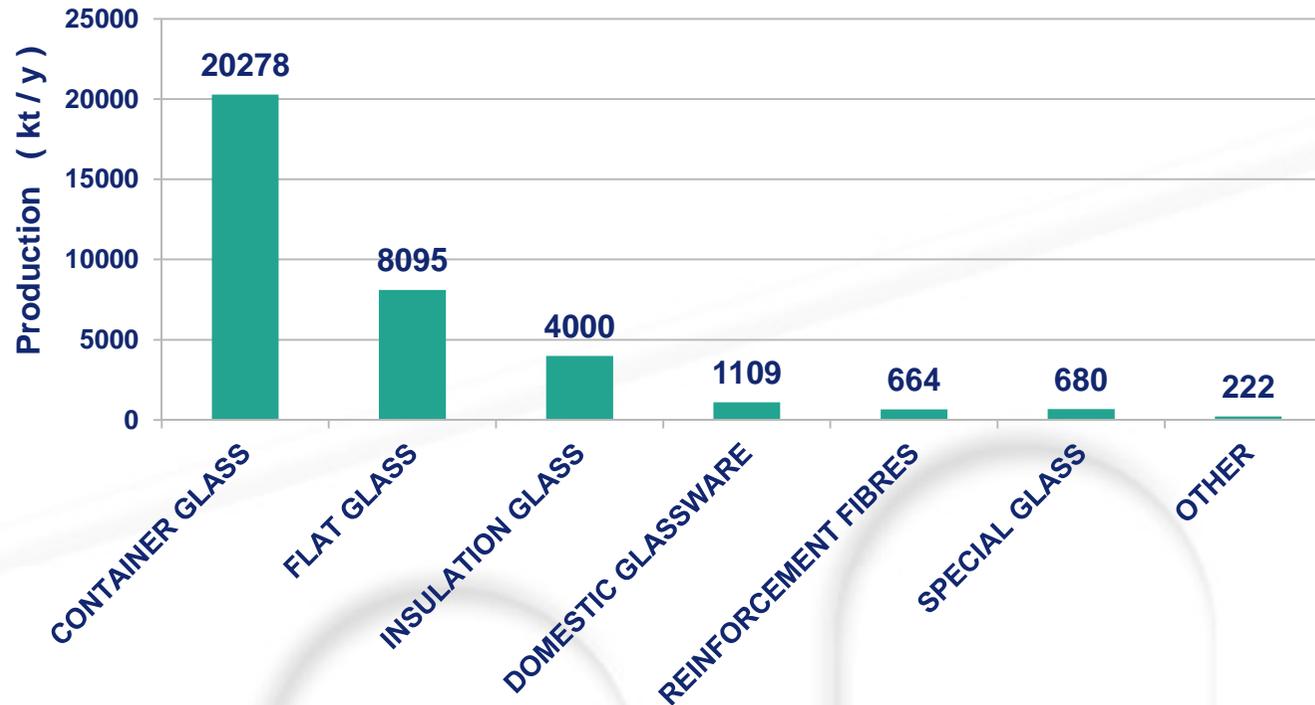
-
- 1- Industrie du verre : contexte**
 - 2- Contraintes Produits - Fonctions Procédés**
 - 3- Procédés Fusion conventionnels : critères de choix**
 - Les principaux types de four
 - Performances comparées
 - 4- Perspectives & Challenges**

Les fours industriels

- 1- **Industrie du verre : contexte**
- 2- **Contraintes Produits - Fonctions Procédés**
- 3- **Procédés Fusion conventionnels : critères de choix**
 - Les principaux types de four
 - Performances comparées
- 4- **Challenges futurs**

La Production de verre en Europe (EU 28 - 2013)

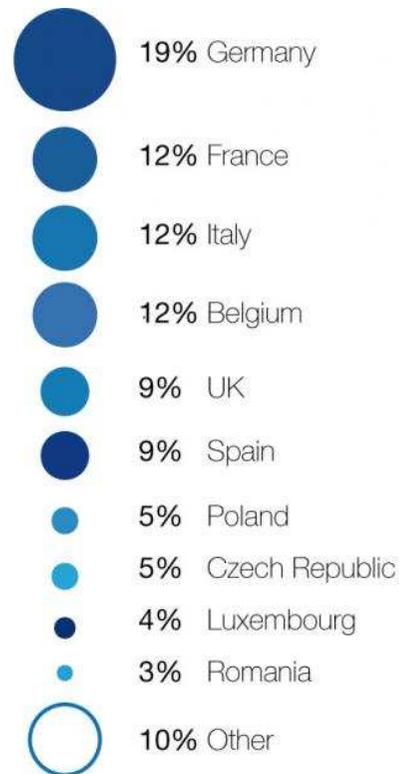
- **Production totale : \approx 35 millions t/an** (Monde: 110 Mt/an)
58% Container, 23% Flat, 11% Insulation, 3% domestic, 2% Textile, 2% Special
- **CA : \approx 39 Md € / an**
- **Employés \approx 200 000**



Production de Vitrages en Europe

- Production totale EU28 : \approx 8,1 million t/an, soit 15% de la production mondiale

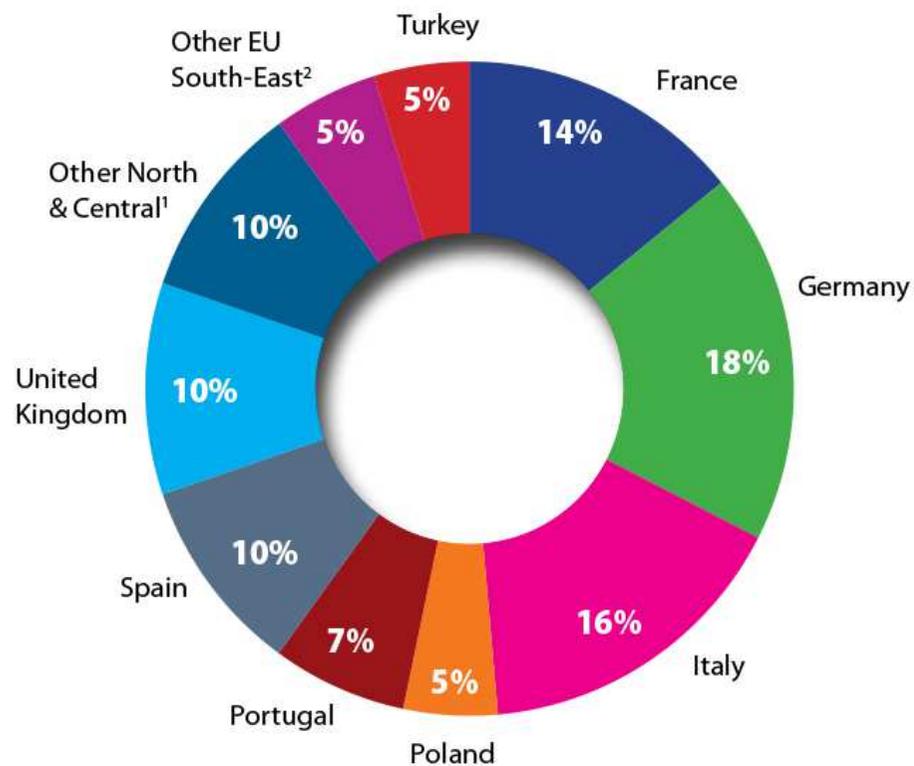
Percentage of EU
Flat Glass production



Production de verre Conditionnement en Europe (EU28 - 2013)

