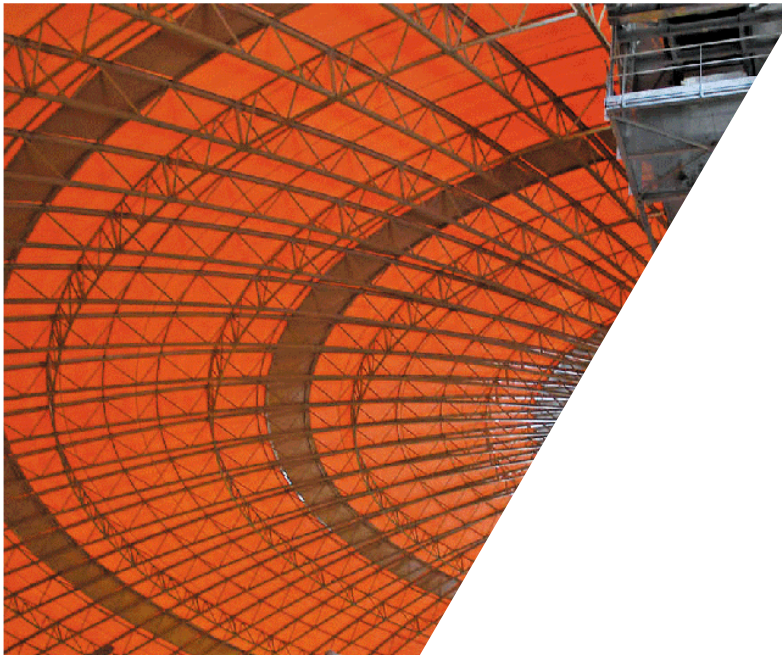




ULTIMAT[®], le nouveau ciment adapté aux attaques sulfatiques internes dans les bétons d'ouvrage d'art

CIMENT

Laetitia BESSETTE, VICAT, Ingénieur R&D

Ludovic CASABIEL, VICAT, Directeur Marchés Travaux Publics et Produits Techniques en vrac

Michel PASQUIER, VICAT, Directeur R&D

François HUE, VICAT, Responsable des études



GC'2013, Cachan

26 mars 2013

SOMMAIRE

- ▼ Problèmes des solutions actuelles et futures
- ▼ Développement d'un nouveau ciment : le ciment ULTIMAT®
- ▼ Partie expérimentale
 - ▼ Matériaux étudiés
 - ▼ Essais sur mortiers et bétons
- ▼ Résultats et discussions
 - ▼ Comparaison des caractéristiques mécaniques
 - ▼ Comparaison des ciments face à la RSI
- ▼ Conclusions

CIMENT

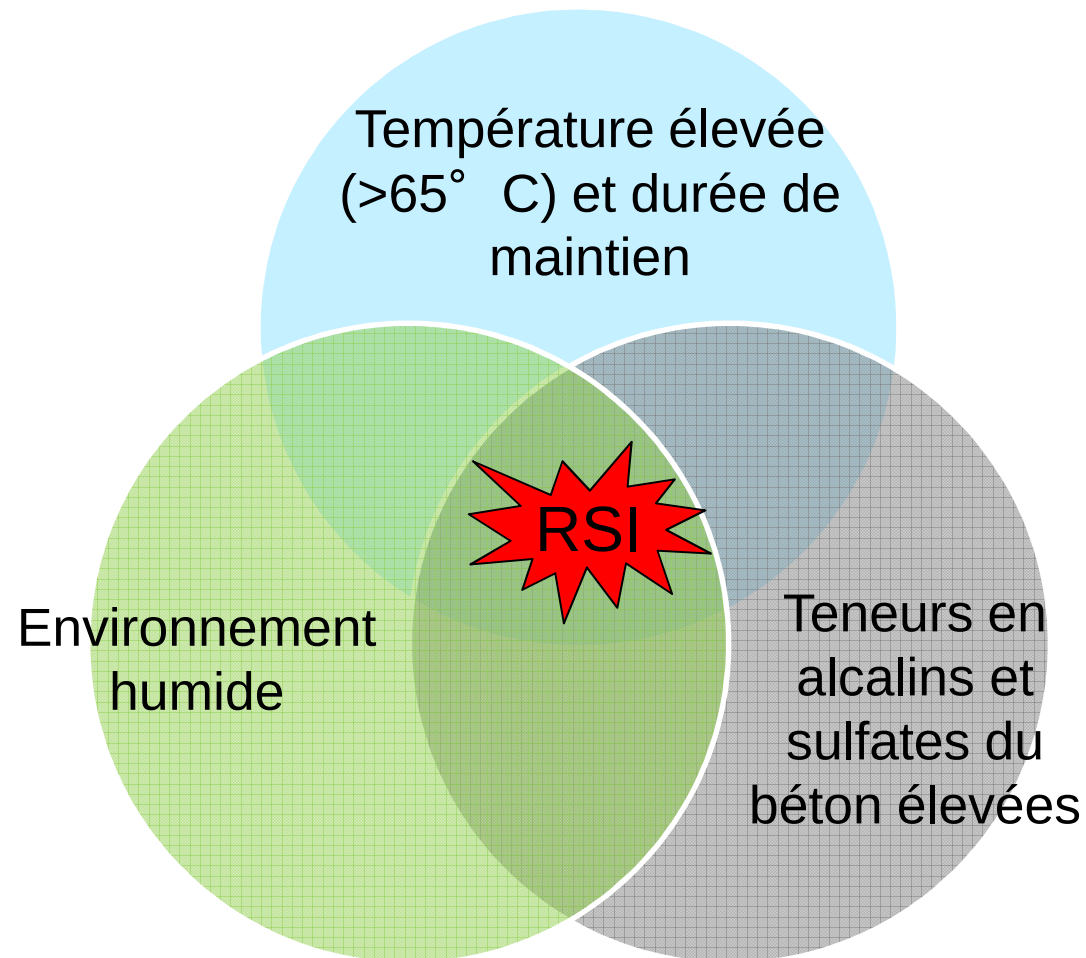
PROBLÈMES DES SOLUTIONS ACTUELLES ET FUTURES

