

Les laitiers sidérurgiques et les cendres volantes de centrale thermique dans les ciments

Ecole Nationale d'Ingénieurs de Metz
Metz, le 6 juin 2013

Arnaud HOURDIN SPI
William SONGEUR SRT

Sommaire

1. Le béton : contexte, objectifs, solutions

1. Le cadre légal et les exigences des autorités
2. Les attentes du marché
3. Les réponses du béton
4. Les conditions des réponses

2. La formulation amont comparée au mélange aval

1. Variabilité du laitier (cf. AFOCO Marseille, mai 2011)
2. Performances comparées (cf. AFOCO Marseille, mai 2011)
3. Bilan CO₂ (cf. AFOCO Paris, mai 2012)
4. La réponse optimisée : le CEM V (cf. AFOCO Paris, mai 2012)

3. Révision de la norme béton NF EN 206-1

1. Les demandeurs du changement
2. Les modifications : avantages et inconvénients
3. Analyse des modifications
4. Conclusions sur les modifications

Conclusions et sens de l'histoire

Sommaire

1. Le béton : contexte, objectifs, solutions

1. Le cadre légal et les exigences des autorités
2. Les attentes du marché
3. Les réponses du béton
4. Les conditions des réponses

2. La formulation amont comparée au mélange aval

1. Variabilité du laitier (cf. AFOCO Marseille, mai 2011)
2. Performances comparées (cf. AFOCO Marseille, mai 2011)
3. Bilan CO₂ (cf. AFOCO Paris, mai 2012)
4. La réponse optimisée : le CEM V (cf. AFOCO Paris, mai 2012)

3. Révision de la norme béton NF EN 206-1

1. Les demandeurs du changement
2. Les modifications : avantages et inconvénients
3. Analyse des modifications
4. Conclusions sur les modifications

Conclusions et sens de l'histoire

1. Le béton : contexte, objectifs, solutions

LES EXIGENCES DES AUTORITES

Durabilité des bétons
Pérennité des ouvrages

Économie du coût de la
construction

Objectifs de
développement durable

- **Les lois**

- Grenelle de l'environnement 1 (*LOI n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement*)
- Grenelle de l'environnement 2 (*LOI n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement*)

- **Leur déclinaison réglementaire dans les services de l'état**

- ⇒ **Décret du Premier ministre n° 2009-697 du 16 juin 2009 relatif à la normalisation**
- Modification des différents statuts des services de l'état afin que soit pris en compte les exigences du Grenelle de l'Environnement
 - SETRA : Arrêté du 12 juillet 2010 fixant l'organisation du service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements
 - AFNOR : Statuts modifié le 10 décembre 2009
 - IFSTTAR : Décret n° 2010-1702 du 30 décembre 2010 portant création de l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux
- Evolution des orientations stratégiques du Comité Stratégique Construction & Urbanisme de l'AFNOR afin de décliner les lois du Grenelle de l'environnement

1. Le béton : contexte, objectifs, solutions

LES EXIGENCES DES AUTORITES

Durabilité des bétons
Pérennité des ouvrages

Économie du coût de la
construction

Objectifs de
développement durable

LES ATTENTES DU MARCHE

80 % du marché : décoffrage à 16h

20% du marché à une faible exigence de décoffrage,
dont 5-10% nécessitant des bétons
à faibles chaleurs d'hydratation

Respecter les nouveaux objectifs de développement durable

LES REPONSES DU BETON

Compacité Béton
Régularité Béton

Bétons innovants
autoplaçants / autolissants

Taux d'additions
maximum (laitier - cendres)

LES CONDITIONS DES REPONSES DU BETON

Extrême régularité
des composants

Utilisation optimale
d'additions en offre limitée

Formulation des ciments composés en amont

Sommaire

1. Le béton : contexte, objectifs, solutions

1. Le cadre légal et les exigences des autorités
2. Les attentes du marché
3. Les réponses du béton
4. Les conditions des réponses

2. La formulation amont comparée au mélange aval

1. Variabilité du laitier (cf. AFOCO Marseille, mai 2011)
2. Performances comparées (cf. AFOCO Marseille, mai 2011)
3. Bilan CO₂ (cf. AFOCO Paris, mai 2012)
4. La réponse optimisée : le CEM V (cf. AFOCO Paris, mai 2012)

• Révision de la norme béton NF EN 206-1

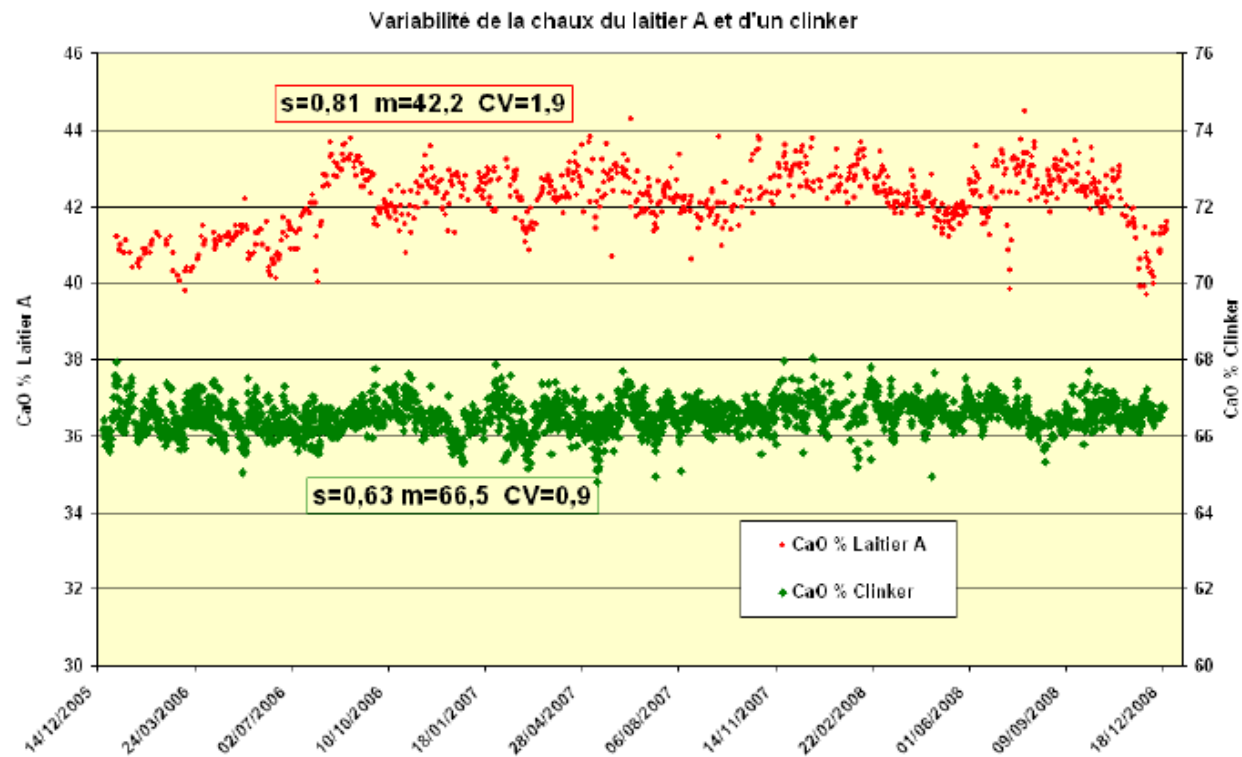
- Ø Les demandeurs du changement
- Ø Les modifications : avantages et inconvénients
- Ø Analyse des modifications
- Ø Conclusions sur les modifications

