

REX de la qualification des voussoirs de la ligne 15.E1 du GPE

Aux limites des approches performantielles XA3 sur béton de fibres métalliques

Baptiste LUZU – Responsable de Recherche et Développement – Eiffage Génie Civil



Contexte



- Réponse à l'Appel à projet lancé par la SGP pour ses nouveaux marchés en conception réalisation

- Objectif:

Améliorer l'empreinte carbone des voussoirs en BRFM mis en œuvre sur la L16.lot1

- 360 kg/m³ CEM III/A PM ES
- 40 kg/m³ de fibres métalliques
- GW100R5 (hors fibres métalliques)



Cahier des charges initial

Classe de résistance en compression	R _c 7h-50°C (MPa)	Consistance	Classe de résistance min en traction	Classe d'exposition	D _{max}	Niveau de prévention RSI	Dosage minimum L _{éq} (kg/m ³)	Dosage minimum en fibres métalliques (kg/m ³)
C40/50	15,0	S0/S1	4,0 c	XC3/XA3/XH3	22,4	Ds	351 → 300	40 → 30

Leviers de décarbonation:

- Ciment CEMIII/A PM ES → CEM III/B
- Dosage en ciment 351 kg/m³ (prescriptif + modulation D_{max})



300 kg/m³ (min approche performantielle XA3)

- Dosage en fibres métalliques 40 kg/m³ → 30 kg/m³

➔ Réalisation d'une approche performantielle à composition unique de niveau N3 pour la classe XA3 sulfates avec liant conforme FD P18-011

Les formules étudiées

Compositions (kg/m³)					
Formule	BRFM 300-35-0,9 AP	BRFM 300-30-0,9 AP	BA 300-0,9	Réf 1	Réf 2
CEM III/B 42,5N	300	300	300	-	-
CEM I 52,5N SR3 PM-CP2	-	-	-	415	360
Sable 0/4	1120	1120	1120	1030	1076
Gravillon 4/10	318	318	318	292	305
Gravillon 11.2/22.4	636	636	636	584	610
Superplastifiant	2,70 (0,9%)	2,70 (0,9%)	2,25 (0,75%)	0,62 (0,15%)	1,80 (0,50%)
Fibres métalliques	35,0	30,0	-	-	-
Fibres polypropylène	0,9	0,9	0,9	-	-
Paramètres de formulation					
Eau Efficace	111,0	105,0	105,0	145,1	126,0
Eau Totale	132,0	126,0	126,0	164,0	146,0
E/C	0,37	0,35	0,35	0,35	0,35
G/S	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
MV théorique	2520	2530	2490	2480	2460
Empreinte carbone					
Classe de réduction (FD P18-483-2)	GW100R5	GW100R5	GW100R5	GW100R0	GW100R0
Empreinte carbone + acier (kgCO ₂ eq/m³)	182,7	178,7	220,7	419,7	379,7

BRFM 300-35-0,9-AP

Étude - Programme

Nom	Avec TT	Rc _{7j}	Rc _{28j}	Rc _{90j}	Rc _{7jTT}	Rc _{28jTT}	Rc _{90jTT}	Rf _{TT}	Rf _{28jTT}	Rf _{90jTT}	Comptage des fibres	Module TT	Module 28j	Poro H ₂ O	Absorption	Résistivité	Cl ⁻ _{28j}	Cl ⁻ _{90j}	RSE 28j
NOM28,1- ₃₅		X	X	X					X		X		x	X	X	X			
NOM28,2- ₃₅		X	X	X					X		X		x	X	X	X			
NOM28,3- ₃₅		X	X	X					X		X		x	X	X	X			
NomTT28 ₃₅	X	X	X		X	X			X		X		X	X	X	X	X	X	X
TTNF ₃₅	X	X	X		X	X										X	X	X	
C ⁺ ₃₅		X	X						X		3							X	
C ⁻ ₃₅		X	X						X		3							X	X
E ⁺ ₃₅		X	X						X		3							X	X
E ⁻ ₃₅		X	X						X		X							X	
Nom90 ₃₅		X	X	X						X									
F ⁻ ₃₅		X	X						X		X								
F ⁺ ₃₅		X	X						X		X								
NomTT90 ₃₅		X	X	X	X	X	X			X									
NomTT7h ₃₅	X	X	X		X	X		X				X							