- ▼ Les attaques sulfatiques, en particulier les réactions sulfatiques internes (RSI), sont un problème majeur de durabilité des bétons d'ouvrage d'art.

CIMENT

PROBLÈMES DES SOLUTIONS ACTUELLES ET FUTURES

- ▼ La formation de l'ettringite différée résultent d'une combinaison de plusieurs facteurs [Brunetaud 07] :



CIMENT

PROBLÈMES DES SOLUTIONS ACTUELLES ET FUTURES

CIMENT

- ▼ Actuellement, les recommandations pour limiter la RSI selon LCP 03 et LCP 07 sont :
 - ▼ L'utilisation de ciments à faible exothermie (à faible chaleur d'hydratation)
 - ▼ La maîtrise de la composition chimique du béton
 - ▼ Les ciments adaptés sont conformes aux normes NF P 15-317 et NF P 15-319 : limitation des teneurs en aluminat tricalcique C_3A et en sulfates SO_3
- ▼ Par conséquent, les solutions disponibles jusqu'à présent, étaient d'utiliser des ciments composés d'additions minérales.

PROBLÈMES DES SOLUTIONS ACTUELLES ET FUTURES

- ▼ Les additions minérales régulièrement utilisées pour les ouvrages d'art sont :
 - ▼ Les cendres volantes
 - ▼ Les laitiers de haut fourneau
- ▼ Cependant, ces additions ne répondent pas à toutes les problématiques d'ouvrage d'art, à savoir :
 - ▼ Cycle de coffrage/décoffrage rapide
 - => montée en résistance aux jeunes âges rapide
 - ▼ Ouvrages d'art soumis au gel et aux sels de déverglaçage [LCP 03]

CIMENT

PROBLÈMES DES SOLUTIONS ACTUELLES ET FUTURES

▼ Les préoccupations actuelles liées à l'environnement imposeront l'utilisation de granulats recyclés potentiellement réactifs qui risquent d'être chargés en sulfates :

▼ Thèse de Jérémie COLAS : étude de la valorisation des déblais de chantier de tunnels riches en sulfates

▼ Projet national RECYBETON

CIMENT

NOUVEAU CIMENT : ULTIMAT®

- ▼ Développement d'un nouveau ciment de type CEM I 52,5N PM ES CP2 pour répondre aux exigences suivantes :

- ▼ Résistant aux attaques sulfatiques
 - ▼ Qui permet un décoffrage rapide
 - ▼ Dans un environnement soumis au gel
- Le ciment ULTIMAT®

- ▼ Le ciment ULTIMAT® est doté d'une chimie particulière :

- ▼ Faible teneur en alcalins : $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = 0,5\%$ en moyenne
- ▼ Faible teneur en sulfates : $\text{SO}_3 = 1,7\%$ en moyenne
- ▼ Teneur en aluminat tricalcique $\text{C}_3\text{A} : 0\%$

CIMENT

NOUVEAU CIMENT : ULTIMAT[®]

▼ Teneur en aluminat tricalcique, C_3A :

Estimation par
le calcul

Relation mathématique selon Bogue et d'après la norme NF EN 197-1

$$C_3A_{\text{Bogue}} = 2,65 \times Al_2O_3 - 1,69 \times Fe_2O_3$$

Rq : les phases mineures et les solutions solides ne sont pas prises en compte [LEA'S].

Quantification
par DRX

Quantification par diffraction des rayons X et traitement par Rietveld

=> accès à la composition minéralogique réelle

$$C_3A_{\text{DRX}} = \text{teneur réelle}$$

CIMENT

NOUVEAU CIMENT : ULTIMAT®

▼ Caractéristiques physiques du ciment ULTIMAT®

	ULTIMAT
Blaine cm ² /g	4110
diamètre médian (µm)	11,3
début de prise (min)	244
Clarté	55
Demande en eau (%)	26,5
Chaleur à 41H (J/g)	256
chaleur à 120H (J/g)	275
Expansion à froid (mm)	1,0

Résistance en compression (MPa)		
2 jours	7 jours	28 jours
23,5	41,1	58,9

CIMENT

PARTIE EXPÉRIMENTALE

- ▼ L'objectif de l'étude est de comparer différents ciments utilisés dans des bétons d'ouvrages d'art en termes de propriétés mécaniques et de résistance aux sulfates.