PRODUCTION YEAR 2013

Production of packed glass (bottles, jars, flacons) in Tonnes	
COUNTRY	2013
France	3,030,949
Germany	3,933,641
Italy	3,439,407
Poland	1,003,551
Portugal	1,439,429
Spain	2,087,000
United Kingdom	2,240,759
EU North & Central ¹	2,093,984
EU South-East ²	1,115,601
Turkey	1,021,000
Total Europe (EU27+CH+TR)	21,405,321
Total EU 27	20,277,608



Based on FEVE geographic scope

¹ EU North & Central Area: Austria, Belgium, Denmark, Estonia, Sweden, Switzerland, The Netherlands (7 countries)

² EU South East Area: Bulgaria, Czech Republic, Greece, Hungary, Romania, Slovakia (6 countries)

Production - Definition

Amount of produced packed glass (bottles, jars, flacons) in tonnes.

Data by units were only partially provided. Therefore it is not possible to develop a European overview

US-container-glass industry : 10 MT/y

Principales Directives EU impactantes, concernant les émissions dans l'air

- EU - Directive IED (Industrial Emission Directive – 20/11/2010)

BREF verrier 2012 : guide BAT + valeurs limites d'émissions devenues prescriptives: NOX, SOX, dust,...



- Paquet Climat – Energie “20-20-20” de l’UE - décembre 2008

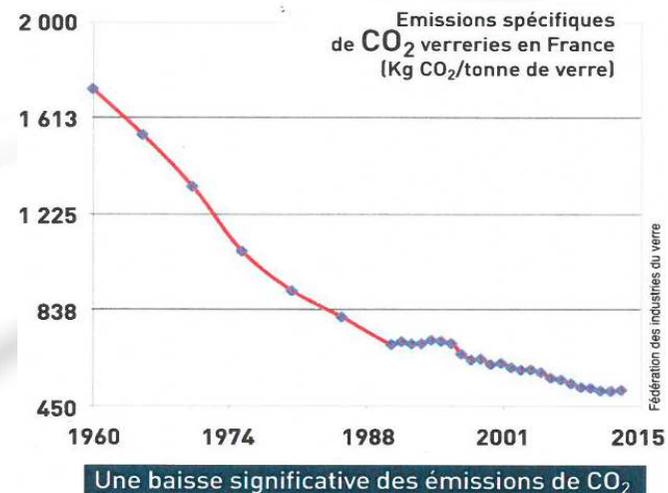
- GES : réduction de 20% en 2020 vs 1990 contraignant sur CO2
- Directive “EU ETS” modifiée 04/2009 (Emissions Trading Scheme) : via quota - 21% GES de 2005-2020
- Définition Phase III actuelle (2013-2020) : achat de quotas CO2 manquants sur marché enchères

- Nouveau Paquet Climat - Energie 2014 de l’UE

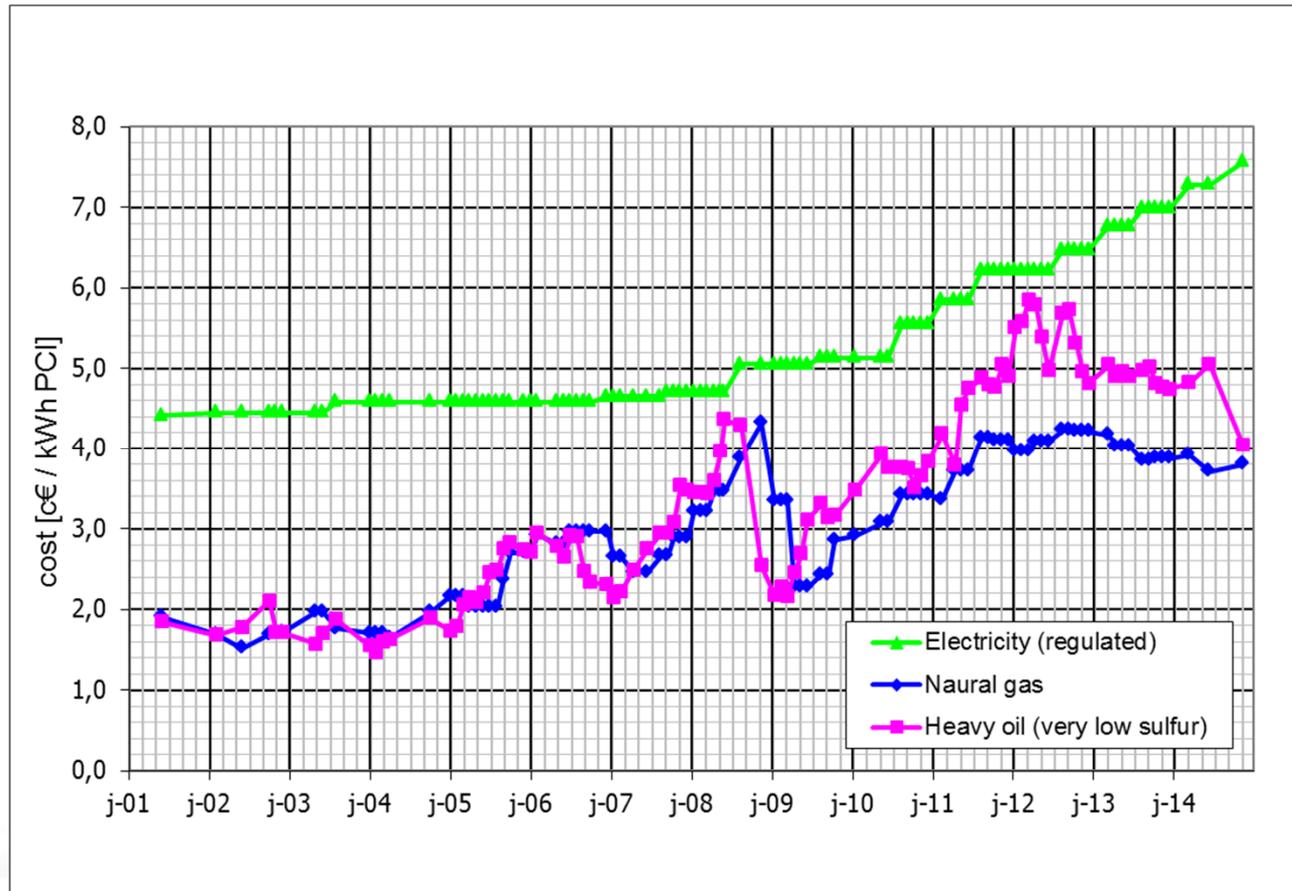
→ GES : réduction de 40% en 2030 vs 1990.....