BRFM 300-35-0,9-AP

Étude - Programme

Focus Durabilité

Méthode
comparative
(liant conforme
FD P18-011)

Indicateurs généraux Absolue

Nom	Avec TT	Rc _{7j}	Rc _{28j}	Rc _{90j}	Rc _{7jTT}	Rc _{28jTT}	Rc _{90jTT}	Rf _{TT}	Rf _{28jTT}	Rf _{90jTT}	Comptage des fibres	Module TT	Module 28j	Poro H ₂ O	Absorption	Résistivité	Cl ⁻ _{28j}	Cl ⁻ _{90j}	RSE 28j
NOM28,1- ₃₅		X	X	X					X		X		x	X	X	X			
NOM28,2- ₃₅		X	X	X					X		X		x	X	X	X			
NOM28,3- ₃₅		X	X	X					X		X		x	X	X	X			
NomTT28 ₃₅	X	X	X		X	X			X		X		X	X	X	X	X	X	X
TTNF ₃₅	X	X	X		X	X										X	X	X	
C ⁺ ₃₅		X	X						X		3							X	
C ⁻ ₃₅		X	X						X		3							X	X
E ⁺ ₃₅		X	X						X		3							X	X
E ⁻ ₃₅		X	X						X		X							X	
Nom90 ₃₅		X	X	X						X									
F ⁻ ₃₅		X	X						X		X								
F ⁺ ₃₅		X	X						X		X								
NomTT90 ₃₅		X	X	X	X	X	X			X									
NomTT7h ₃₅	X	X	X		X	X		X				X							