- ▼ Matériaux étudiés :

CIMENT

Réf	1 - CEM I 52,5N PM ES	2 - CEM I 52,5N PM ES	3 - CEM III/B 42,5N PM ES	4 - CEM III/B 32,5N PM ES	ULTIMAT
Nature	CEM I 52,5N PM ES CP2		CEM III/B 42,5N PM ES	CEM III/B 32,5N PM ES	CEM I 52,5N PM ES CP2
Teneur en clinker	95 % minimum		27 % minimum	19 % minimum	95 % minimum
Teneur en laitier	0%		68%	76%	0%

PARTIE EXPÉRIMENTALE

CIMENT

▼ Matériaux étudiés :

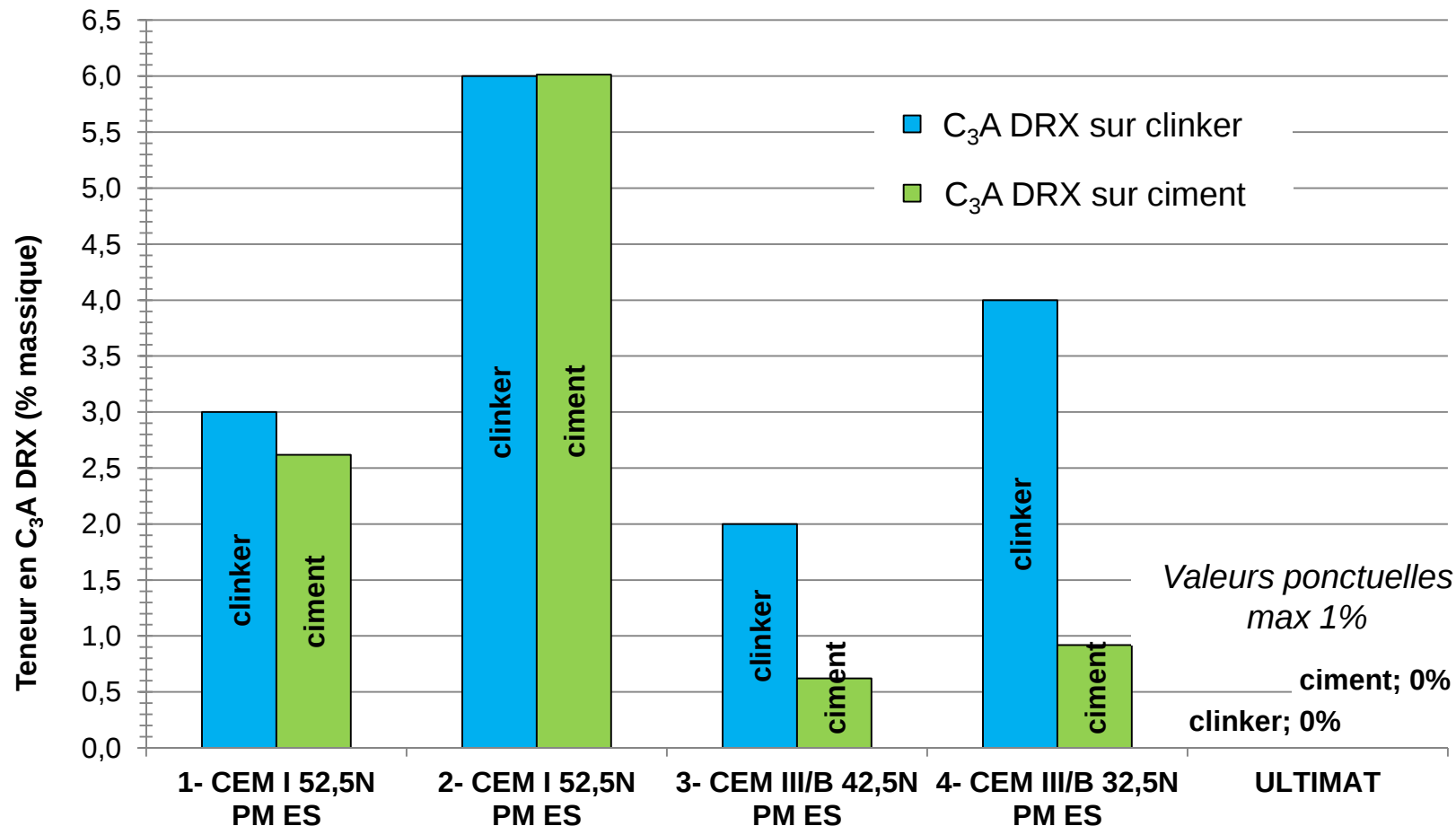
▼ Compositions chimique et minéralogique Eléments à surveiller pour lutter contre la RSI :

- ▼ Teneur en sulfates: SO_3
- ▼ Teneur en aluminat tricalcique: C_3A
- ▼ Teneur en alcalins: exprimée en équivalent Na_2O
$$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0,6589 \times \text{K}_2\text{O}$$

PARTIE EXPÉRIMENTALE

▼ Matériaux étudiés

▼ Teneurs en aluminates tricalcique réelles (DRX) :