Conclusions et sens de l'histoire

2. Formulation amont vs mélange aval

2.1. Variabilité du laitier

Variabilité des laitiers : LAITIER A

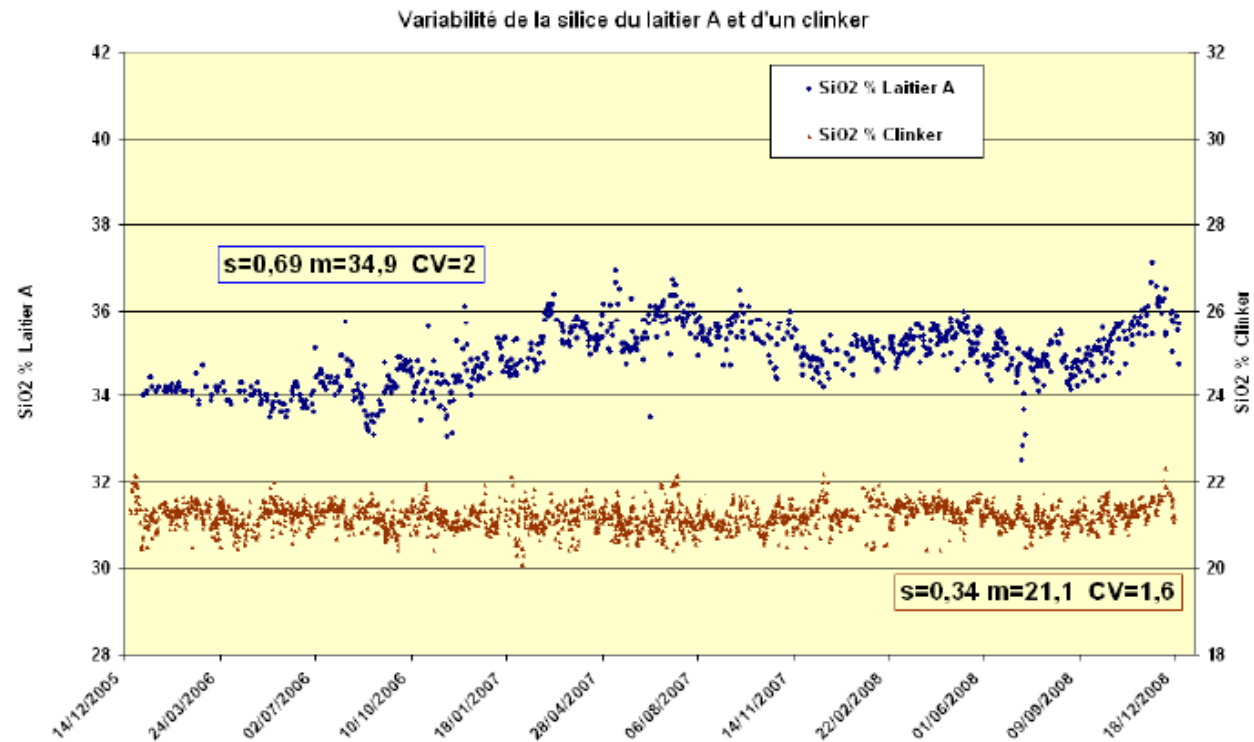


Tout en étant d'une relative stabilité, le % de CaO du laitier est plus variable que celui d'un clinker

