



# Développement de matériaux alternatifs. Perspectives

Contexte et exemples de projets de recherche

**Université de Sherbrooke au Canada**

et

**LNEC - Laboratoire National de Génie Civil au Portugal**

Alexandre Pavoine (CETE Ile de France), Antonio Santos Silva (LNEC)

## Sommaire

### ① Développement de matériaux alternatifs



- ✓ Disponibilité des additions minérales normalisées au Québec
- ✓ Contexte normatif
- ✓ Exemple de la poudre de verre pour le béton
- ✓ Projets et perspectives

### ② Utilisation de sous-produits



- ✓ Production de clinker ?
- ✓ Additions pouzzolaniques

### ③ Conclusions et perspectives

## Disponibilité des additions minérales normalisées au Canada

Le Canada consomme **24,5 million de m<sup>3</sup>** de béton par an (2001)

Territoire de 15 x France – La part du transport des matériaux est non négligeable

Quelles alternatives au liants uniquement constitués de Ciment Portland ?

	Qtés produites par an	Qtés consommées par an
<b>Cendres volantes</b>	<b>4,7 MT</b>	<b>11%</b>
<b>Laitier de Haut Fourneau</b>	<b>0,4 MT</b>	<b>90%</b>
<b>Fumée de silice</b>	<b>20 000 T</b>	<b>185%</b>

Problème les cendres volantes viennent d'être classées comme déchet aux EU

## Contexte normatif

La norme A 3001-08 « Cementitious materials for use in concrete »

Autorise le mélange d'additions pour formuler un liant

	Ciment obtenus par mélange binaire avec				Ciment ternaire et quaternaire hydraulique obtenu par mélange
	Pouzzolanes naturelles	Cendre Volantes	Laitier	Fumée de Silice	
<b>Limite du constituant %</b>					
<b>Matériaux cimentaire supplémentaire, maximum %</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>15</b>	<b>60</b>
<b>Ciment Portland minimum %</b>	<b>60</b>	<b>50</b>	<b>30</b>	<b>85</b>	<b>40</b>

## Des liants à la carte

Dans ce contexte normatif - Comment produire des bétons en centrale avec des mélanges complexes de ciments et d'additions ?



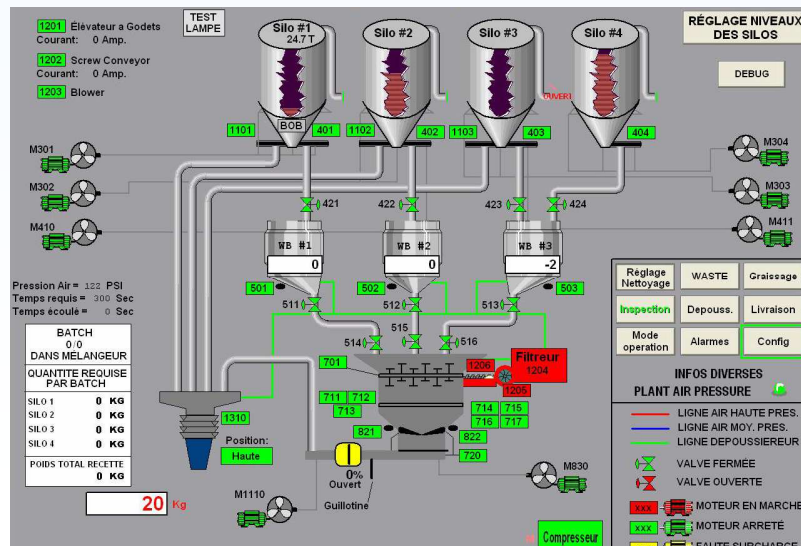
Mélangeur de grande capacité



Station de mélange  
Béton Provincial

## Des liants à la carte

Station de mélange



## **Possibilités d'utiliser des additions cimentaires alternatives**

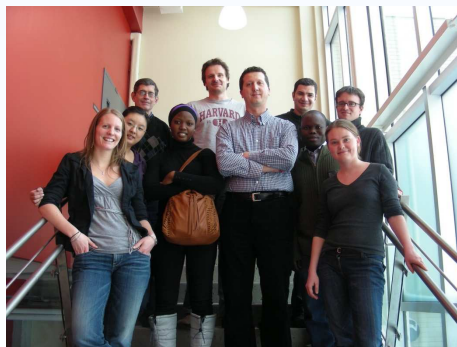
Depuis 2008 A3004-E1 : *Standard practice for the evaluation of alternative supplementary cementing materials (ASCMs) for use in concrete*