Progrès Energie & CO2

- Coûts énergie, Recyclage du verre
- Design Fours : régénération, tonnages,
- Amélioration opérationnelle: marches & maintenance
- Conversion des fours au Gaz



Evolution du coût de l'énergie - France 2001-2015



2015
 GN : 38 €/MWh
 Elec : 75 €/MWh *

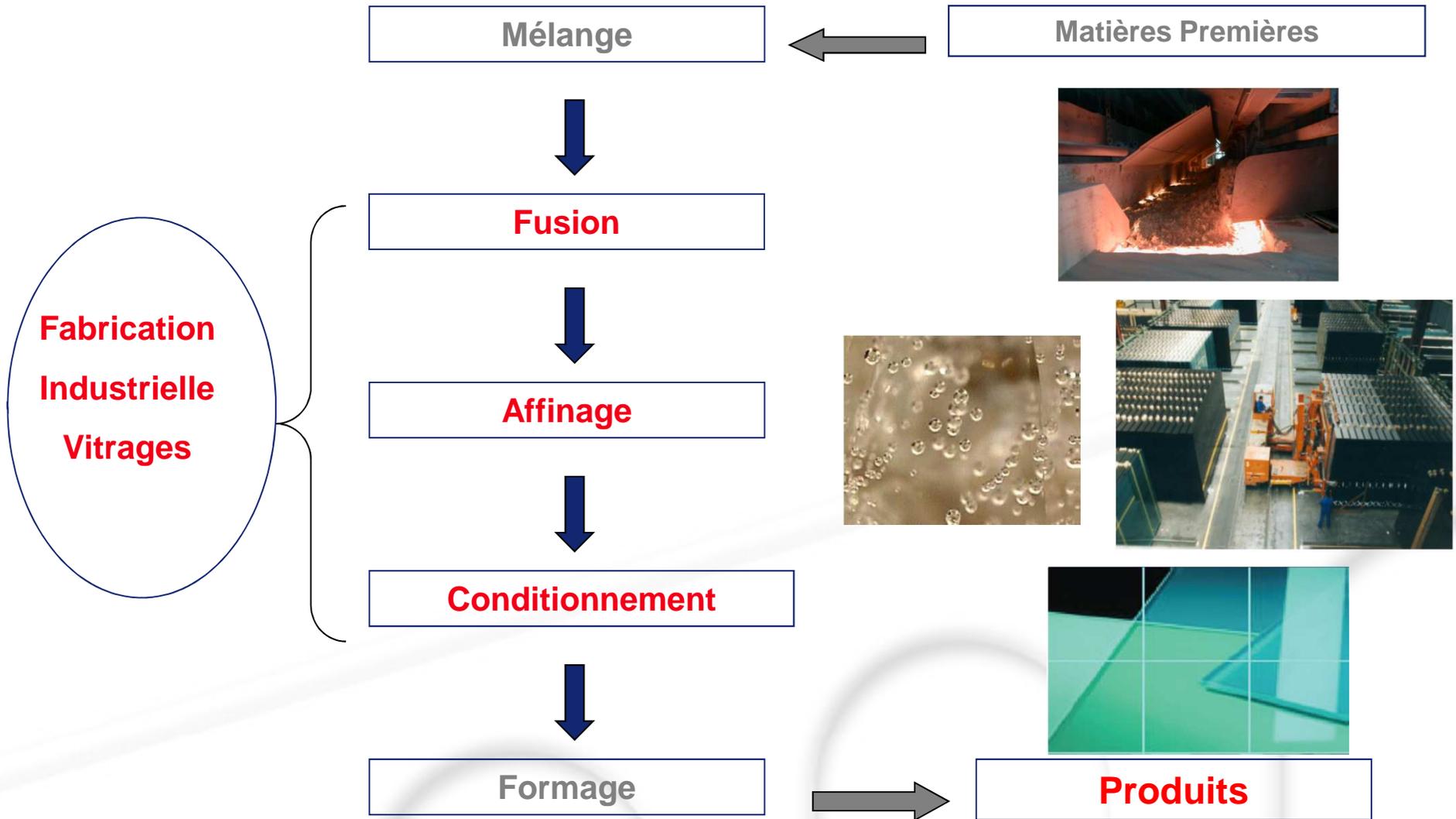
Prix indust. moyen
 +/- 10-15 % / sites & contrats

Prix du gaz < fuel depuis 2009
 Electricité & O2 peu accessibles

Mixité combustibles + A. Elec.

Les fours industriels

- 1- Industrie du verre : contexte
- 2- **Contraintes Produits - Fonctions Procédés**
- 3- Procédés Fusion conventionnels : critères de choix
 - Les principaux types de four
 - Performances comparées
- 4- Perspectives & Challenges



Les fours Industriels

La chimie du verre de base

Verres sodocalciques : produit de base



SiO ₂	71,75 %
Na ₂ O	14,09 %
K ₂ O	0,04 %
CaO	9,34 %
MgO	3,82 %
Al ₂ O ₃	0,58 %
Fe ₂ O ₃	0,07 %
SO ₃	0,23 %

. Mat. Premières Carbonatées → Elaboration 1 Tonne (0.4 m³) de verre Sodo-calcique :

700 kg Sable, 250 kg Na₂CO₃, 200 kg CaCO₃, 50 kg autres

↪ 500 kg CO₂ dégagés = 200 kg Composition + 300 kg Combustion

↪ ~ 100 Nm³ de bulles de CO₂ à éliminer du bain

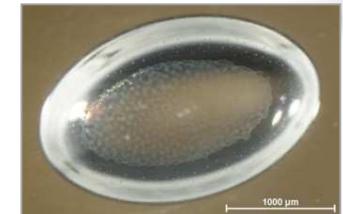


- . Sulfate additif ~ 0.5 % / kg verre fondu
- . Taux calcin moyen : 20 %
- . Redox : 26-30 %, selon combustible
- . Couleur :
 - extra-clair glass Fer ~100ppm
 - teinté automobile ~ 1%