2. Formulation amont vs mélange aval

2.1. Variabilité du laitier

Variabilité des laitiers : LAITIER A

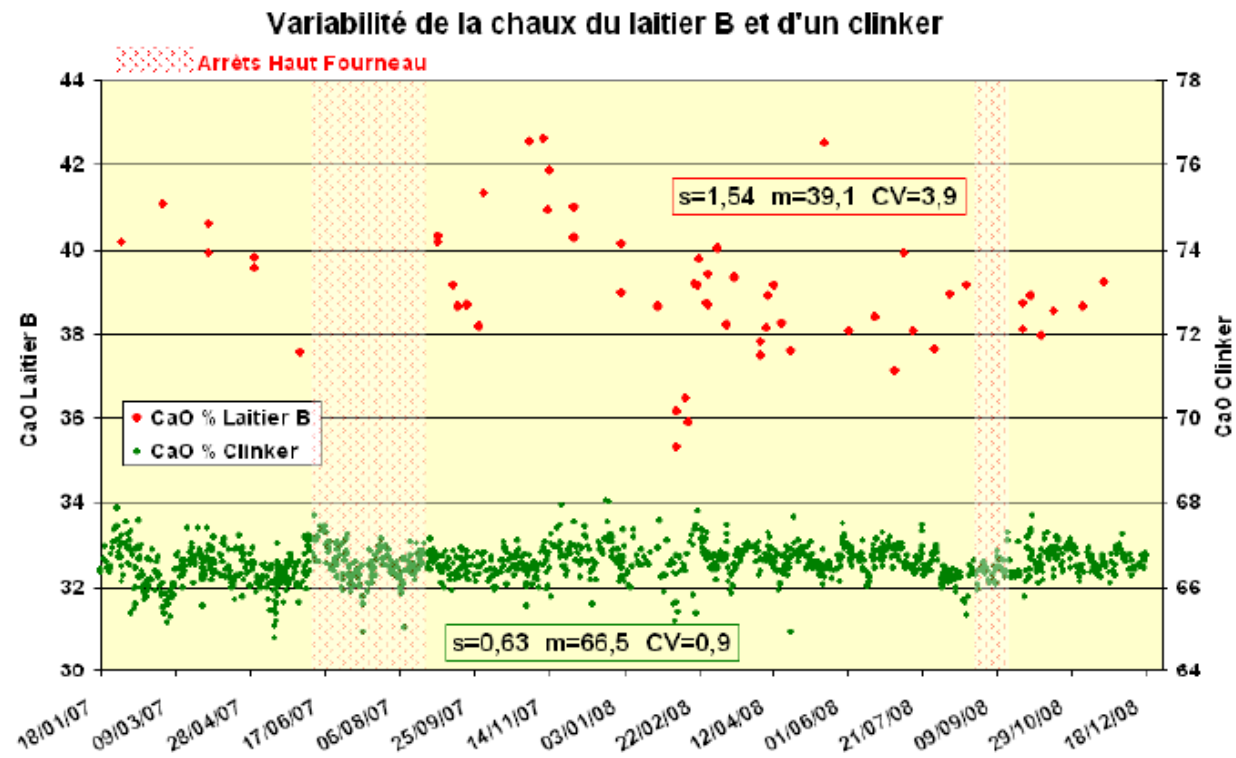


Le %SiO₂ du laitier est relativement stable sur la période dec 05 – jan 07 et devient plus variable ensuite, par comparaison avec celui d'un clinker.

2. Formulation amont vs mélange aval

2.1. Variabilité du laitier

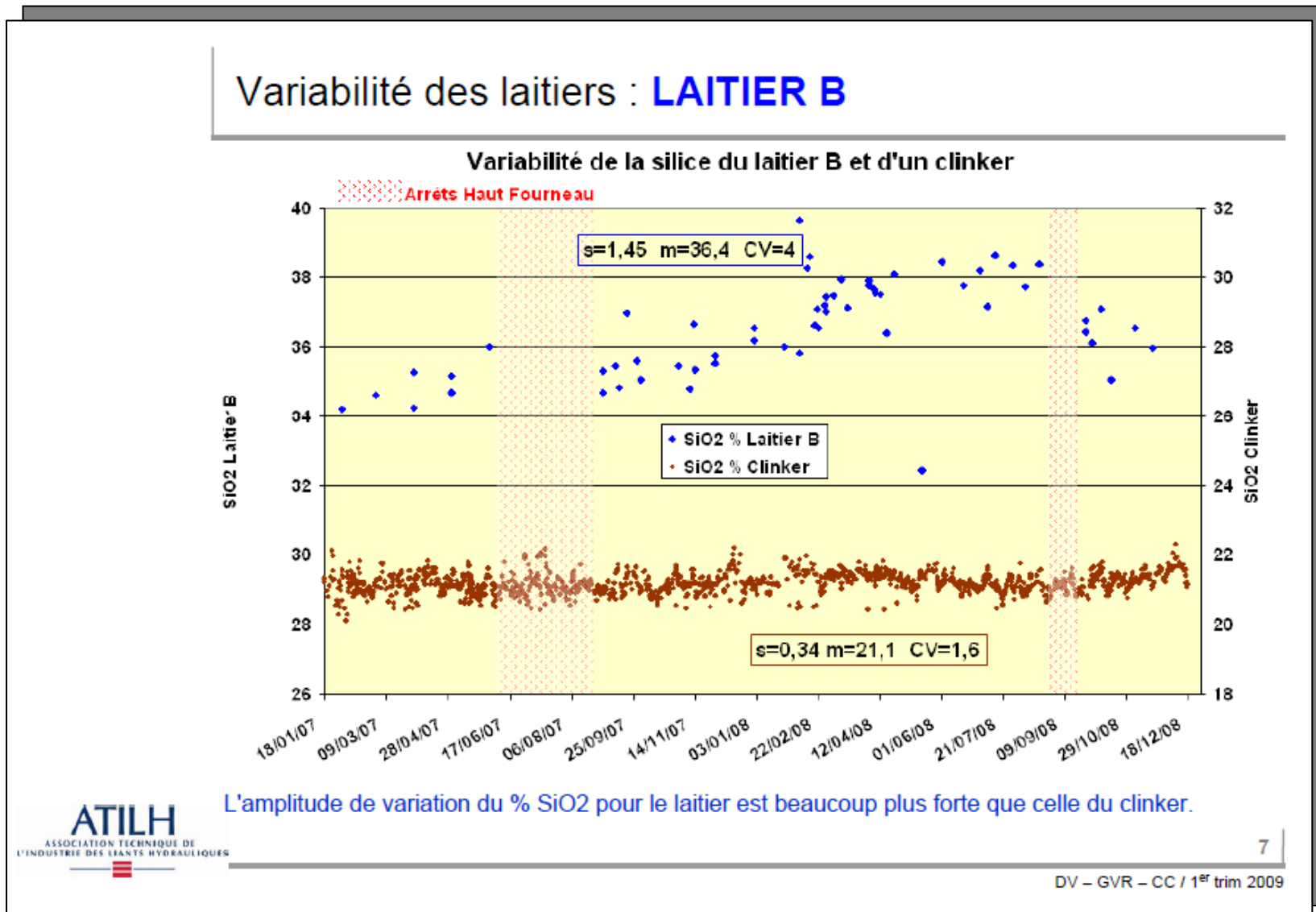
Variabilité des laitiers : LAITIER B



L'amplitude de variation du % CaO pour le laitier est beaucoup plus forte que celle du clinker.

2. Formulation amont vs mélange aval

2.1. Variabilité du laitier



2. Formulation amont vs mélange aval

2.1. Variabilité du laitier

- **Trois causes principales :**

- **Variabilité liée à la sidérurgie**

- Matières premières et combustibles : charbons, minerais, ilménite (titane), castine...
- Régime de marche du haut-fourneau

Exemple : modification des formulations Dunkerque pour réduction de 30% de la production de fonte.