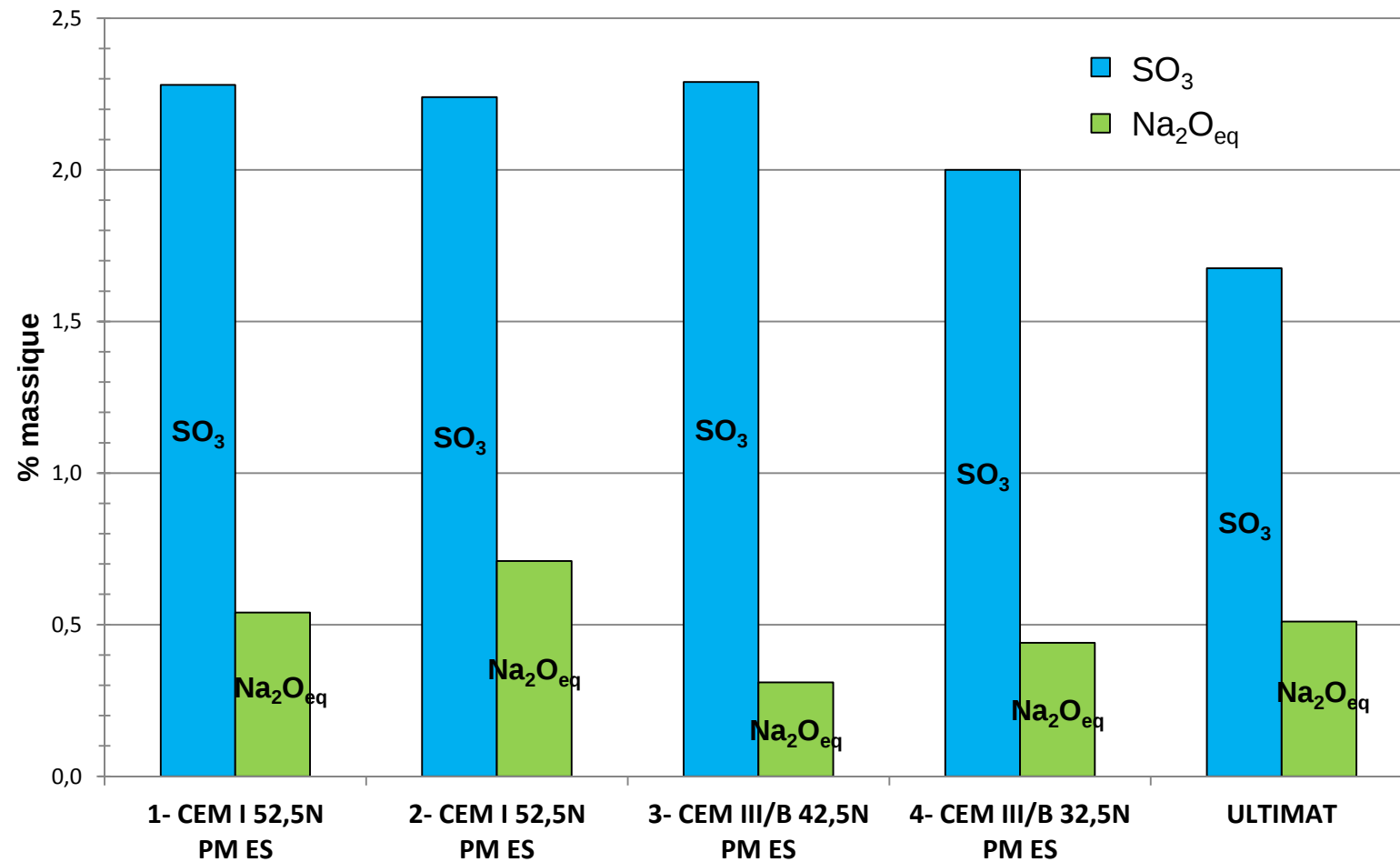


CIMENT

PARTIE EXPÉRIMENTALE

▼ Matériaux étudiés

▼ Teneurs en sulfates et alcalins



CIMENT

PARTIE EXPÉRIMENTALE

CIMENT

▼ Essais sur mortiers et bétons

▼ Caractéristiques mécaniques

(normes NF EN 196-1, NF EN 196-2, NF EN 196-9)

