

Problème III: Formulation de mortiers pour bétons auto-plaçants. (8pts)

On se propose de formuler un béton auto-plaçant (BAP) pour la réparation des piliers d'un pont situé en zone maritime (zone de marnage) et on s'intéresse à la formulation de son mortier. Le béton formulé a une résistance ciblée R_{c28} comprise entre 35 et 45 MPa.

Les matériaux disponibles sont :

Un ciment CEM I 52,5 PM de classe vraie à 28 jours $\sigma_{28} = 60$ MPa et de masse volumique $\rho_c = 3,15 \text{ g.cm}^{-3}$.

Une cendre volante de masse volumique $\rho_{cv} = 2,2 \text{ g.cm}^{-3}$.

La masse volumique du sable est $\rho_s = 2,52 \text{ g.cm}^{-3}$.

Le tableau 2 résume les différentes formulations de mortiers testés.

Mortiers	S (g)	C (g)	CV (g)	E_{aj} (g)	E_{eff} (g)	Superplastifiant (g)	R_{c28} (MPa)
1	1350	450	0	157	-	12	79
2	1350	403	40	159	-	9	77
3	1350	365	73	161	-	7	75
4	1350	334	100	161	-	6	74

Tableau 2 : Formulation des mortiers

III.1- Indiquer dans le tableau précédent (tableau 2) la (les) formulation (s) correspondante (s) à celle d'un mortier normalisé ? justifier votre réponse.

III.2- Citer deux caractéristiques essentielles des cendres volantes (CV).

III.3- Donner la composition du superplastifiant utilisé dans ce travail expérimental. **On fixe la teneur en extrait sec à 30%.**

III.4- Expliquer pourquoi on fait la différence entre E_{aj} et E_{eff} et calculer E_{eff} pour tous les mortiers en fixant l'hypothèse que vous avez choisi.

III.5- Calculez les masses volumiques théoriques de ces quatre mortiers. On considère que l'eau et le superplastifiant ont la même masse volumique.

Annexe NF EN 197-1 (extrait)

Tableau 1 — Les 39 produits de la famille des ciments courants

Principaux types	Notation des 39 produits (types de ciment courant)		Composition (pourcentage en masse ^a)											Constituants secondaires
			Constituants principaux											
			Clinker	Laitier de haut fourneau	Fumée de silice	Pozzolanes		Cendres volantes		Schiste calciné	Calcaire			
	Naturels	Naturels calcinés				Siliceux	Calcaire	T	L		LL			
	Nom	Notation	K	S	D ^b	P	Q	V	W	T	L	LL		
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5		
	Ciment Portland au laitier	CEM II/A-S	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	0-5		
	Ciment Portland à la fumée de silice	CEM II/B-S	65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	0-5		
	Ciment Portland à la fumée de silice	CEM II/A-D	90-94	—	4-10	—	—	—	—	—	—	0-5		
	Ciment Portland à la pouzzolane	CEM II/A-P	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM II/B-P	65-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM II/A-Q	80-94	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM II/B-Q	65-79	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	0-5	
	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/A-V	80-94	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	0-5	
		CEM II/B-V	65-79	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	0-5	
		CEM II/A-W	80-94	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	0-5	
		CEM II/B-W	65-79	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	0-5	
	Ciment Portland au schiste calciné	CEM II/A-T	80-94	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	0-5	
		CEM II/B-T	65-79	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	0-5	
	Ciment Portland au calcaire	CEM II/A-L	80-94	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0-5	
		CEM II/B-L	65-79	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	0-5	
		CEM II/A-LL	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	0-5	
		CEM II/B-LL	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	0-5	
	Ciment Portland composé ^c	CEM II/A-M	80-88	12-20										0-5
		CEM II/B-M	65-79	21-35										0-5
		CEM II/C-M (S-P)	50-64	16-44	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM II/C-M (S-V)	50-64	16-44	—	—	—	6-20	—	—	—	—	0-5	
		CEM II/C-M (S-L)	50-64	16-44	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0-5	
		CEM II/C-M (S-LL)	50-64	16-44	—	—	—	—	—	—	—	6-20	0-5	
CEM II/C-M (P-L)		50-64	—	—	16-44	—	—	—	—	—	6-20	0-5		
CEM II/C-M (P-LL)		50-64	—	—	16-44	—	—	—	—	—	—	6-20	0-5	
CEM II/C-M (V-L)		50-64	—	—	—	—	16-44	—	—	—	—	6-20	0-5	
CEM II/C-M (V-LL)		50-64	—	—	—	—	—	16-44	—	—	—	—	6-20	0-5
CEM III/A		35-64	39-65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
CEM III/B		20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
CEM III/C	5-19	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5		
CEM IV	Ciment pouzzolanique ^d	CEM IV/A	45-69	11-25										0-5
	CEM IV/B	45-64	16-55										0-5	
CEM V	Ciment pouzzolanique au laitier ^e	CEM V/A	40-64	10-30	10-30								0-5	
	CEM V/B	20-36	31-49	11-49								0-5		
CEM VI	Ciment composé ^f	CEM VI (S-P)	35-49	31-59	6-20		—		—		—		0-5	
		CEM VI (S-V)	35-49	31-59	—		6-20		—		—		0-5	
		CEM VI (S-L)	35-49	31-59	—		—		6-20		—		0-5	
		CEM VI (S-LL)	35-49	31-59	—		—		—		6-20		0-5	