Les fours Industriels: *Choix du concept / la qualité du verre*

Critères / Fours CdC	Float (BT)	Boucle	Unit Melter		Electrique
			Isol.	Tex.	
Surface four : m²	250 - 500	90 - 150	70 - 130		3 - 120
Durée de campagne : ans	12-15	10 (5+5)	6	10	> 5 (Isol.)
Taux de calcin : %	10 - 40	10 - 90	85	0	0 - 40
Tirée journalière : t/j	400 - 800	300	270	110	10 - 320
Tirée spécifique :t/j/m ²	1 - 1,6	3,2	3,2	1,6	3,0
Qualité					
Défauts par litre					
< 0,2 mm	< 1 pt fin	1000 - 5000	> 10000	1000	> 10000
< 1 mm	< 0,02 1,5 / 20 m²	100		< 0,05	
> 1 mm	prohibés (classe 4)			0,3 casse/kg	
Homogénéité	indice d'onde	0 onde visible	0 inc. solides homogénéité / fromage		
					

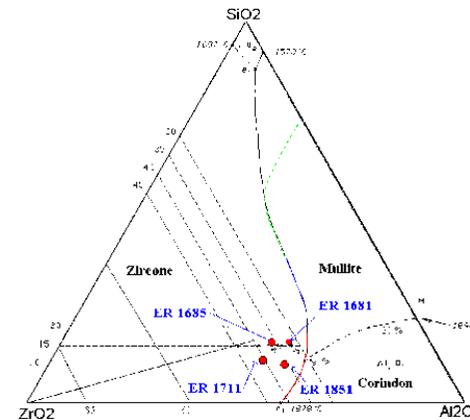
- **La qualité du verre dépend de l'application :**
 - Verre Isolation : faible qualité, 0 inclusions solides (grains de silice, alumine, céramiques)
 - Verre plat : qualité maximale, limitation des bulles et des défauts optiques (ondes, stries, ...)
- **Trois critères principaux pour la fusion / affinage :**
 - Le temps de séjour des particules, notamment les plus faibles (tirée spécifique ($t/j/m^2$)).
 - L'histoire thermique et les seuils température vues par 100% des particules
 - L'affinage du verre (élimination des bulles) :
 - par ascension des bulles dans la fonte → longue zone d'affinage dans les fours float
 - par résorption des bulles dans la fonte



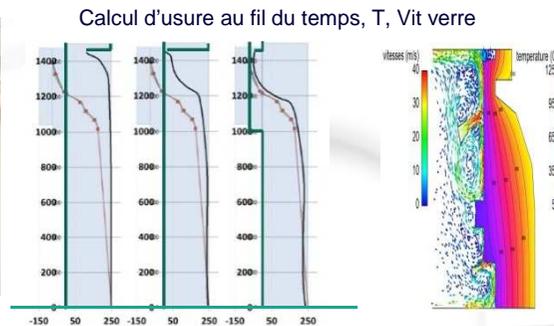
Les fours Industriels

La qualité des réfractaires

- Choix & qualité des réfractaires = qualité du verre
- Forte corrosion ligne de flottaison
- 3 principaux oxydes : Alumine Zircon & Silice
- 3 groupes: % ZrO2 = résistance corrosion
 - . 33% ZrO2 : ER 1681
 - . 36% ZrO2 : ER 1685, ER 1851
 - . 40% ZrO2 : ER 1711 ... (95% ZrO2 : ER 1195)
- Durée des campagne : ~ + 50 % en 20 ans
 - Qualité design & Audit
 - Maintenance & placages



Tank-wall corrosion in soda lime furnace



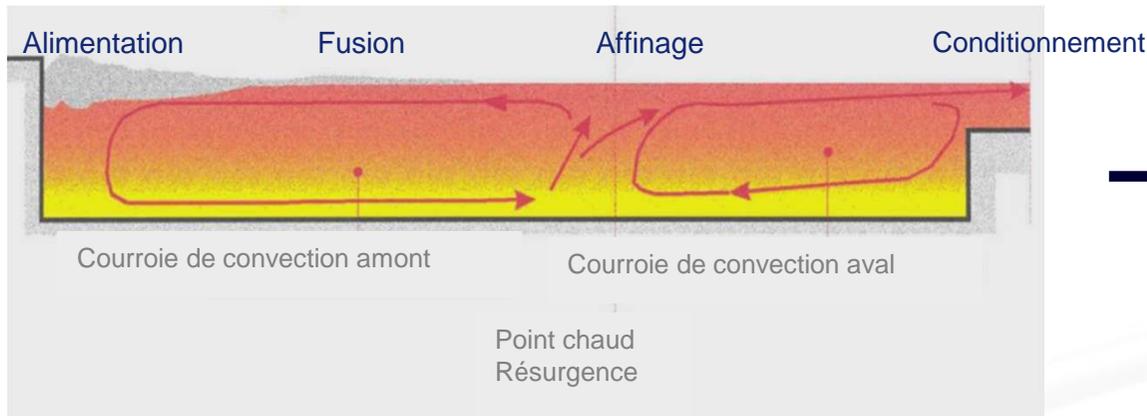
Les fours industriels

Fonctionnalités recherchées

- **Elaboration du verre :**

- . Les différentes phases effectuées simultanément, à des endroits différents du four
- . La coulée continue

(Siemens-1867)



Formage du verre (verre plat, fibres, verre creux)

- **Apport d'énergie**

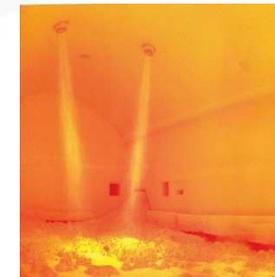
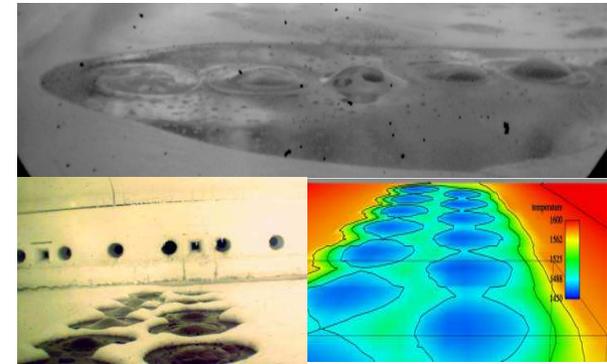
- Energie fossile :
 - fioul, gaz ... biomasse, petcoke
 - air préchauffé ou O₂
- Energie électrique :
 - électrodes par dessus / par la sole