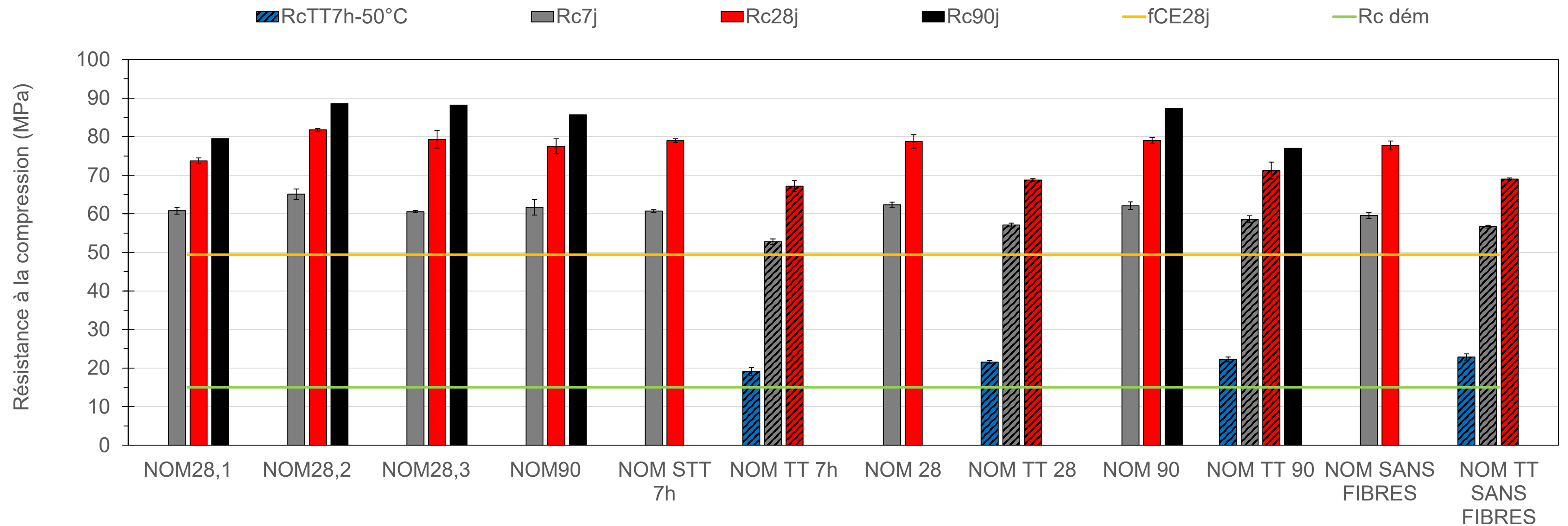
BRFM 300-35-0,9-AP

Étude - Compositions

Nom	NOMs	E ⁺ ₃₅	E ⁻ ₃₅	C ⁺ ₃₅	C ⁻ ₃₅	F ⁺ ₃₅	F ⁻ ₃₅	NOM TT NF ₃₅	Ref 415	Ref 360
CEM III/B 42,5N	300	300	300	320	280	300	300	300	-	-
CEM I 52,5 N SR3 PM-CP2	-	-	-	-	-	-	-	-	415	360
Sable 0/4					1 119				1 030	1 076
Gravillon 4/10					317				292	305
Gravillon 11.2/22.4					634				584	610
Superplastifiant				2,90				2,25	0,62	1,80
Fibres métalliques			35			38,5	31,5	0	-	-
Fibres polypropylène				0,9				0	-	-
E _{totale} (litre)	132	137	127			132			164	146,0
E _{eff} (litre)	111	116	106			111			145,1	126,0
E _{eff} /C	0,37	0,387	0,353	0,347	0,396		0,37		0,35	0,35
Rapport S/(S+G)					0,54					

BRFM 300-35-0,9-AP

Étude – Résistances à la compression des nominales



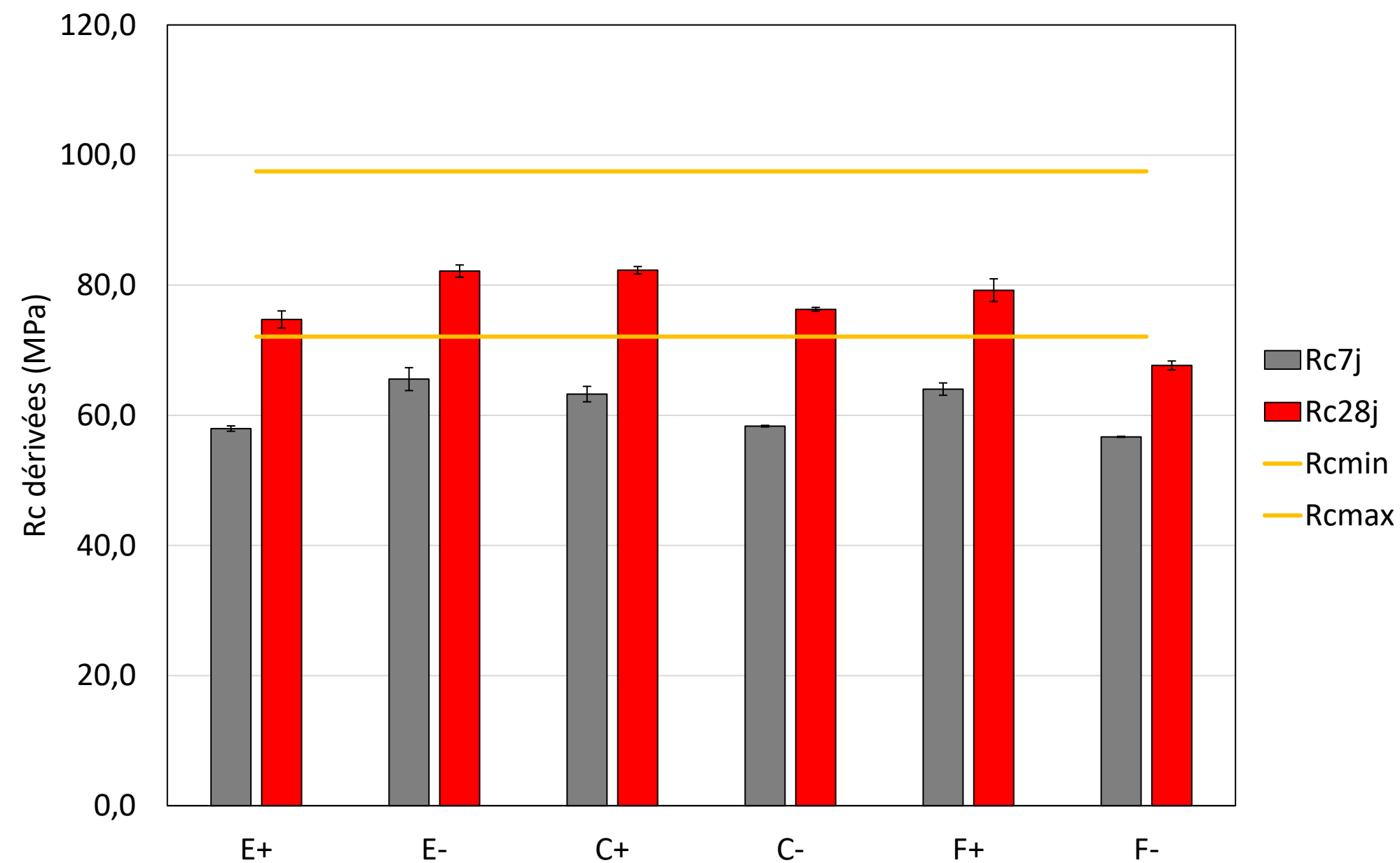
Conditions de validation F.65:

Nominales : $f_{CE} \geq 49,4 \text{ MPa}$

Dérivées: $72,1 \text{ MPa} \leq f_{C28} \leq 97,5 \text{ MPa}$

BRFM 300-35-0,9-AP

Étude – Résistances à la compression des dérivées



Conditions de validation F.65:

Nominales : $f_{CE} \geq 49,4 \text{ MPa}$

Dérivées: $72,1 \text{ MPa} \leq f_{C28} \leq 97,5 \text{ MPa}$

BRFM 300-35-0,9-AP

Étude – Durabilité

Résultats en valeurs moyennes						
Gâchée	Absorption d'eau (%)	Porosité accessible à l'eau (%)	Résistivité électrique ($\Omega.m$)	Coefficient de migration des ions chlorure ($\times 10^{-12} m^2/s$)		RSE, $\Delta L/L$ (%)
	NF EN 13369 Annexe F	NF P18-459	XP P18-481	XP P18-462		Méthode PerfDub Immersion/Séchage
	28j	28j	28j	28j	90j	
Nom28-1 ₃₅	3,4	9,1	68* (± 14)	-	-	-
Nom28-2 ₃₅	3,2	8,0	81* (± 39)	-	-	-
Nom28-3 ₃₅	3,2	8,0	63* (± 21)	-	-	-
NomTT28 ₃₅	3,2	8,1	92* (± 28)	3,3* ($\pm 1,3$)	2,4*	0,01
NomTTNF ₃₀	-	-	565 (± 31)	0,7 ($\pm 0,2$)	0,6 ($\pm 0,1$)	-
E ⁺ ₃₅	-	-	-	-	1,4* ($\pm 0,3$)	0,01
E ⁻ ₃₅	-	-	-	-	1,3* ($\pm 0,7$)	-
C ⁺ ₃₅	-	-	-	-	1,3* ($\pm 1,6$)	-
C ⁻ ₃₅	-	-	-	-	0,9* ($\pm 1,1$)	0,01
Ref 415	-	-	84 ($\pm 3,2$)	7,5 ($\pm 0,01$)	5,4 ($\pm 0,23$)	-
Ref 360 NT	3,7	9,3	101 (± 2)	6,9 ($\pm 1,0$)	7,3 ($\pm 0,8$)	-
Ref 360 TT	3,9	9,2	92 ($\pm 3,8$)	8,6 ($\pm 1,0$)	9,4 ($\pm 1,4$)	-

*Essais ne respectant pas la norme d'essai puisqu'il y a présence de fibre métalliques

BRFM 300-30-0,9-AP

Étude – Programme

Focus Durabilité

Méthode
comparative
(liant conforme
FD P18-011)

Indicateurs généraux

Absolute

Nom	Avec TT	R _{c7j}	R _{c28j}	R _{c90j}	R _{c7jTT}	R _{c28jTT}	R _{c90jTT}	R _{f TT}	R _{f28jTT}	R _{f90jTT}	Comptage des fibres	Module TT	Module 28j	Poro H ₂ O	Absorption	Résistivité	Cl _{-28j}	Cl _{-90j}	RSE 28j
TT6h ₋₃₀	X	X	X		X	X		X				X	X						
TT7h ₋₃₀	X	X	X		X	X		X				X	X						
Nom28,1 ₋₃₀		X	X	X					X		X		X	X	X	X			
Nom28,2 ₋₃₀	X	X	X	X					X		X		X	X	X	X			
NomTT28 ₋₃₀	X	X	X		X	X			X		X			X	X	X	X	X	X
TTNF ₋₃₀	X	X	X		X	X										X	X	X	
BétonRéf		X	X		X	X											X	X	
E+ ₃₀		X	X						X									X	X
Nom28,3 ₋₃₀		X	X	X					X		X		X						
F ₋₃₀		X	X						X		X								
S ₋₃₀		X	X						X										
S+ ₃₀		X	X						X										
NomTT90 ₋₃₀	X	X	X	X	X	X	X			X									
F+ ₃₀		X	X						X		X								
Nom90 ₋₃₀		X	X	X						X									