▼ Début de prise

▼ Chaleurs d'hydratation

▼ Résistances en compression à 2, 7 et 28 jours

PARTIE EXPÉRIMENTALE

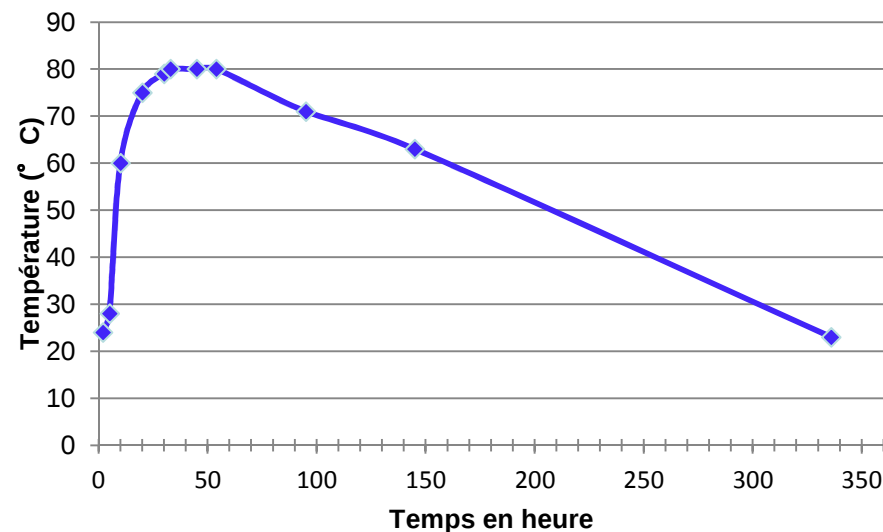
▼ Tests RSI selon la méthode LCP n° 66 :

▼ Compositions des bétons

(Normes NF EN 1008, NF EN 12350-1, NF EN 12390-1, NF EN 12390-2, NF EN 12620)

E/C	0,47
Ciment	424
eau totale	201
sable Palvadeau 0 / 0,315	98
sable Palvadeau 0,315 / 1	180
sable Palvadeau 1 / 4	189
sable Palvadeau 2 / 4	202
granulat Palvadeau 4 / 8	195
granulat Palvadeau 8 / 12,5	907

▼ Cycle d'échauffement du béton lors de l'essai RSI

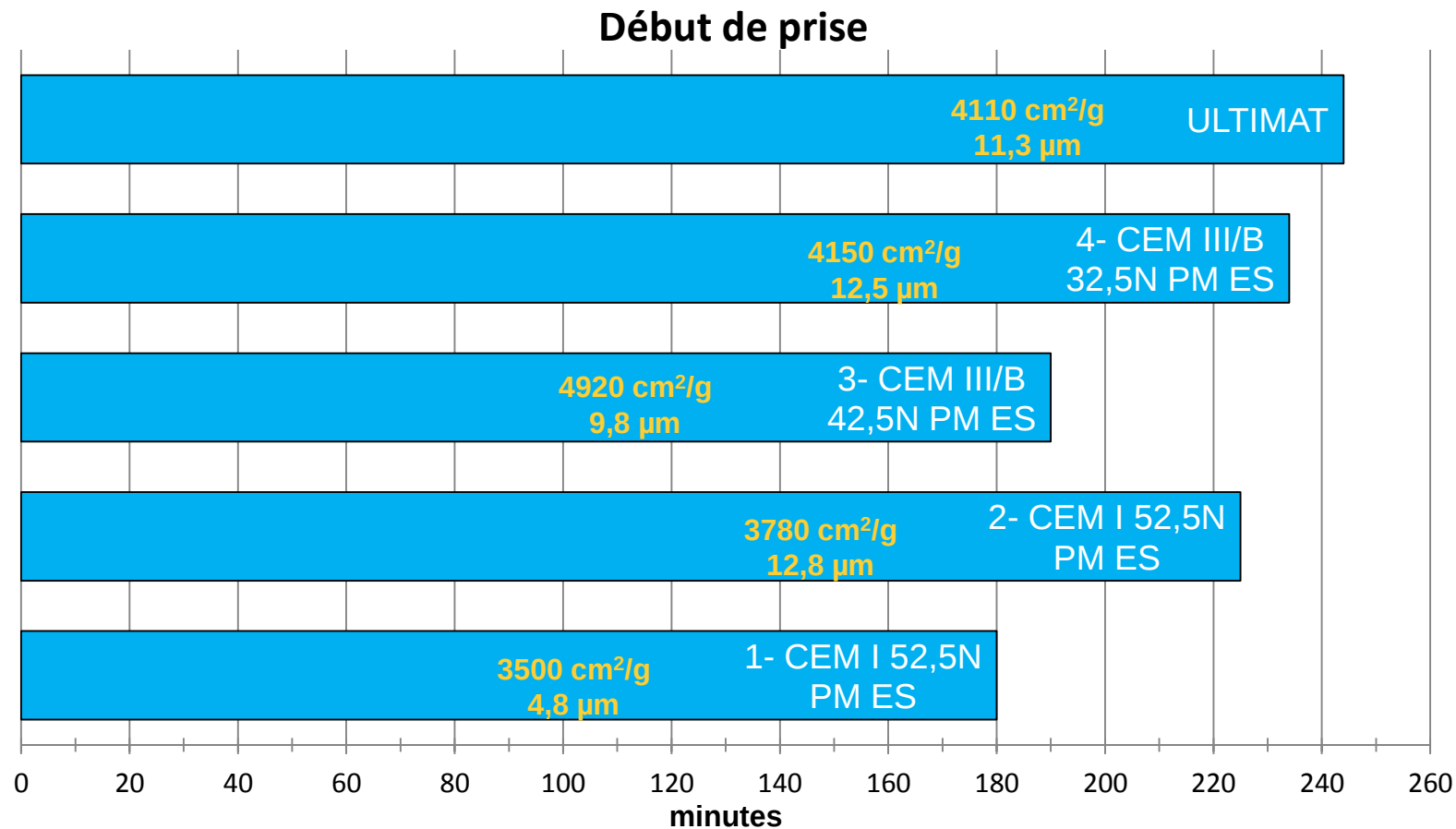


CIMENT

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

▼ Comparaison des caractéristiques mécaniques :