- **Qualité du verre**

- Qualité et homogénéité du mélange vitrifiable **T_{max} SO₂ = 1450°C**
- Température de fusion (notamment point chaud)
- Temps de séjour

Des moyens de renforcer ces fonctions

- **Plus de mélange en fusion : convection**
 - Bouillonneurs
 - Boosting électrique
- **Plus d'efficacité énergétique**
 - Récupération d'énergie des fumées (régénérateurs, récupérateurs)
→ préchauffage combustibles, comburant, composition
 - Isolation des parois
 - Meilleur transfert au bain (bouillonneurs / mousse)
- **Séparation des fonctions**
 - Géométrie : Muret après le point chaud
 - Verrou: Ligne source / bouillonneurs

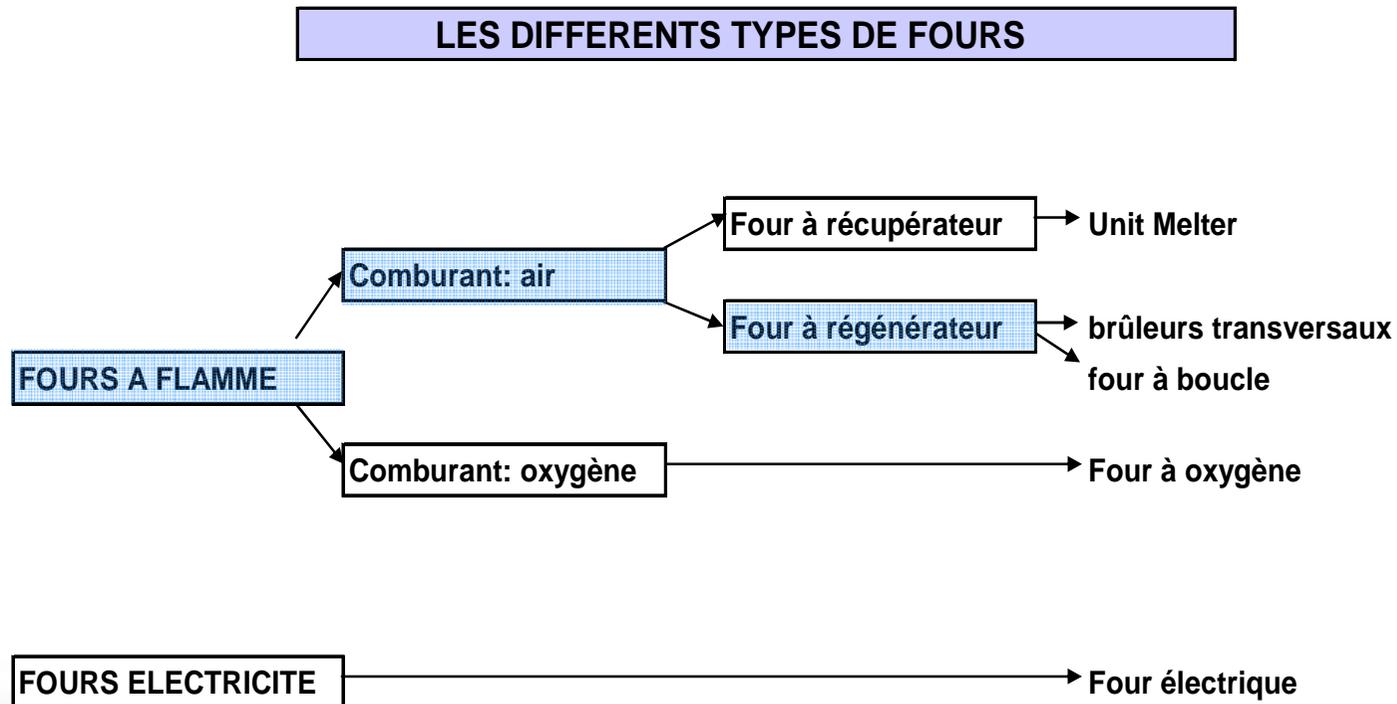


Les fours industriels



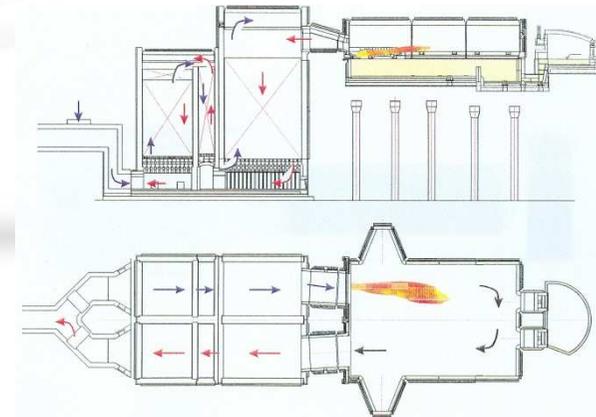
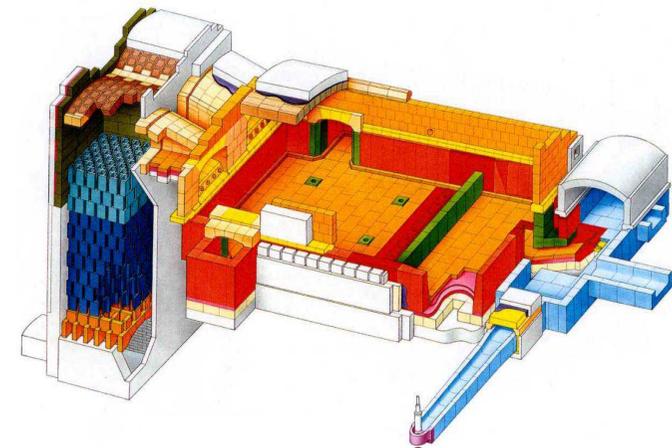
- 1- Industrie du verre : contexte
- 2- Contraintes Produits - Fonctions Procédés
- 3- **Procédés Fusion conventionnels : critères de choix**
 - Les principaux types de four
 - Performances comparées
- 4- Perspectives & Challenges