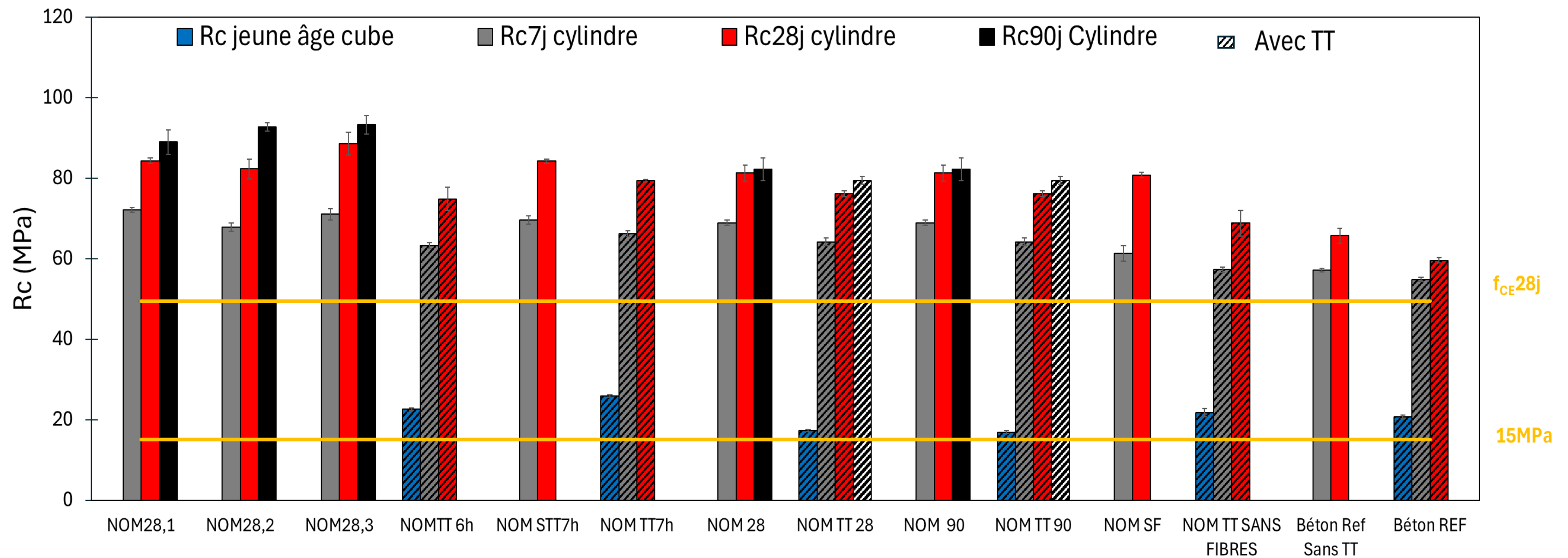
BRFM 300-30-0,9-AP

Étude – Compositions

Nom	NOMs	E ⁺ ₃₀	S ⁺ ₃₀	S ⁻ ₃₀	F ⁺ ₃₀	F ⁻ ₃₀	NOM TTNF ₃₀	Ref 415	Ref 360
CEM III/B 42,5N				300				-	-
CEM I 52,5 N SR3 PM-CP2				-				415	360
Sable 0/4	1 119		1 231	1 007	1 119			1 030	1 076
Gravillon 4/10	317		280	354	317			292	305
Gravillon 11.2/22.4	634		559	709	634			584	610
Superplastifiant	2,90							0,62	1,80
Fibres métalliques		30			33	27	0	-	-
Fibres Polypropylène				0,9				-	-
E _{totale} (litre)	126	131			126			164	146,0
E _{eff} (litre)	105	110			105			145,1	126,0
E _{eff} /C	0,35	0,367			0,35			0,35	0,35
Rapport S/(S+G)	0,54	0,54	0,59	0,49			0,54		