- **Variabilité liée à l'âge**

- Variation de la production (cycles conjoncturels, revamping ou ajustements structurels)
- Modes de stockage

Exemple : surproduction à Dunkerque du fait de la fermeture de Liège et de Florange débouchant sur un stock de laitier granulé de plus d'un million de tonnes.

- **Variabilité liée au sourcing**

- Importations : différentes sources, donc différentes qualités

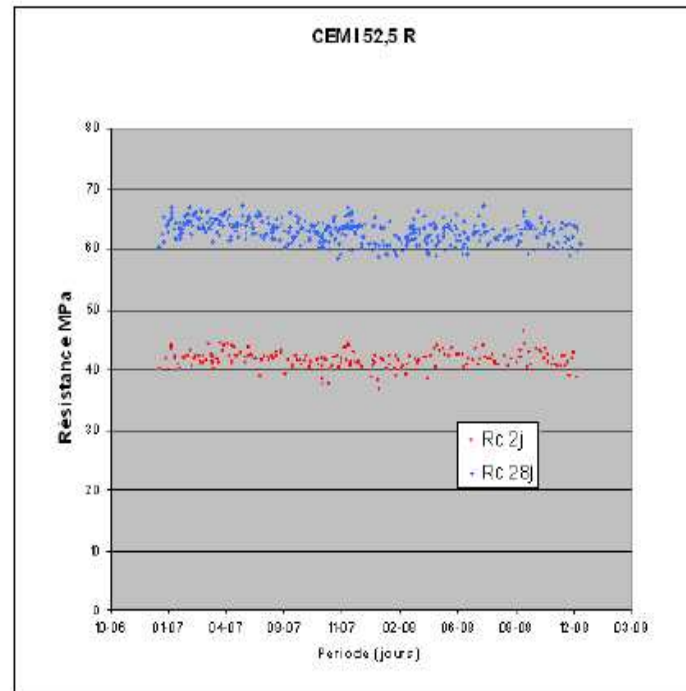
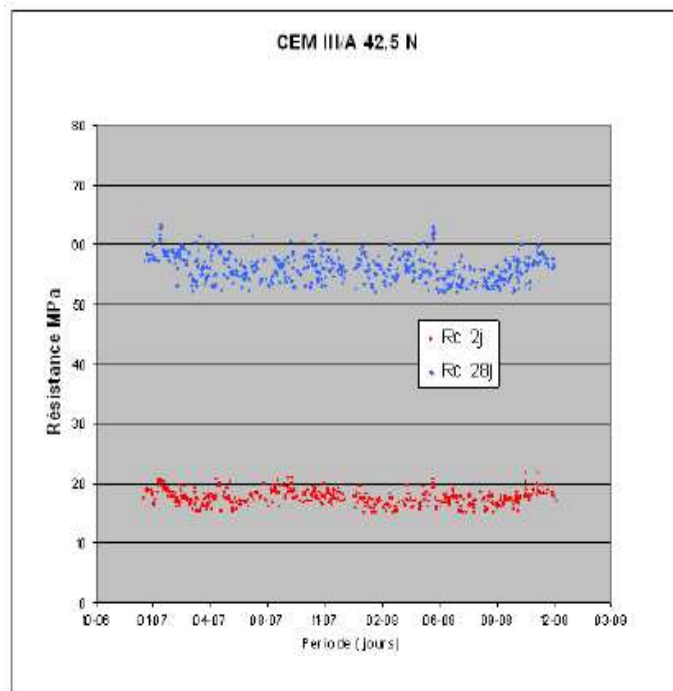
Exemple : crise économique 2009-2010 ayant débouchée sur une chute du marché du ciment de -18% et du marché de l'acier de -45%, d'où pénurie de laitier et importations massives des cimentiers (Canada, Mexique, Italie, Algérie,...) afin de maintenir la production de leurs gammes.

Seul le process cimentier, par une parfaite maîtrise de la qualité de ses produits, est en mesure de tamponner les variabilités du laitier par l'adaptation de sa formulation. En revanche, le mélange aval ne dispose pas d'actionneurs pour compenser cette variabilité, son seul levier est de réduire le laitier et de surdoser le CEM I (qui reste régulier toute l'année), provoquant ainsi une augmentation des émissions de CO₂.

2. Formulation amont vs mélange aval

2.1. Variabilité du laitier

Comparaison qualité CEM I / CEM III



Durant l'année 2008, on maintient la qualité des CEM I 52,5 R et CEM III/A 42,5 N

- Les Rc 2 jours et Rc 28 jours restent stables et régulières (mesurées sur mortier ISO)

Synthèse :

- ➔ la formulation amont permet de maîtriser la variabilité des composants
- ➔ le laitier n'est pas du ciment : cf Rc 2j et 28j