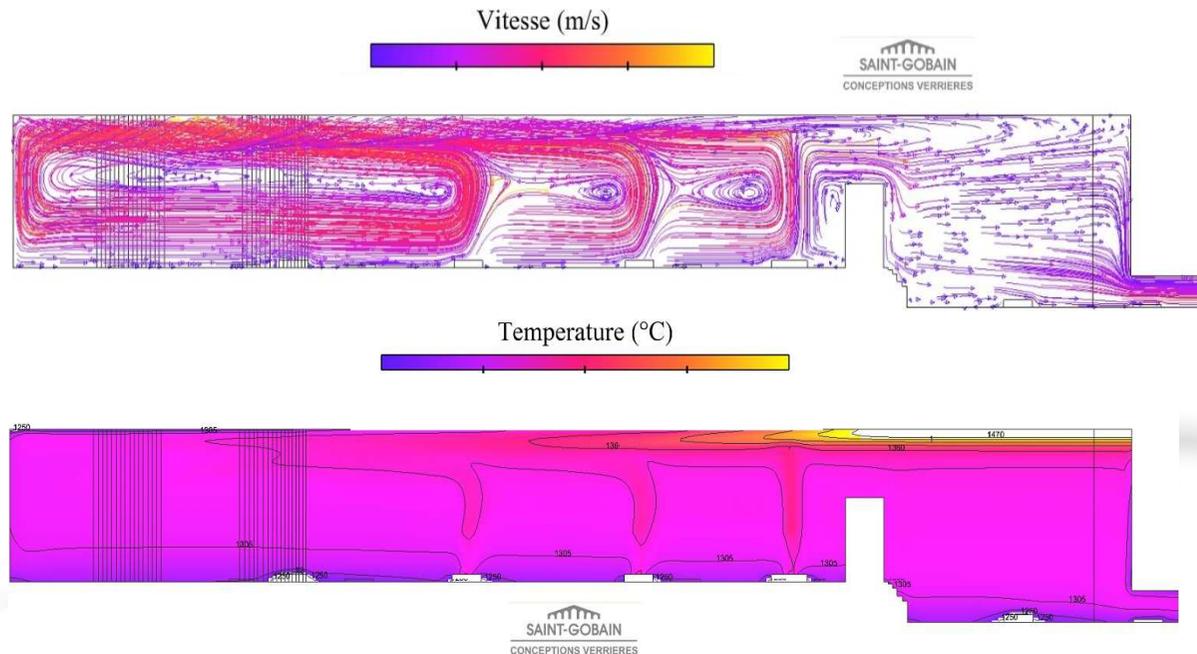
- Un four compact, isolation aisée
→ faible consommation
- Une flamme unique → surface limitée (< 200 m²)
- Chambres de régénération → pas de verre au bore
(condensats borates)
- Prélèvement du verre : gorge (plus froid)
- Un investissement important
- Un rendement de combustion maximal (75-80% Tair > 1300°C)

Le plus performant énergétiquement



Les courroies de convection = transfert de chaleur , contrôle de la nappe composition, mélange du verre.

Un boosting électrique placé en fin de la 1^{ère} courroie (ligne source) = renfort convectif.
Effet similaire avec une ligne de bouillonneurs en même position

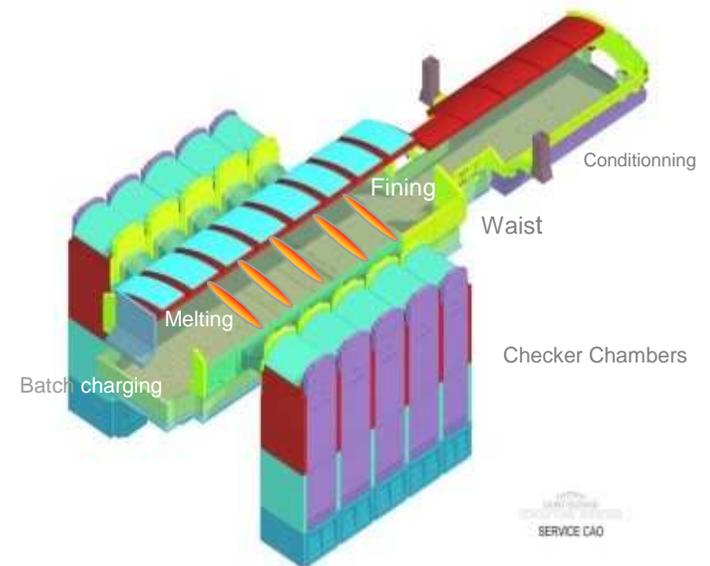
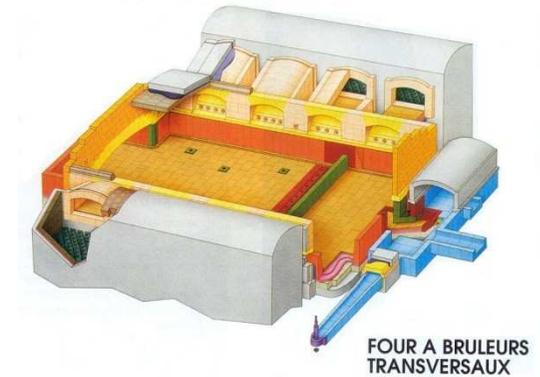


Convection et les champs de température avec boosting électrique, en four à boucle

Les fours industriels

Fours à brûleurs transversaux

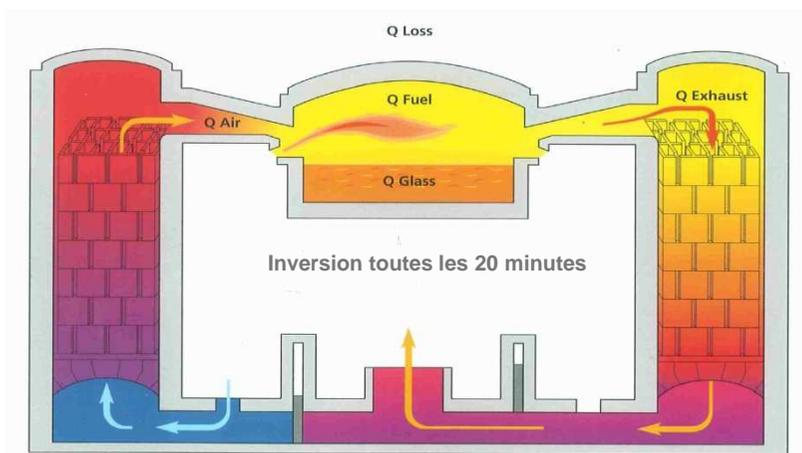
- . Plusieurs paires de brûleurs face à face → grande surface de fusion : application fours FLOAT
- . Chambres de régénération, sensibles aux borates de soude
→ pas de verre au bore
- . Un rendement de combustion élevé (70%) - $T_{air} > 1300^{\circ}\text{C}$
- . Prélèvement : gorge ou corset / braise, après long temps d'affinage
- . Un investissement majeur