Caractériser des ASCMs en fonction de leur caractéristiques, des propriétés mécaniques et de la durabilité

- (a) Laitier non-ferreux ;
- (b) Laitier d'aciérie ;
- (c) Cendres volantes d'incinération ou des co-combustibles;
- (d) Co-produits de l'industrie des alliages de ferro-siliceux
- (e) Calcin de verre finement broyé ;
- (f) Fumée de silice avec moins de 75% de silicium
- (g) **Autres co-produits industriels contenant de la silice amorphe**

Type A ou B en fonction des propriétés atteintes a 28 et a 91 (résistance en compression et perméabilité)

## **Laboratoire de recherche sur les matériaux cimentaires alternatifs**



UNIVERSITÉ DE  
SHERBROOKE



### **Deux Exemples**

- 1. Calcin de verre finement broyé**
- 2. Cendres volantes d'incinération**

- En 2002, 98000 tonnes de verre en moyenne ont été récupérées à travers divers systèmes au Québec
- La valeur du verre mixte est négative

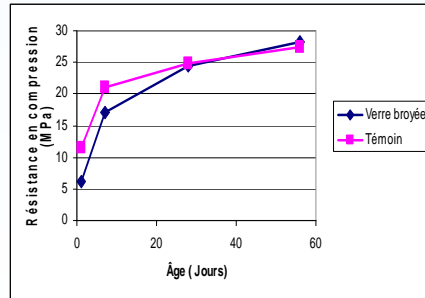


### Composition chimique du verre

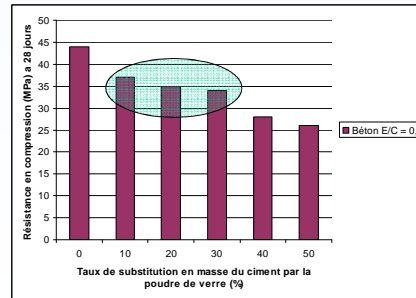
Oxides	Percentage (%)
SiO <sub>2</sub>	69.4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.74
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.46
CaO	10.6
MgO	1.03
SO <sub>3</sub>	< 0.10
K <sub>2</sub> O	0.59
Na <sub>2</sub> O	12.8
Na <sub>2</sub> O <sub>equi</sub>	13.2

## Quelques résultats

**Ciment Portland + 20% Verre  
finesse D50 < 10 µm  
E/L = 0.55**



**Ciment Portland + X% Verre  
finesse D50 < 10 µm  
E/L = 0.40**



## La poudre de verre

- ✓ Taux de substitution optimal d'un ciment CEM I 20 – 30 %
- ✓ Essais de durabilité (tenue au gel – risques de gonflement) très satisfaisants



Produit optimisé – composition chimique et finesse

- Essais de durabilité vis-à-vis de la corrosion en cours.
- Essais de comportement structurel en cours

## Usine KRUGER

Papeterie utilisant un procédé de production d'énergie par la combustion de boues de désencrage



 **Production de cendres volantes**

## Quelques données sur ces cendres volantes

	CV Normalisée CVF CSAA3000	Addition Supplémentaire Alternative CSA A3004-E1	CV Alternative
SiO <sub>2</sub>	38 a 65		35,52
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11 a 33		20,62
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3 a 31		2,01
CaO	0.6 a 13.3		<b>31,43</b>
MgO	0 a 5		2,36
SO <sub>3</sub>	0 a 4	< 5%	1,63
K <sub>2</sub> O	0.7 a 5.6		0,92
Na <sub>2</sub> O	0 a 3.1		0,95
PAF	0.1 a 12		

**Optimisation procédé de cuisson  
&  
Sélection des matières premières**



**Obtenir des cendres volantes ayant de  
bonne propriétés en tant qu'ajout dans  
le béton**

- ✓ **Production de clinker ?**
- ✓ **Additions pouzzolaniques**

### **Identification des sous-produits**

- Boues issues des **procédés industriels de traitement de surface** de l'aluminium par anodisation.  
**Production de 100 000 tonnes par an**
- Boues issues des procédés de **filtration des eaux potables**.  
**Production moyenne de 35 000 tonnes par an au Portugal**
- Boues et fines obtenues lors des opérations de **coupe des roches naturelles**  
**Production supérieure à 600 000 tonnes par an au Portugal**
- **Sables de fonderie**  
**Production d'environ 60 000 tonnes par an au Portugal**