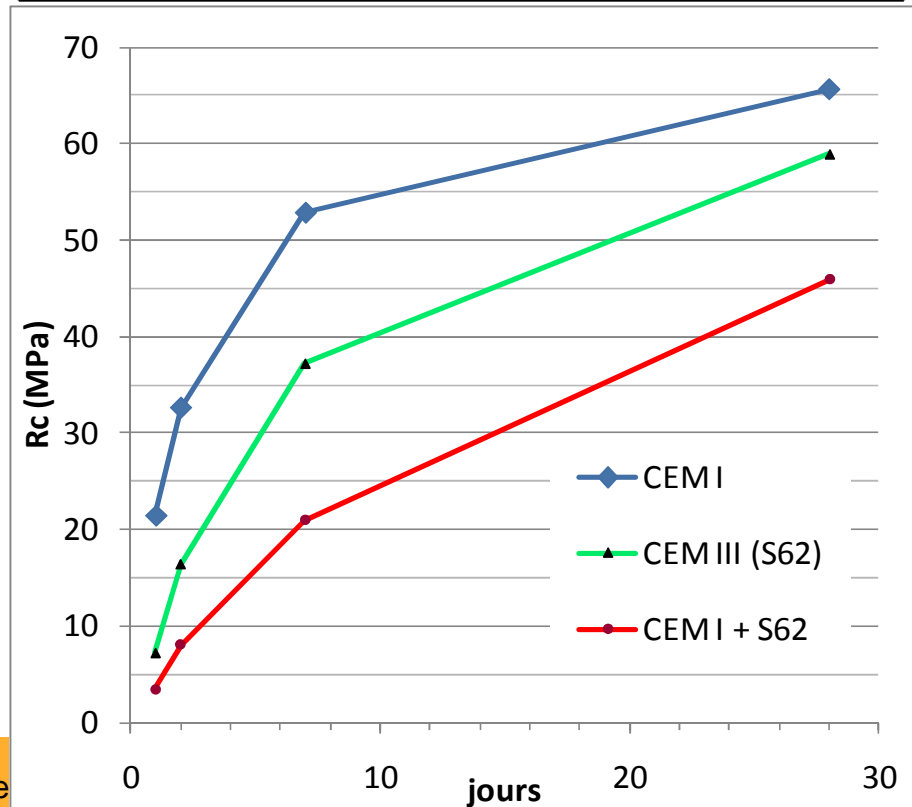
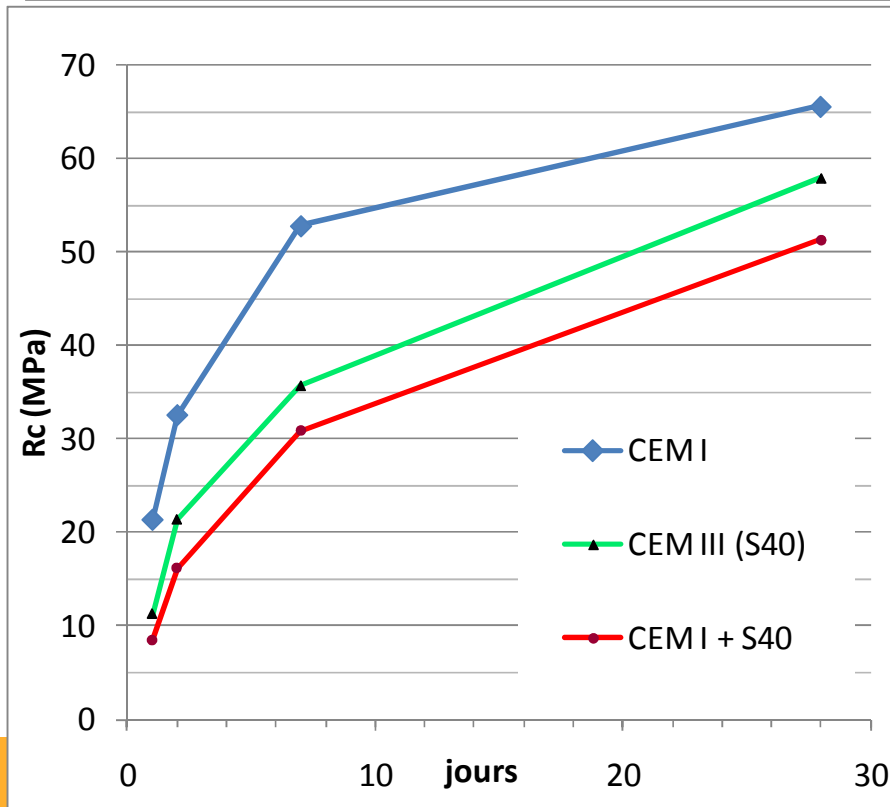
2. Formulation amont vs mélange aval

2.2. Performances comparées

Comparaison amont / aval (ciment 1 – laitier 1) (à compositions identiques)

<u>Amont :</u>		
CEM III/A 52,5 L (S40)	SSB CEM III	3565 cm²/g
	SSB clinker	3375 cm²/g
	SSB laitier	3850 cm²/g
<u>Aval :</u>		
60% CEM I 52,5 N	SSB CEM I	3445 cm²/g
40% Laitier 1	SSB laitier	3850 cm²/g
	SSB mélange	3610 cm²/g

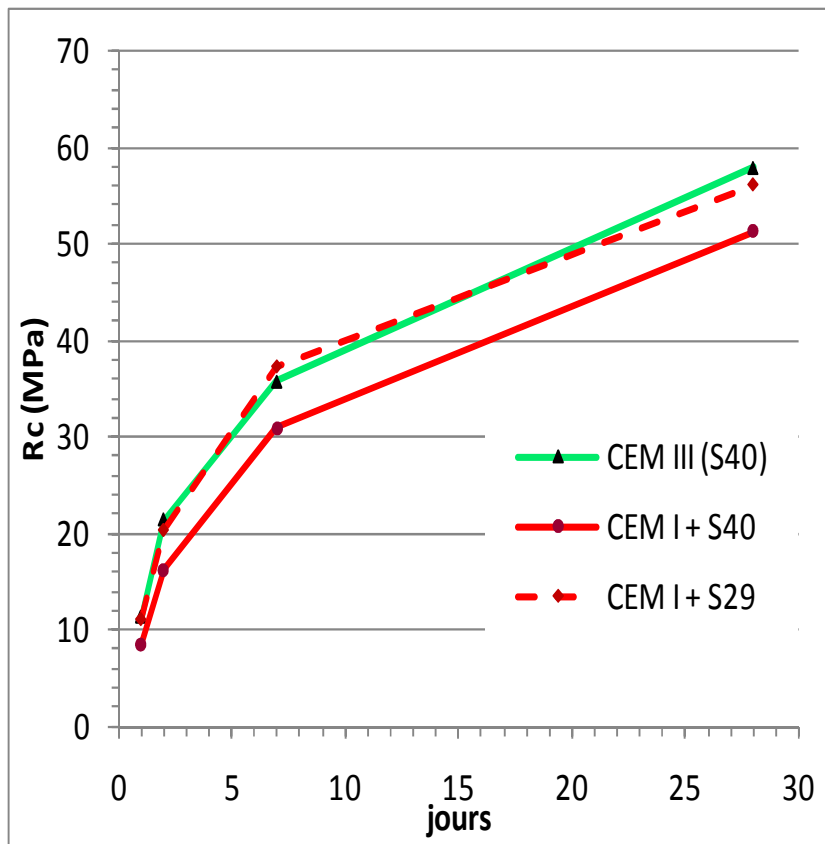
<u>Amont :</u>		
CEM III/A 52,5 L (S62)	SSB CEM III	4060 cm²/g
PM-ES	SSB clinker	4400 cm²/g
	SSB laitier	3850 cm²/g
<u>Aval :</u>		
38% CEM I 52,5 N	SSB CEM I	3445 cm²/g
62% Laitier 1	SSB laitier	3850 cm²/g
	SSB mélange	3695 cm²/g