La régénération offre les meilleurs rendements : 65- 80%

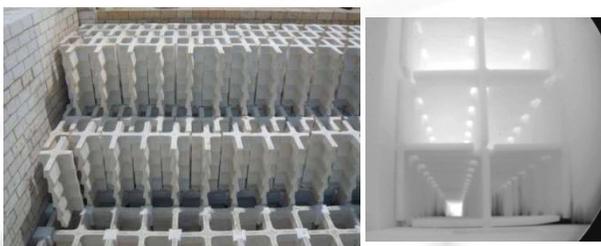
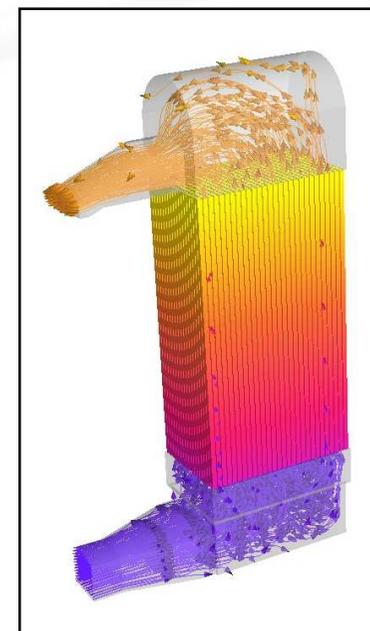
Côté air

L'air de combustion est préchauffé en traversant les empilages



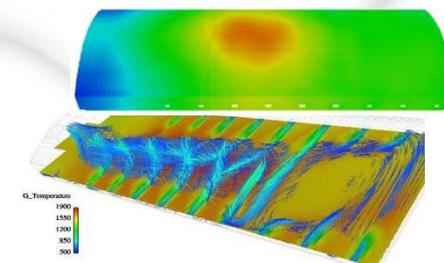
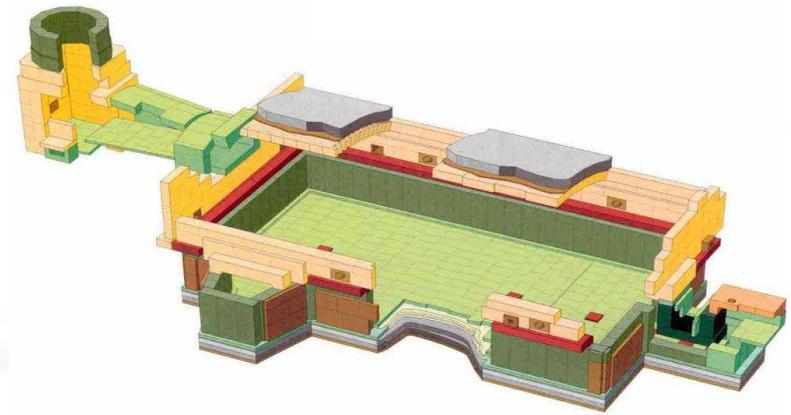
Côté fumées

Les fumées chauffent les empilages



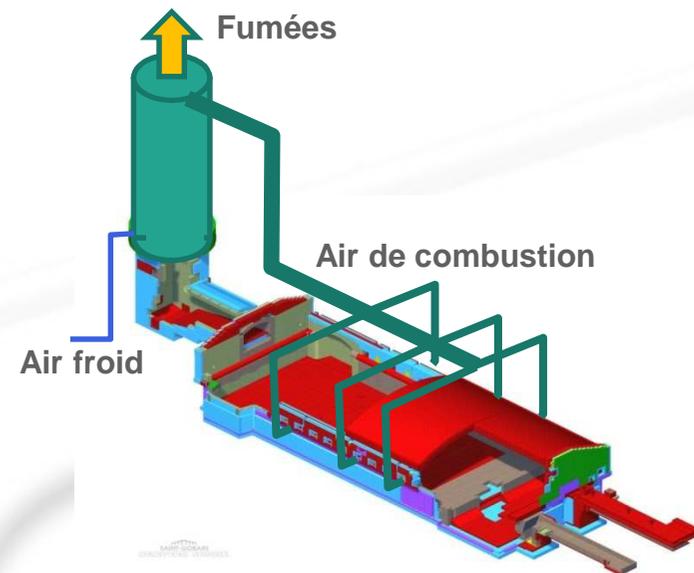
L'inertie des empilages garantit la performance : rendement de combustion de 75% (selon volume des chambres)

- Un rendement de combustion faible, par récupérateur métallique (50 - 65% Tair 600°C)
- Nombreux brûleurs à air préchauffé, en face à face ou en quinconce
- Application avec verre au bore possible
- Un investissement plus faible, mais incluant un système de récupération + distribution d'air chaud



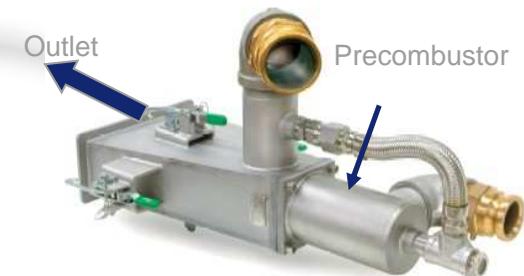
La récupération est adaptée aux borosilicates

L'échange est limité à la résistance du métal à la température :
rendement de combustion de 50 à 65 %
(selon les types de récupérateurs, à tube, simple ou double étage, double enveloppe ...)



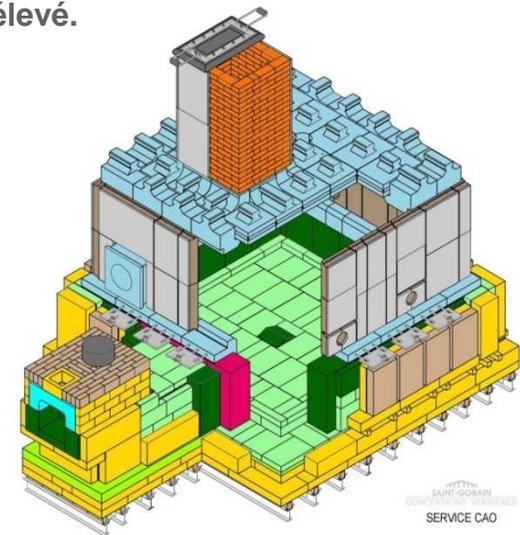
Tous les fours flamme peuvent être convertis à l'oxygène

- Meilleur rendement de combustion :
 - $O_2 = \text{Régénérateurs} = 75\%$, contre 50 à 60% avec récupérateur
 - Réduction de la consommation des fours à récupérateur
 - Hausse des coûts d'exploitation, malgré la baisse de consommation
- Baisse des investissements
 - Pas de régénérateurs (réduction de 40 %)
 - Renforcement des qualités de réfractaires (l'AZS remplace la silice)
- Rentabilité de la conversion à étudier, selon le prix du gaz et de l' O_2 disponible
- Réduction des émissions de NO_x



AP: Real PF400 oxygen burner

- Voûte Froide : Alimentation de composition par le dessus .
- 95 % de l'énergie transmise au bain : consommation réduite mais coût énergie élevé.
- Systèmes d'alimentation électrique en diphasé ou triphasé.
- Electrodes par la sole, ou par le dessus. En paroi de cuve également possible.
- Un investissement réduit (hors transformateurs).