BRFM 300-30-0,9-AP

Étude – Résistance à la compression des nominales



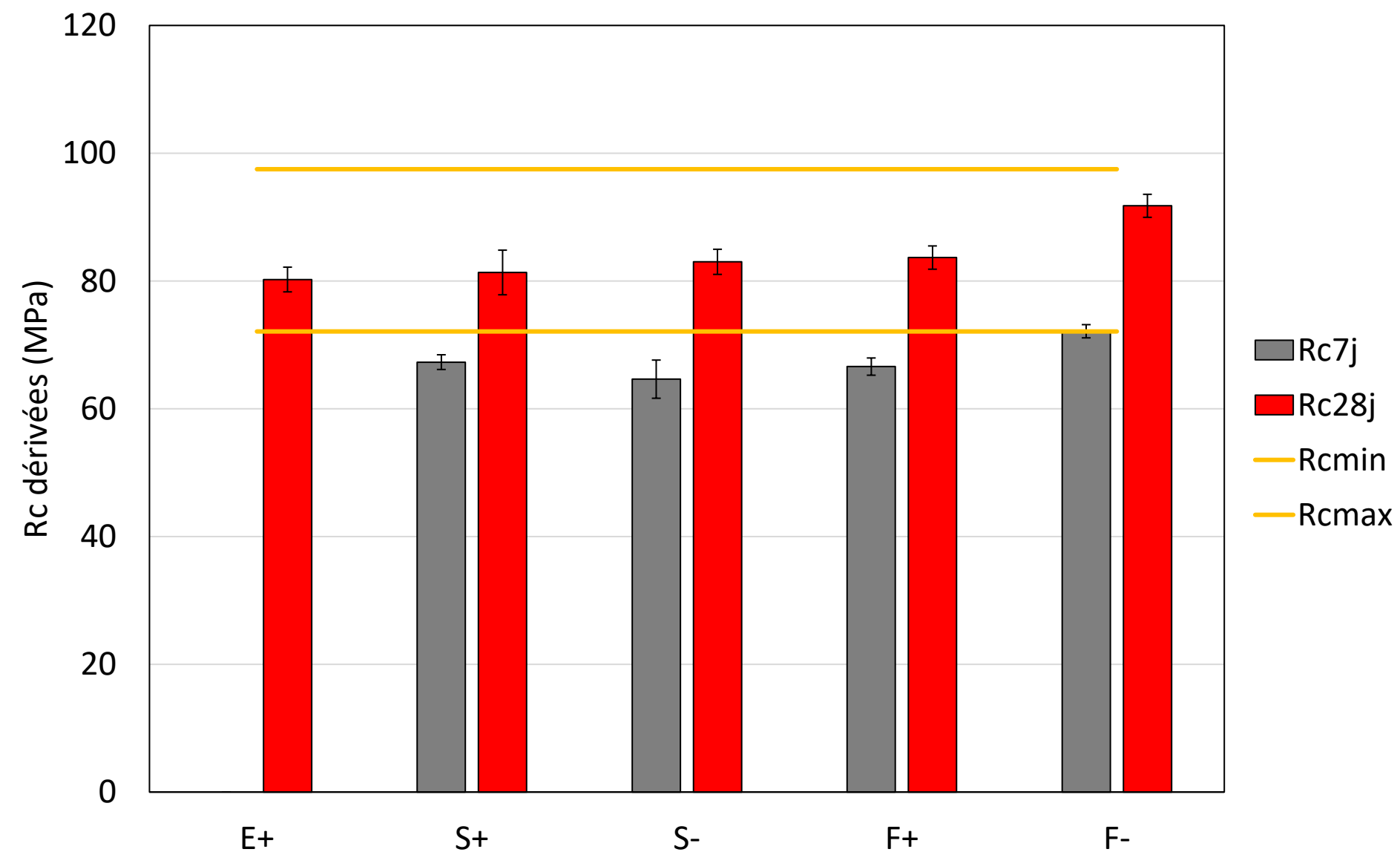
Conditions de validation F.65:

Nominales : $f_{CE} \geq 49,4\text{MPa}$

Dérivées: $72,1\text{ MPa} \leq f_{C28} \leq 97,5\text{MPa}$

BRFM 300-30-0,9-AP

Étude – Résistance à la compression des nominales



Conditions de validation F.65: Nominales : $f_{CE} \geq 49,4\text{MPa}$ Dérivées: $72,1\text{ MPa} \leq f_{C28} \leq 97,5\text{MPa}$

BRFM 300-30-0,9-AP

Étude – Durabilité

Résultats en valeurs moyennes						
Gâchée	Absorption d'eau (%)	Porosité accessible à l'eau (%)	Résistivité électrique ($\Omega.m$)	Coefficient de migration des ions chlorure ($\times 10^{-12} m^2/s$)		RSE, $\Delta L/L$ (%)
	NF EN 13369 Annexe F	NF P18-459	XP P18-481	XP P18-462		Méthode PerfDub Immersion/Séchage
	28j	28j	28j	28j	90j	
Nom28-A ₃₀	2,9	7,4	145* ($\pm 21,2$)	-	-	-
Nom28-B ₃₀	2,7	7,3	110* ($\pm 26,2$)	-	-	-
NomTT28 ₃₀	3,0	8,0	137* ($\pm 40,3$)	2,2* ($\pm 0,5$)	0,5* ($\pm 0,5$)	0,01
NomTTNF ₃₀	-	-	540 ($\pm 18,7$)	1,3 ($\pm 0,2$)	0,4 ($\pm 0,2$)	-
E ⁺ ₃₀	-	-	-	-	1,4* ($\pm 1,2$)	0,01
Ref 415	-	-	84 ($\pm 3,2$)	7,5 ($\pm 0,01$)	5,4 ($\pm 0,23$)	-
Ref 360 NT	3,7	9,3	101 (± 2)	6,9 ($\pm 1,0$)	7,3 ($\pm 0,8$)	-
Ref 360 TT	3,9	9,2	92 ($\pm 3,8$)	8,6 ($\pm 1,0$)	9,4 ($\pm 1,4$)	-

*Essais ne respectant pas la norme d'essai puisqu'il y a présence de fibre métalliques

BRFM 300-30-0,9-AP

Épreuve de convenance – Programme

	Affaissement (mm)		Vébé (s)		MVBF (kg/m³)	Air oclus (%)	Teneur en fibre (kg/m³)	Rc Non-Étuvée (MPa)			Rc Étuvée (MPa)				Flexion (MPa)	Absorption (%)	Poro H ₂ O (%)	Résistivité (Ω.m)	Migration des ions chlorures (.10 ⁻¹² m²/s)		RSE (%)
Échéances	T0	T30	T0	T30	T0	T0	T0	24h	7j	28j	7h	24h	7j	28j	28j	28j	28j	28j	28j	28j	28j
G1 NT	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-	-	X	X	X	-	-	-	X
G1 TT	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-	X	X	X	X	-	X	X	-	-	-	X
G2 NT	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-
G3 NT	X	X	X	X	X	X	X	X	X	x	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-
G4 NF NT	X	-	X	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	X	-
G4 NF TT	X	-	X	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	X	-

BRFM 300-30-0,9-AP

Épreuve de convenance – Résultats de Durabilité

Résultats en valeurs moyennes						
Gâchée	Absorption d'eau (%)	Porosité accessible à l'eau (%)	Résistivité électrique ($\Omega.m$)	Coefficient de migration des ions chlorure ($\times 10^{-12} m^2/s$)		RSE, $\Delta L/L$ (%)
	NF EN 13369 Annexe F	NF P18-459	XP P18-481	XP P18-462		Méthode PerfDub Immersion/Séchage
	28j	28j	28j	28j	90j	
Conditions de validation	$\leq 3,19$	$\leq 8,36$	≥ 432	$\leq 7,5$	$\leq 5,4$	$\leq 0,12$
G1 NT	3,5	8,4	-	-	-	0,009
G1 TT	4,0	9,7	-	-	-	0,008
G4 NF NT	-	-	370	0,6	0,5	-
G4 NF TT	-	-	345	0,5	0,5	-
NomTTNF ₃₀			540	1,3	0,4	