2. Formulation amont vs mélange aval

2.2. Performances comparées

Comparaison amont / aval (ciment 1 – laitier 1) (à résistances équivalentes)



CEM III/A 52,5 L (S40)

A performance équivalente, l'introduction au malaxeur conduit à une surconsommation de CEM I (clinker)

Laitier 40 - Clinker 60

Laitier 29 - Clinker 71

soit 18% de clinker en plus

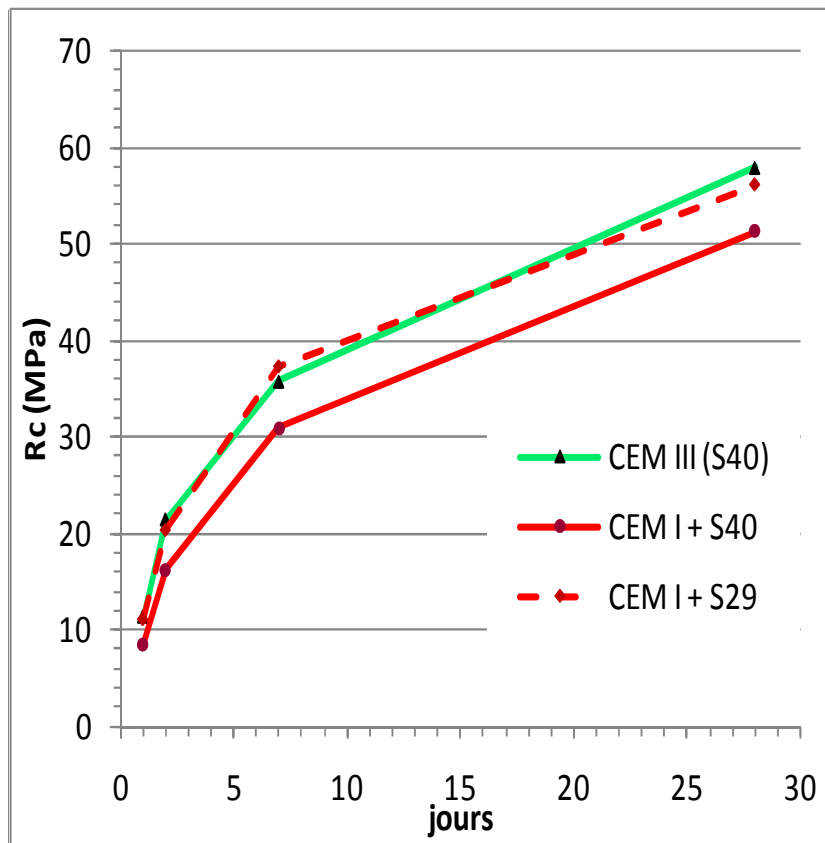
Synthèse :

L'augmentation du taux d'ajout en aval : ➡ entraîne la surconsommation croissante du clinker, d'où une augmentation des émissions de CO₂.

2. Formulation amont vs mélange aval

2.2. Performances comparées

Comparaison amont / aval (ciment 1 – laitier 1) (à résistances équivalentes)



CEM III/A 52,5 L PM-ES(S62)

Sans atteindre la performance à 28 jours du CEM III, l'introduction au malaxeur conduit à une surconsommation de CEM I (clinker)

Laitier 62 - Clinker 38

Laitier 35 - Clinker 65

soit 71% de clinker en plus

Synthèse

L'augmentation du taux d'ajout en aval : ➡ entraîne la surconsommation croissante du clinker
➡ a un effet amplificateur sur émissions de CO₂.

2. Formulation amont vs mélange aval

2.3. Bilan CO₂

Exemple de la production de la Cimenterie du Havre en 2009

AMONT Cimenterie du Havre	Vente 2009 (kt)	Clinker (kt)	Additions (kt)	Taux d'additions (%)
CEM III 52,5 L/A (S40) Vrac	97,0	58,2	38,8	40%
CEM III 52,5 L/A (S40) Sac	79,0	47,4	31,6	40%
CEM III 52,5 L/A PM-ES	312,0	118,6	193,4	62%
TOTAL	488,0	224,2	263,8	

Emission de CO ₂ (kt)
44,6
36,3
90,8
171,7

Base : 766 kg de CO₂ par tonne de clinker produite

Calcul à résistance équivalente de la même production en mélange aval

AVAL Mélange équivalent	Tonnage équivalent (kt)	CEM I (kt)	Additions (kt)	Taux d'additions (%)
Ciment + laitier	97,0	68,9	28,1	29%
Ciment + laitier	79,0	56,1	22,9	29%
Ciment + laitier	312,0	202,8	109,2	35%
TOTAL	488,0	327,8	160,2	

Emission de CO ₂ (kt)
52,8
43,0
155,3
251,1

% d'additions à résistance jeune âge équivalente (hors limite de l'EN 206-1 k=0,9 et limite 30% add)

- BPE élévation, 10 à 12 MPa/1j
- Sac, 8 à 10 MP/1j
- BPE enterré, 5 à 8 MPa/1j

Différence d'émission de CO₂ : - 79,4 kt, sur une seule usine entre formulation cimentière amont et mélange additions aval au malaxeur

2. Formulation amont vs mélange aval

2.3. Bilan CO₂

Les gains CO₂ liés à la formulation Amont en cimenterie

Sur la seule cimenterie du Havre : 80 kt/an d'économie de CO₂.

Extrapolation sur les 33 cimenteries en France :

- 12 cimenteries (dont le Havre) pourraient développer une gamme CEM III ou CEM V, soit 55 kt de gain de CO₂ en moyenne par unité → **660 kt de CO₂**.
- 21 cimenteries pourraient développer des CEM II plus fortement dosés en additions, soit 15 à 20 kt de gain CO₂ en moyenne par unité → **360 kt de CO₂**.

