



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 m³** 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
Cendres volantes	4,7 MT	11%
Laitier de Haut Fourneau	0,4 MT	90%
Fumée de silice	20 000 T	185%

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	
Limite du constituant %					
Matériaux cimentaire supplémentaire, maximum %	40	50	70	15	60
Ciment Portland minimum %	60	50	30	85	40

Des liants à la carte

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



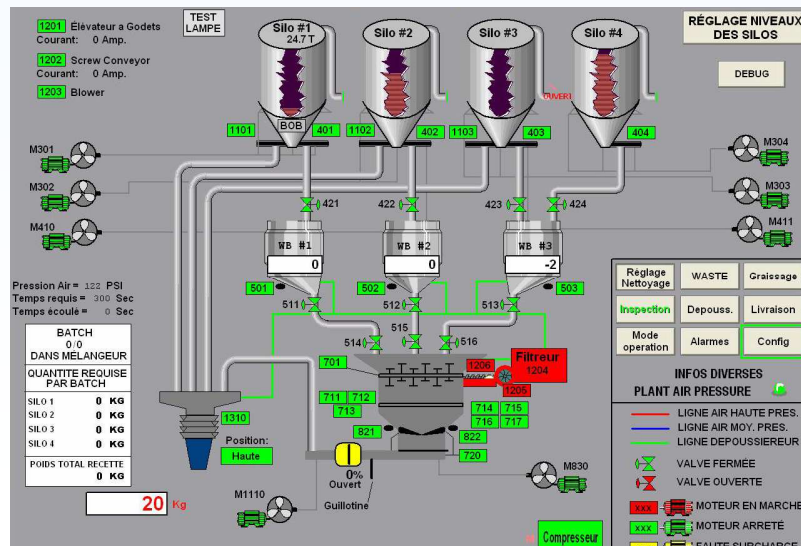
Mélangeur de grande capacité



Station de mélange
Béton Provincial

Des liants à la carte

Station de mélange



Possibilités d'utiliser des additions cimentaires alternatives

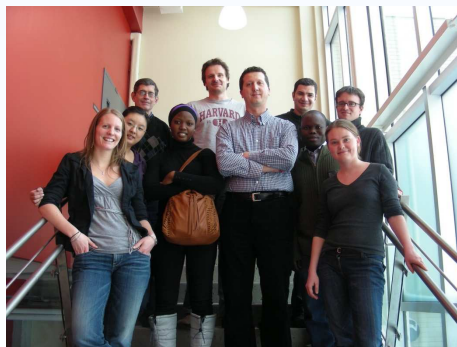
Depuis 2008 A3004-E1 : *Standard practice for the evaluation of alternative supplementary cementing materials (ASCMs) for use in concrete*

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

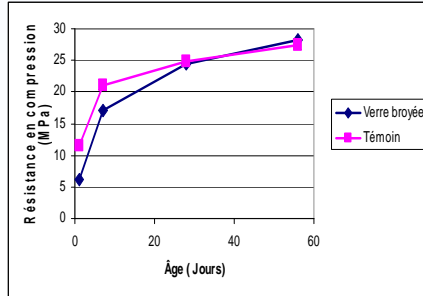


Composition chimique du verre

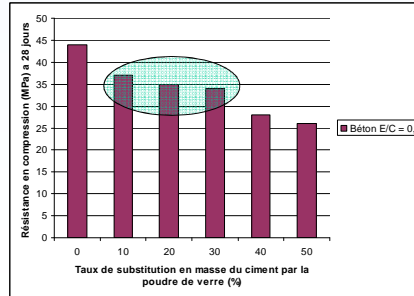
Oxides	Percentage (%)
SiO ₂	69.4
Al ₂ O ₃	1.74
Fe ₂ O ₃	0.46
CaO	10.6
MgO	1.03
SO ₃	< 0.10
K ₂ O	0.59
Na ₂ O	12.8
Na ₂ O _{equi}	13.2

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 ₂	38 a 65		35,52
Al ₂ O ₃	11 a 33		20,62
Fe ₂ O ₃	3 a 31		2,01
CaO	0.6 a 13.3		31,43
MgO	0 a 5		2,36
SO ₃	0 a 4	< 5%	1,63
K ₂ O	0.7 a 5.6		0,92
Na ₂ 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