▼ Début de prise :

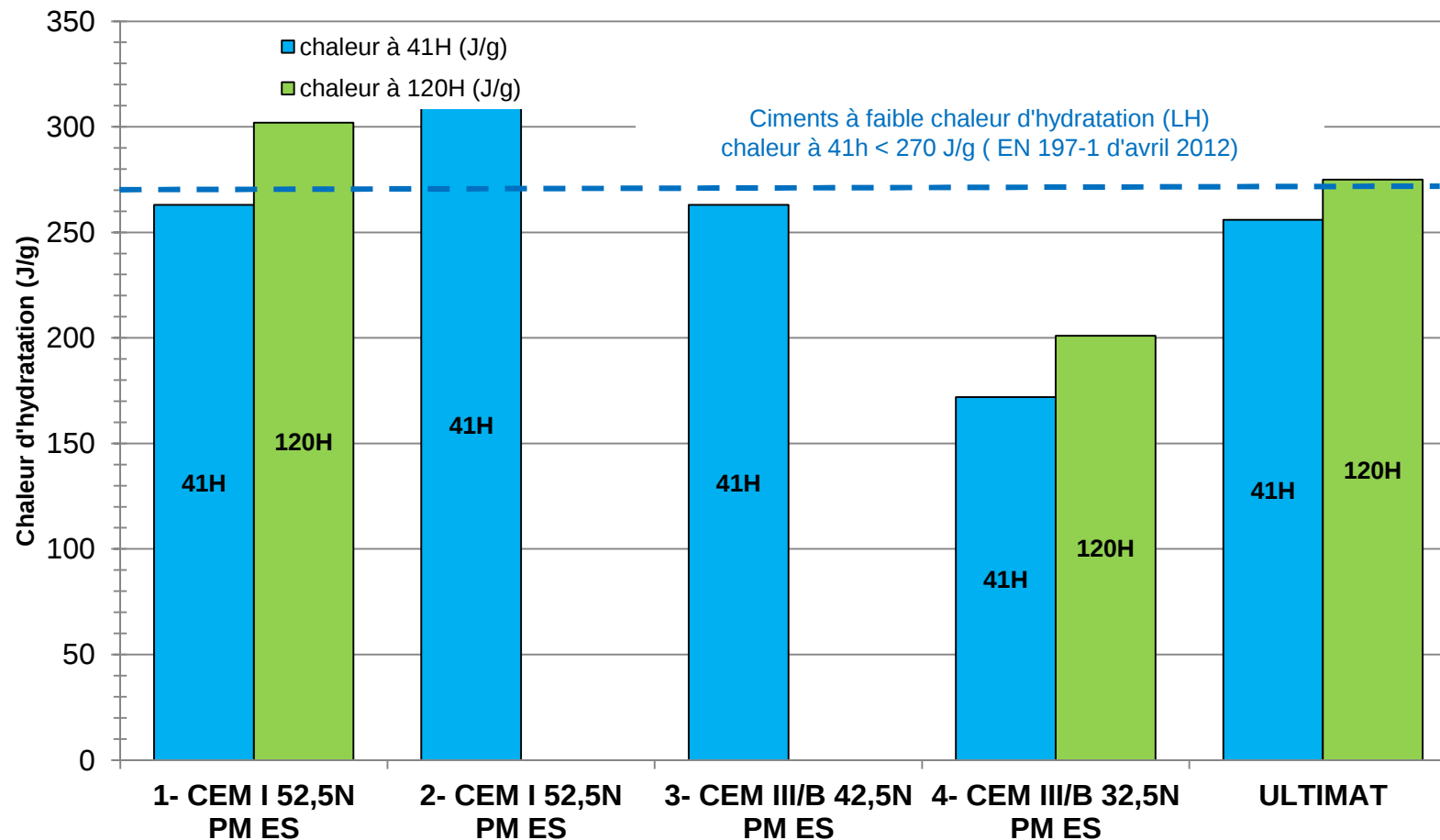


CIMENT

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

▼ Comparaison des caractéristiques mécaniques :

▼ Chaleurs d'hydratation :