↪ **Soit un gain de CO₂ estimé, entre AMONT et AVAL, à environ 1 000 000 tonnes (2009, année de crise économique)**

**Gain de CO₂ potentiel estimé en conjoncture normale en France :
1 000 000 à 1 500 000 tonnes par an**

**Gain de CO₂ potentiel estimé en conjoncture normale sur l'Europe :
8 000 000 à 12 000 000 tonnes par an**

2. Formulation amont vs mélange aval

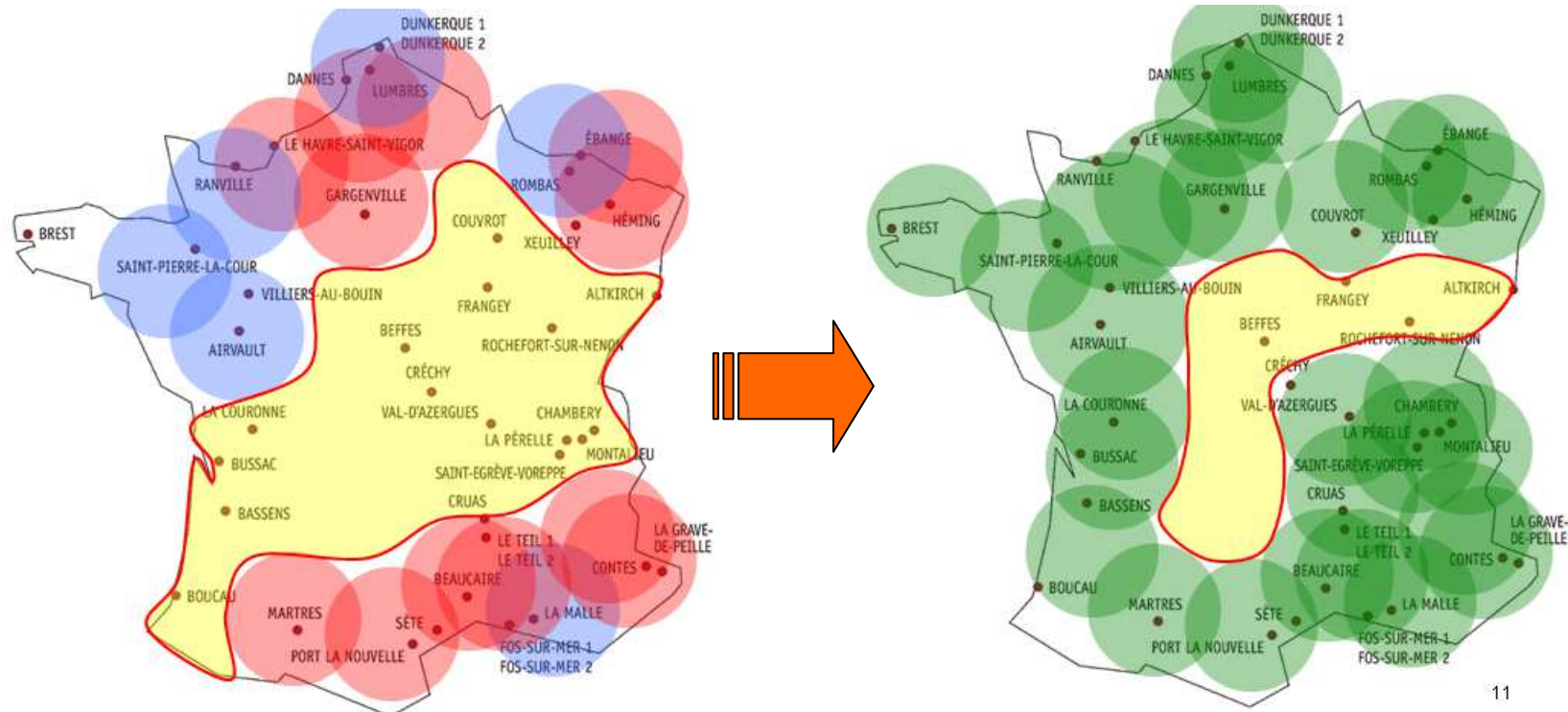
2.4. La réponse optimisée : le CEM V (clinker / laitier / cendres)

Complémentarité	Laitiers	Cendres
Chaleur d'hydratation	Diminue	Diminue
Maniabilité des bétons frais	Pénalise	Améliore
Demande en eau	Ne garde pas l'eau (percolation)	Garde trop d'eau (hydrophile)
Prise	Propriétés hydrauliques à partir de 7 jours	Propriétés pouzzolaniques à partir de 25 jours
Impact de la variabilité	Très fort	Limité
Couleur	Claire	Sombre





Rappel : seul le clinker permet l'activation des additions

2. Formulation amont vs mélange aval

2.4. La réponse optimisée : le CEM V (clinker / laitier / cendres)



La complémentarité tri-composants (CEM V) en amont en cimenterie existe déjà sur quelques unités. Leur extension, voire leur généralisation, n'implique pas d'adaptation majeure du dispositif cimentier

-  Zone laitier (CEM II - CEM III)
-  Zone cendres (CEM II)
-  Zone laitier et cendres CEM II - CEM III - CEM V
-  Zone sans additions laitier ou cendres

2. Formulation amont vs mélange aval

2.4. La réponse optimisée : le CEM V (clinker / laitier / cendres)

EXIGENCES		CEM I + laitier	CEM III	CEM V
		Mélange BPE	Formulation cimentière	
Techniques	Performance	-	++	+++
	Facilité mise en œuvre	--	+	+++
	Qualité mise en œuvre	--	+	+++
Maîtrise variabilité	Qualité	---	+	+++
	Sourcing	---	-	++
Logistique		---	-	++
Environnement	Economie ressource	+	++	+++
	Emissions CO ₂	+	++	+++

Sommaire

1. Le béton : contexte, objectifs, solutions

1. Le cadre légal et les exigences des autorités
2. Les attentes du marché
3. Les réponses du béton
4. Les conditions des réponses

2. La formulation amont comparée au mélange aval

1. Variabilité du laitier (cf. AFOCO Marseille, mai 2011)
2. Performances comparées (cf. AFOCO Marseille, mai 2011)
3. Bilan CO₂ (cf. AFOCO Paris, mai 2012)
4. La réponse optimisée : le CEM V (cf. AFOCO Paris, mai 2012)

• Révision de la norme béton NF EN 206-1

- Ø Les demandeurs du changement
- Ø Les modifications : avantages et inconvénients
- Ø Analyse des modifications
- Ø Conclusions sur les modifications