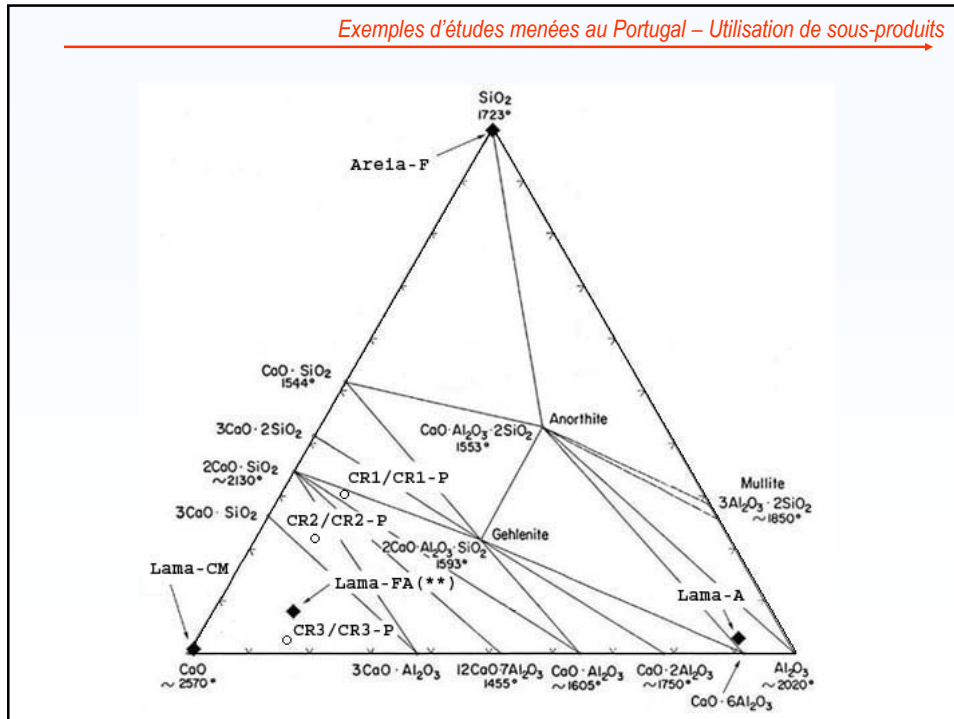
Production de 100 tonnes par jour

- 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 ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	TiO ₂	SO ₃	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

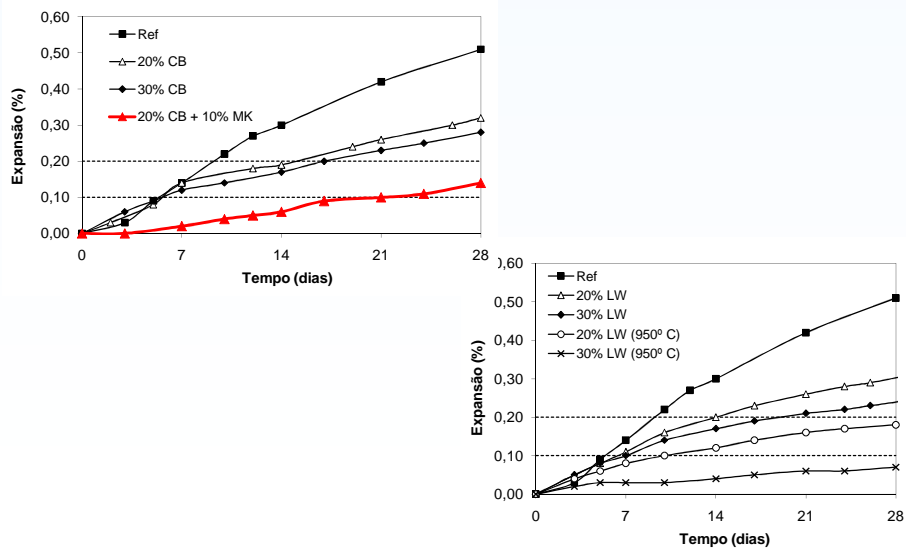
Principales observations

- 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 CO₂ 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