## Identification des sous-produits

-Rejets (fines et poussières) lors de la production de granulats légers a base agile expansée

**Production supérieure à 40 000 tonnes par an** + sous-produits issues des opérations de nettoyage des sables riches en argiles

- Déchets issus des exploitations minières

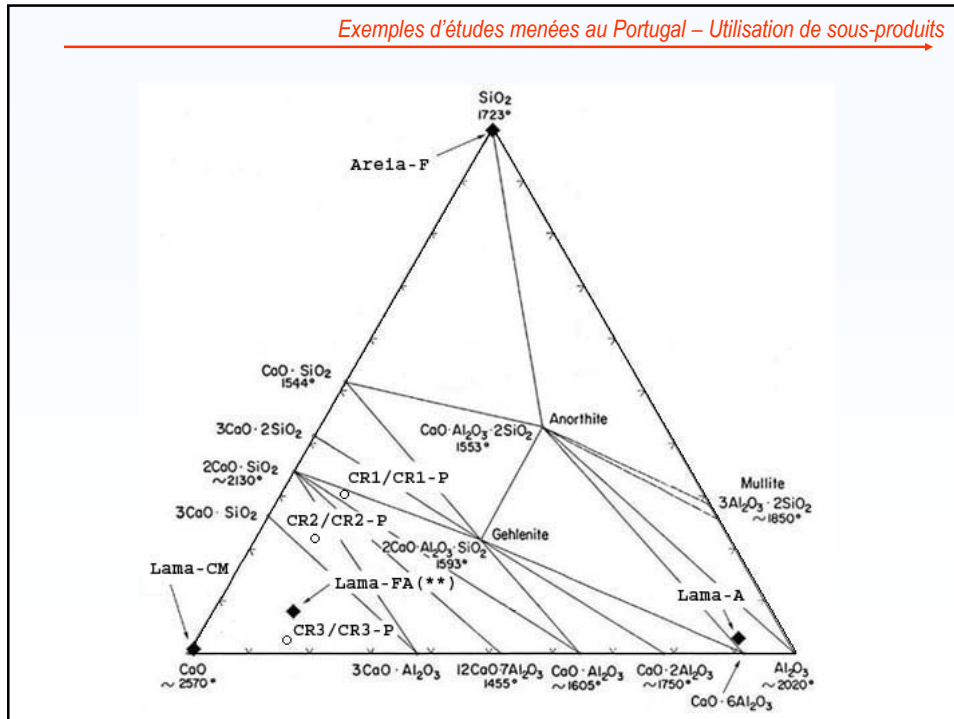
**Production de 100 tonnes par jour**

- Verre, scories et cendres d'incinération de recyclage des déchets urbains solides, etc..

Ces matériaux sont classés comme déchets non-dangereux mais sont produits en grandes quantités ce qui génère des coûts importants de traitement

## Composition chimique moyenne de sous-produits et de matières premières

	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Loi
A-sludge	35	1.2	1.4	3.0	0.35	0.07	0.10	0.05	17	40
A-calc	90	1.8	2.9	4.3	0.61	0.09	0.22	0.10	-	-
W-sludge	8.7	5.3	1.0	52	-	0.20	1.48	0.14	1.1	30
M-sludge	0.14	0.63	0.24	55	0.01	0.11	0.30	0.02	-	43
G-sludge	12	52	12	9.0	2.6	2.7	2.0	0.90	-	n.d.
CL-sand	10	81	2.5	<0.5	<0.5	1.9	<0.5	0.7	-	3.2
LW-dust	20	54	8.6	3.7	0.76	5.1	4.8	0.88	-	1.0
F-sand	0.20	98	1.1	0.22	0.02	0.26	0.03	0.20	-	0.22
LW-sludge	18.3	60.8	9.5	0.6	0.5	3.9	2.16	-	-	3.12
CB-cendres	8.5	31	3.0	24.0	6.6	2.7	4.8	-	-	13.5
Alumina	99.3	0.17	0.37	0.02	-	0.04	-	0.06	-	n.d.
Calcite	-	-	0.07	55.8	-	0.01	0.22	0.01	-	43.9
Sand	0.10	99.6	0.06	0.07	0.05	-	0.07	0.01	-	n.d.