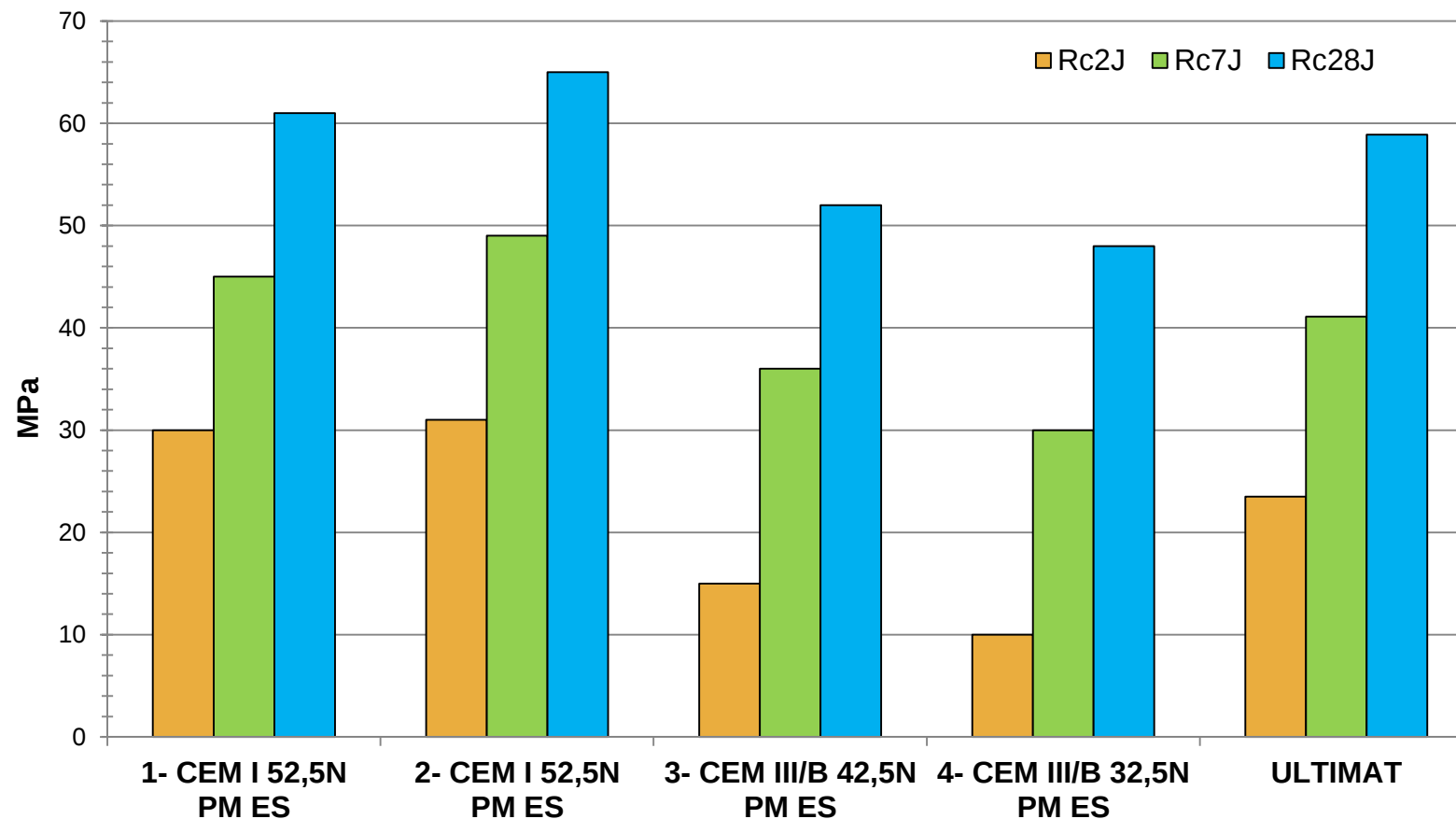


CIMENT

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

▼ Comparaison des caractéristiques mécaniques :