- . Fours de Flaconnage : Pochet du Courval (cuve water-jacket)
- . Fours de Cristallerie : électriques à banquettes
- . Fours laines de roche : cubilots
- . Fours de verres spéciaux : ...
- . Four à brûleurs immergés.
- ...



Les fours industriels

Performances comparées

Technologie	Four à boucle	Four à brûleurs transversaux	Four O2	Four à récupérateur	Four électrique
Verre	0 bore	0 bore	Tous types	Tous types	verre clair
tonne / jour	++	++++	++	++	+
kWh/t	+++	++	++	+	++++
Invest. €	++	----	++	++	+++++
Exploit. €	++	+	-	--	-
Qualité	+	++++	+	-	-
Application	Verre creux, verre imprimé, isolation	Verre plat, verre creux	Tous	Verre isolation, verre textile	Verre isolation

+ : intérêt, capacité

. Coûts Investissement :

$F_{BT} > F_{Boucle} > UM > F_{O_2} > F_{Elect.}$

. Consommation Energie :

$UM > F_{BT} > FO_2 > F_{Boucle} > F_{Elect.}$

Mais Coût MWh O_2 et Elec. 50 -60% + élevé / MWh fuel-gaz

. Coûts Energie :

$F_{Elect.} > F_{O_2} > F_{UM} > F_{BT} > F_{Boucle}$

. Coûts Dépollution :

Fours Flammes $> F_{O_2} > F_{Elect.}$

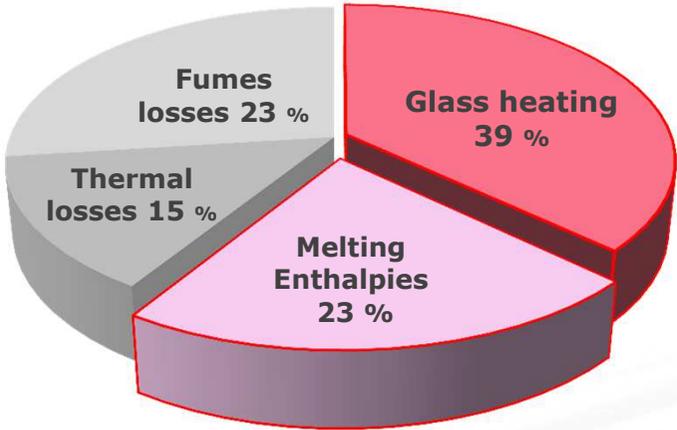
Les fours industriels

- 1- Industrie du verre : contexte
- 2- Fonctionnalités Produits
- 3- Procédés Fusion conventionnels : critères de choix
 - Les principaux types de four
 - Performances comparées
- 4- **Perspectives & Challenges**

Les fours industriels

Consommation Energie

Bilan thermique simplifié - verre Conditionnement - 10 % calcin

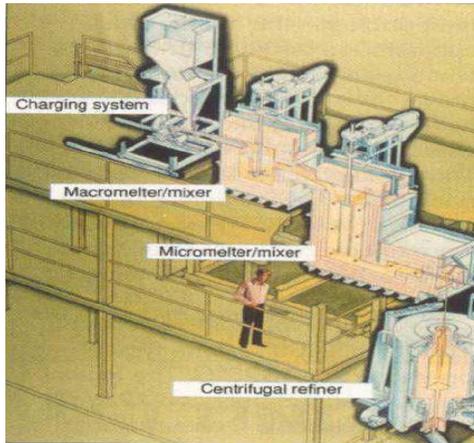


Fusion du Verre
62 %

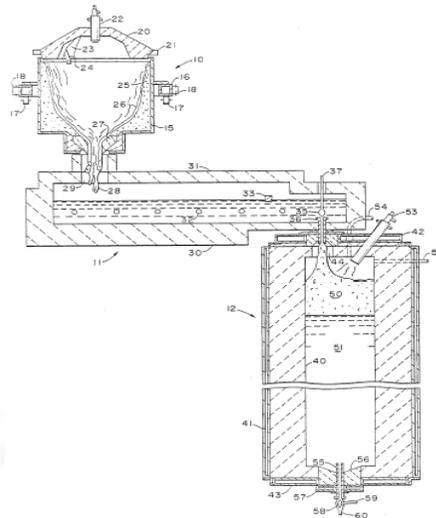
La part du verre devient prépondérante

- 39 % Chaleur sensible (dont affinage)
- 23 % Réaction Enthalpies Fusion

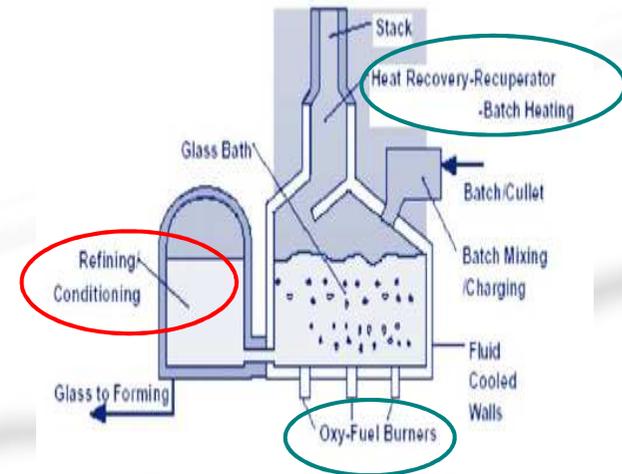
Technologies Innovantes 1990-2010



- Sorg 1988
Flexmelter Owens



- PPG 1992
Procédé affinage sous vide



GMIC* Submerged Combustion Melting
(DOE Project 2005)

* Green Manufacturing Industrial Consortium

- Affinage du verre : verrou technologique majeur Chimie - process ?
- Récupération d' Energie & Emissions CO2 ??
- MP carbonatées & coût Na₂CO₃
- Fibres: verres sans Bore / Régénération
- Taux de Recyclage : Europe 65 → 85 % (- 100°C T affinage = - 15% Energie)
- Paradoxes : Flexibilité / polyvalence - Qualité / stabilité
- Produits de base / Différenciation



Saint-Gobain 350 ans



Merci de votre attention !!