BA 300-0,9-AP

Étude – Durabilité

Résultats en valeurs moyennes					
Gâchée	Absorption d'eau (%)	Porosité accessible à l'eau (%)	Résistivité électrique ($\Omega.m$)	Coefficient de migration des ions chlorure ($\times 10^{-12} m^2/s$)	
	NF EN 13369 Annexe F	NF P18-459	XP P18-481	XP P18-462	
	28j	28j	28j	28j	90j
Nom28-1	3,2	7,8	563 (± 22)	0,9 ($\pm 0,1$)	0,5 ($\pm 0,2$)
Nom28-2	3,0	7,8	500 (± 50)	-	-
NomTT28	3,3	7,6	587 (± 18)	0,9 ($\pm 0,2$)	0,8 ($\pm 0,3$)
E+	-	-	-	-	1,0 ($\pm 0,3$)
E ⁺	-	-	-	-	0,5 ($\pm 0,3$)
C ⁺	-	-	-	-	0,6 ($\pm 0,2$)
C ⁻	-	-	-	-	0,4 ($\pm 0,2$)
Ref 415	-	-	84 ($\pm 3,2$)	7,5 ($\pm 0,01$)	5,4 ($\pm 0,23$)
Ref 360 NT	3,7	9,3	101 (± 2)	6,9 ($\pm 1,0$)	7,3 ($\pm 0,8$)
Ref 360 TT	3,9	9,2	92 ($\pm 3,8$)	8,6 ($\pm 1,0$)	9,4 ($\pm 1,4$)

BA 300-0,9-AP

Convenance – Programme

Échéances	Affaissement (mm)		Vébé (s)		MVBF (kg/m ³)	Air oclus (%)	Rc Non-Étuvée (MPa)			Rc Étuvée (MPa)				Absorption (%)	Poro H ₂ O (%)	Résistivité (Ω.m)	Migration des ions chlorures (.10 ⁻¹² m ² /s)	
	T0	T30	T0	T30	T0	T0	24h	7j	28j	7h	24h	7j	28j	28j	28j	28j	28j	90j
G1 NT	X	X	X	X	X	X	-	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G2 NT	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-	-	X	X	X	X	X
G2 TT	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
G3 NT	X	X	X	X	X	X	X	X	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-

BA 300-0,9-AP

Convenance – Résultats de durabilité

Résultats en valeurs moyennes					
Gâchée	Absorption d'eau (%)	Porosité accessible à l'eau (%)	Résistivité électrique ($\Omega.m$)	Coefficient de migration des ions chlorure ($\times 10^{-12}m^2/s$)	
	NF EN 13369 Annexe F	NF P18-459	XP P18-481	XP P18-462	
	28j	28j	28j	28j	90j
Conditions de validation	$\leq 3,5$	$\leq 8,50$	≥ 440	$\leq 6,9$	$\leq 7,3$
G2 NT	2,6	7,3	248	0,8	0,5
G2 TT	2,9	9,5	253	0,6	0,7
NomTT28	3,3	7,6	540	1,3	0,4

BA 300-0,9-AP

Convenance – Résultats de durabilité sur carotte du voussoir d'essai

Résultats en valeurs moyennes					
Gâchée	Absorption d'eau (%)	Porosité accessible à l'eau (%)	Résistivité électrique ($\Omega.m$)	Coefficient de migration des ions chlorure ($\times 10^{-12} m^2/s$)	
	NF EN 13369 Annexe F	NF P18-459	XP P18-481	XP P18-462	
	84j	86j	86j	86j	90j
Conditions de validation	$\leq 3,5$	$\leq 8,50$	≥ 440	$\leq 6,9$	$\leq 7,3$
Labo 2 convenance	3,0	8,0	381	0,2	0,2
Labo 3	-	-	620 à 108j	-	-
NomTT28 (Labo 1)	3,3	7,6	540	1,3	0,4

Conclusions & Perspectives

- Impact des fibres métalliques non négligeable sur les essais de durabilité
→ (valeur + écart-type)
- Abaissement de la limite du dosage minimal du FD P18-480 sous les 300 kg/m³
- Extrêmement difficile de valider les indicateurs généraux de durabilité avec l'outil de production sur les faibles valeurs de porosité/absorption d'eau
- Énorme variabilité sur l'essai de résistivité électrique conduisant à réaliser des essais contradictoires systématiques en cas de laboratoires différents entre l'étude et la convenance



Merci