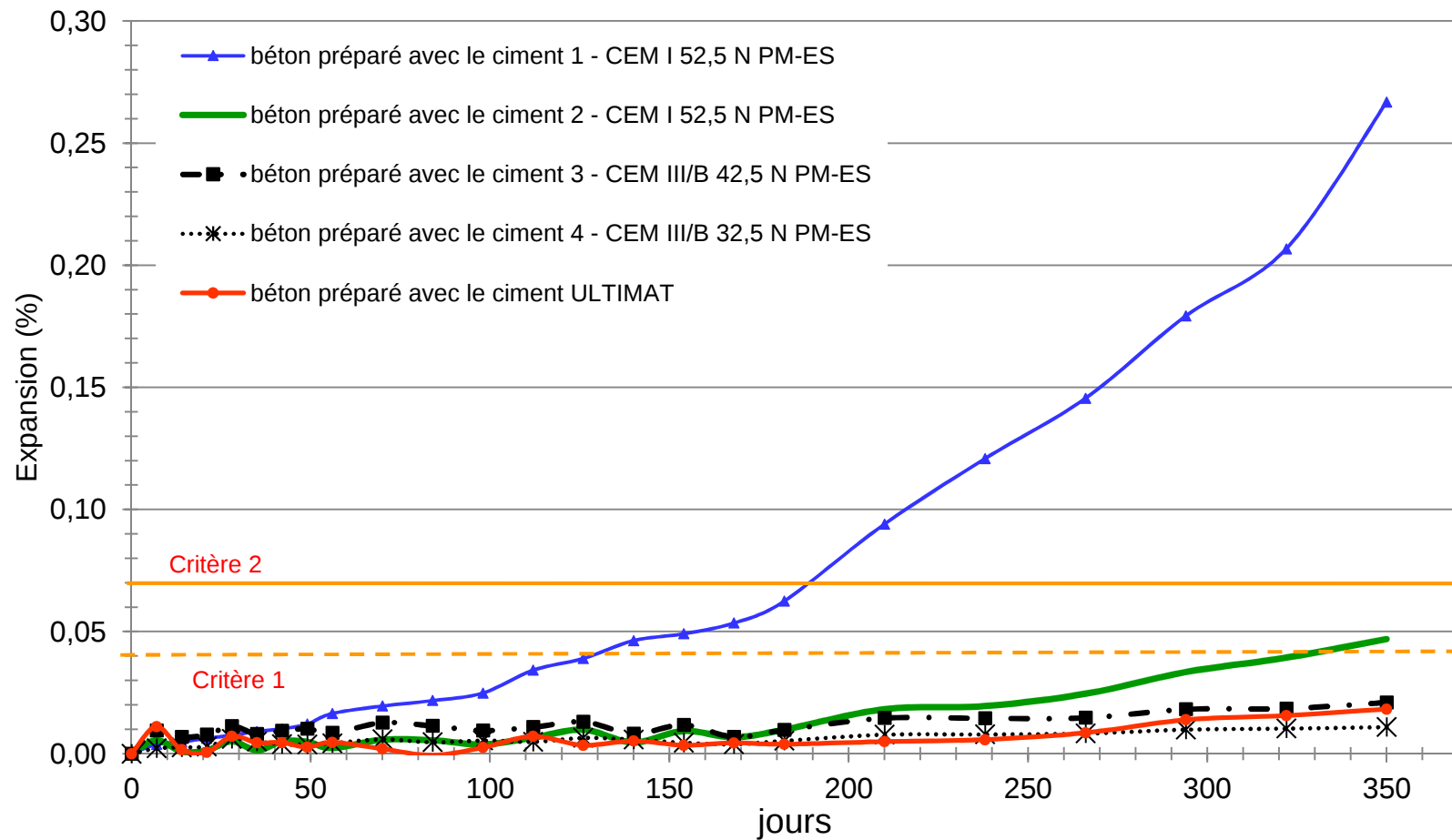
▼ Résistances en compression :



CIMENT

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

▼ Comparaison des ciments face à la RSI :



CIMENT

CONCLUSIONS

- ▼ Le ciment ULTIMAT® de type CEM I 52,5N PM ES CP2, est une réponse adaptée au besoin de durabilité des bétons d'ouvrages d'art, notamment face aux pathologies rencontrées dernièrement et face aux contraintes actuelles et futures d'exploitation, comme l'utilisation de granulats recyclés :
- ▼ ULTIMAT® permet un décoffrage rapide grâce à des performances mécaniques élevées aux jeunes âges,
- ▼ l'utilisation d'ULTIMAT® sera privilégiée et conseillée dans le cas des ouvrages soumis au gel et aux sels de déverglaçage,
- ▼ ULTIMAT® ne présente pas d'expansion lors de l'essai de réaction sulfatique interne grâce à des teneurs limitées en sulfates et en alcalins et une teneur nulle en C_3A Rietveld (DRX),

CIMENT



CONCLUSIONS

CIMENT

- ▼ La durabilité des bétons préparés avec le ciment ULTIMAT® est assurée, ce qui permet de réduire le coût global, prenant en compte les coûts d'investissement et les coûts d'entretien ainsi diminués.
- ▼ L'utilisation d'ULTIMAT® est d'autant plus variée qu'il répond à des problématiques réelles dans les domaines de la préfabrication, des ouvrages d'art (ponts, tunnels et pièces massives) et dans le domaine de la valorisation des terres polluées.
- ▼ Le ciment **ULTIMAT®**, **CEM I 52,5N CE PM-ES-CP2 NF** est classé selon la norme NF EN 197-1 d'avril 2012, **CEM I SR0** : ciment Portland résistant aux sulfates - teneur en C_3A du clinker = 0%



MERCI DE VOTRE ATTENTION

CIMENT



BIBLIOGRAPHIES

- Brunetaud 07 : BRUNETAUD X., LINDER R., DIVET L. ; “Effect of curing conditions and concrete mix design on the expansion generated by delayed ettringite formation”, *Materials and structures* vol. 40, n° 6, 2007, p. 567-578
- Escadeillas 07 : ESCADEILLAS G., AUBERT J., SEGERE M., & PRINCE, W., “Some factors affecting delayed ettringite formation in heat-cured mortars”. *Cement and Concrete Research* ,n° 37, 2007, p. 1445-1452
- LCP 03 : LCPC, *Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel*, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, 2003
- LCP 07 : LCPC, *Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne*, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, 2007
- LEA’S, Chemistry of Cement and Concrete, 4th Edition, edited by Peter C. Hewlett, chapitre 4 The constitution and Specification of Portland Cements, paragraphe 4.7 Calculation of the proportion of constituent minerals pages 154 à 155.
- Scrivener 93 : SCRIVENER K., TAYLOR H.F.M., « Delayed ettringite formation: a microstructural and microanalytical study”, *Advanced Cement Research*, n° 7, 1993, p. 375-377
- Taylor 01 : TAYLOR H.F.W., FAMY C., SCRIVENER K. « Delayed ettringite formation », *Cement and Concrete Research*, vol. 31, 2001, p. 683-693