## Production de clinker par mélange de matières premières et de sous-produits

Proportions des matériaux dans le clinker (% g/g)

Mixture	A-s	W-s	M-s	F-sand	Alumina	Calc.	Sand
CR2	13.0	15.0	60.0	12.0	-	-	-
CR3	20.0	10.0	70.0	3.0	-	-	-
CR2-P	-	-	-	-	6.5	79.4	14.1
CR3-P	-	-	-	-	9.2	89.4	1.4

## Production de clinker par mélange de matières premières et de sous-produits

Temps de prise et développement des propriétés mécaniques pendant la période de cure  
(\* ) *Dusting*.

Property / Cements	CM2	CM2-P	CM3	CM3-P
Initial setting time (min)	≅ 660	≅ 312	≅ 521	≅ 540
Compression strength after 7 days [MPa]	3.12	5.32	15.4	(*)
Compression strength after 28 days [MPa]	3.22	10.5	23.3	(*)

Après 18 mois, la résistance en compression des mortiers CM3 est supérieure à 40 MPa.

## Production de clinker par mélange de matières premières et de sous-produits

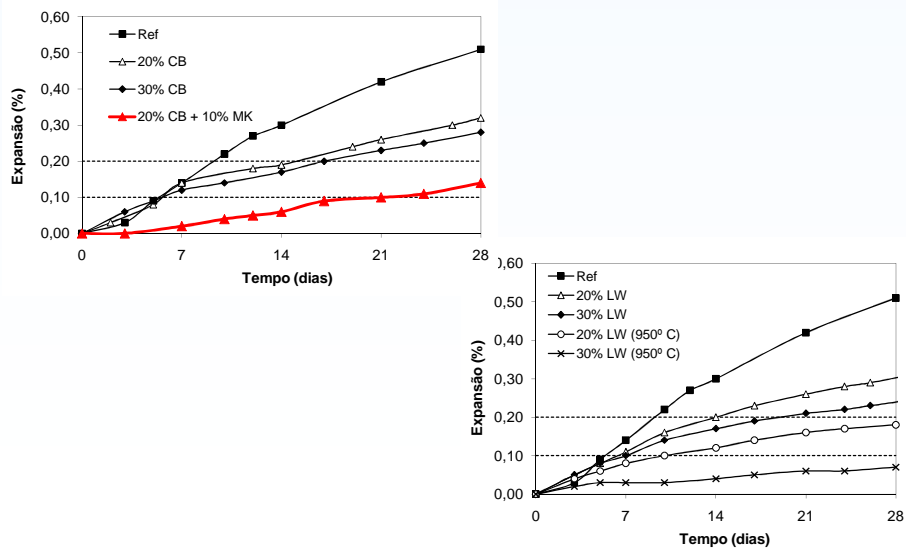
### Principales observations

- en dépit du niveau relativement élevé d'impuretés, l'utilisation du diagramme d'équilibre de phases permet de définir des compositions appropriées et les paramètres de traitement;

- en perspective, des ciments belitiques ou sulphobelitiques peuvent être obtenus. Ces matériaux se caractérisent par :

- ✓ Température de clinkérisation (< 1300°C) et émissions de CO<sub>2</sub> relativement plus faibles que celles nécessaire a la production de clinker Portland
- ✓ Développement lent de propriétés mécaniques et hydrauliques,
- ✓ Dégagement de chaleur faible

## Utilisation de sous-produits en tant qu'addition pouzzolanique ?



## Utilisation de sous-produits en tant qu'addition pouzzolanique ?

### Principales observations

- ✓ Ces deux matériaux peuvent être décrits comme des pouzzolanes "actives";
- ✓ Les techniques disponibles ne permettent pas d'expliquer les mécanismes réactionnel responsables de ces effets, des tests à plus longues échéances sont nécessaires pour confirmer l'activité pouzzolanique.

### L'efficacité des additions minérales dépend :

- ✓ de la nature des additions
- ✓ du taux de substitution au ciment

## Conclusions

- ✓ Développement de liants alternatifs au ciment Portland
- ✓ Vers des mélanges d'additions plus complexes
- ✓ Valorisation de sous-produits et de matériaux locaux
- ✓ Des exemples de contextes Normatifs favorables au développement d'additions alternatives

### Remerciements

Projet Duratinet

*LNEC, LCPC*

Collègues (J. Labrincha – Université d'Aveiro; J. Brito – Université Technique de Lisbonne)

Université de Sherbrooke, Pr Arezki Tagnit-Hamou

**Merci pour votre attention**