Conclusions et sens de l'histoire

3. Révision de la norme béton NF EN 206-1

3.1. Les demandeurs du changement

- **CTPL (Centre Technique de Promotion des Laitiers) et Ecocem (70% Ecocem Materials – 30% ArcelorMittal) :**
 - investissement dans un broyeur à laitier sur le site de Fos-sur-Mer
 - recherche de débouchés commerciaux
- **Les grandes entreprises du bâtiment via la FNTP :**
 - ouvrage d'art ne nécessitant pas de décoffrage à 16h (20% du marché béton)
 - dont problématique de la maîtrise de la chaleur d'hydratation (environ 5%)

3. Révision de la norme béton NF EN 206-1

3.2. Les modifications : avantages et inconvénients

- **Les fondamentaux techniques de la norme n'ont pas été modifiés :**
 - le laitier conserve un $k = 0,9$ (en France)
 - maintien du taux maximum d'addition à 30% en mélange avec un CEM I
- **Les modifications de la norme :**
 - Le mélange CEM II/A (maximum : 18% additions) + 20% d'addition maximum devient possible
 - Exception : béton d'ingénierie (taux maximum d'addition : 50%) pour répondre aux demandes des grandes entreprises et sous condition d'application (contrôles très renforcés)
 - **Avantages :**
 - Répondent à la demande des grandes entreprises sur les exigences de faible chaleur d'hydratation (5% du marché)
 - Apportent une réponse commerciale à Ecocem (70% Ecocem Materials - 30% ArcelorMittal)
 - **Inconvénients :**
 - Ne répondent pas aux exigences environnementales
 - Augmentent le risque de variabilité au niveau du béton et donc remettent en cause les exigences en termes de qualité et de garanties

Synthèse

Toutes les études ont confirmé la pertinence du socle technique de la norme.

3. Révision de la norme béton NF EN 206-1

3.3. Analyse des modifications

Utilisation des laitiers de HF Formulation en Cimenterie ou Mélange en BPE

AMONT / FORMULATION CIMENTIERE

LA FORMULATION CIMENTIERE COMPENSE LA VARIABILITE DES ADDITIONS

TAUX D'ADDITIONS SUPERIEUR RESISTANCE IDENTIQUE AU DECOFFRAGE (12 A 16 H)

- Effet de pré-mélange en cimenterie
- Pas de k en amont
- Adaptation de la finesse clinker
- Adaptation de la chimie
- Optimisation des additions disponibles par les ciments tri-composants (ex CEM V)

LISSAGE DES VARIATIONS CONJONCTURELLES : Stabilité des formules

OPTIMISATION ECONOMIQUE

DIMINUTION DES EMISSIONS DE CO₂
ECONOMIE RESSOURCES NATURELLES

AVAL / MELANGE BPE

LE MELANGE BETON SUBIT LA VARIABILITE DES ADDITIONS

SURDOSAGE EN CIMENT
RESISTANCE IDENTIQUE AU DECOFFRAGE

- Uniquement malaxage 45s
- Gaspillage additions par effet K
- Qualité figée du CEM I local
- Pas d'additionneurs chimiques hors adjuvants du béton
- Pas de possibilité de béton tri-composants

NECESSITE MODIFIER LES FORMULES SELON VARIATIONS CONJONCTURELLES

SURCOUTS A TERME

AUGMENTATION DES EMISSIONS DE CO₂

Synthèse

L'analyse des impacts des modifications de la norme confirme le diagnostic général réalisé sur les avantages indiscutables de la formulation amont comparée au mélange aval.

3. Révision de la norme béton NF EN 206-1

3.4. Conclusions sur les modifications

- **Les risques liés à la demande de passage de 30% à 50% de laitier sur les bétons d'ingénierie :**

- Confusion entre laitier et ciment :

- Le laitier moulu est un déchet broyé, le ciment est une formulation industrielle maîtrisée
- Le laitier ne s'auto-active pas seul, il requiert l'activation apportée par le ciment (chaux et portlandite)



Le laitier n'est pas du ciment.

- Difficultés sur chantier à anticiper la variabilité du laitier en mélange aval



Les non-conformités seront détectées et subies après coulage.

- En cas de sinistre, difficultés à identifier les responsabilités :



Qui est responsable ?

- **Le cimentier qui aura fourni le CEM I ?**
- **Le bétonnier qui aura fourni le béton ?**
- **Le fournisseur de laitier qui aura fourni le laitier moulu ?**

Conclusions et sens de l'histoire

- **Les bétons de demain doivent répondre aux enjeux et exigences futures :**
 - Enjeux liés au réchauffement climatique et à la maîtrise de la ressource :
 - Valorisation des déchets et coproduit
 - Economie de la ressource
 - Maîtrise des émissions CO₂

} Exigences des autorités et protection de la planète
 - Exigences et performances techniques croissantes
 - Liberté des formes
 - Allègement des structures
 - Durabilité des ouvrages
 - Optimisation des chantiers
 - Réduction des coûts
 - Construction pérenne sans désordre ni litige

} Demande du maitre d'ouvrage et de l'architecte

} Demande du maitre d'œuvre

} Assurances et investisseurs
- **La formulation amont et l'industrie cimentière présentent toutes les caractéristiques pour répondre tant aux enjeux de développement durable, qu'aux exigences techniques.**
- **Parmi les composants/ciments de demain, le CEM V offre les meilleures perspectives de valorisation des déchets et coproduits tout en assurant la mise en œuvre de leur qualité respective.**

Conclusions et sens de l'histoire

- **Les solutions de demain : une sophistication des techniques et une spécialisation des acteurs**
 - Les spécialistes concepteurs : porteurs des nouvelles exigences
 - Les spécialistes de l'innovation du béton et l'assemblage des composants
 - Le béton (béton auto plaçant, béton haute performance,...)
 - La préfabrication (blocs isolants, blocs allégés,...)
 - Les spécialistes des composants
 - Les ciments (ciments ultra hautes performances, ciments multi-composants,...)
 - Les adjuvants (adjuvants 3ème génération,...)
 - Les granulats (granulats recomposés, granulats recyclés,...)
- **Ces trois spécialistes sont les garants de l'évolution des techniques, de l'augmentation des performances et de la clarté des responsabilités.**

Le progrès est une affaire de spécialistes

Aérospatiale - Aéronautique - Automobile
Et aujourd'hui, la Construction.