^a Les valeurs indiquées au tableau se réfèrent à la somme des constituants principaux et secondaires.

^b La proportion de fumée de silice est limitée de 4% à 10 %.

^c Dans les cas des ciments Portland composés CEM II/A-M, CEM II/B-M et CEM II/C-M, des ciments pouzzolaniques CEM IV/A et CEM IV/B, des ciments pouzzolaniques au laitier CEM V/A et CEM V/B et des ciments composés CEM VI, les constituants principaux autres que le clinker doivent être déclarés dans la désignation du ciment (voir des exemples à l'Article 8).

Annales JNC 23/24

PROBLÈME I

$$\text{I.1/ } w (\%) = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100 = \frac{m_e}{m_s} \times 100$$

$$\Rightarrow m_h = m_s \frac{w}{100} + m_s$$

$$\Rightarrow m_h = m_s \left(1 + \frac{w}{100} \right)$$

$$\begin{cases} m_{h, \text{grauillon}} = m_{s, \text{grauillon}} \left(1 + \frac{w_g}{100} \right) \\ m_{h, \text{table}} = m_{s, \text{table}} \left(1 + \frac{w_s}{100} \right) \end{cases}$$

$$1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} = 10^3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$

$$\begin{cases} m_{s, \text{grauillon}} = Q_s \times 1 \text{ m}^3 = 650 \text{ kg} \\ m_{s, \text{table}} = Q_g \times 1 \text{ m}^3 = 1150 \text{ kg} \end{cases}$$

$$\text{AN: } \begin{cases} m_{h, \text{sable}} = 650 \times \left(1 + \frac{5}{100} \right) = 682,5 \text{ kg} \\ m_{h, \text{grauillon}} = 1150 \times \left(1 + \frac{2,1}{100} \right) = 1174,15 \text{ kg} \end{cases}$$

$$\text{I.2/ } w_A (\%) = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_s} \times 100$$

$$\Rightarrow m_{\text{sat}} = m_s \frac{w_A (\%)}{100} + m_s$$

$$\Rightarrow m_{\text{sat}} = m_s \left(1 + \frac{w_A (\%)}{100} \right)$$

$$\text{AN: } \begin{cases} m_{\text{sat, grauillon}} = 1150 \times \left(1 + \frac{2}{100} \right) = 1173 \text{ kg} \\ m_{\text{sat, sable}} = 650 \times \left(1 + \frac{1,5}{100} \right) = 659,75 \text{ kg} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} E_{\text{exp, s}} &= 682,5 - 659,75 \\ &= 22,75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{\text{exp, g}} &= 1174,15 - 1173 \\ &= 1,15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{\text{exp}} &= m_{h, \text{grauillon}} - m_{\text{sat, grauillon}} \\ &= 1174,15 - 1173 = 1,15 \text{ kg} \\ &= \boxed{23,9 \text{ kg}} \end{aligned}$$

$$\underline{I.3/} \quad E_{eff} = E_{TOT} - E_{abs}$$

$$\text{ou } E_{eff} = E_{granulats} + E_{ajouts} + E_{adjuvants} - E_{abs}$$

$$\Rightarrow E_{abs} = E_{granulats} + E_{ajouts} + E_{adjuvants} - E_{eff}$$

$$\text{Par ailleurs : } E_{abs} = Q_{sec} \cdot W_{A_{24}}$$

$$\begin{cases} E_{abs, \text{sable}} = Q_{\text{sable sec}} \cdot W_{A_{24}, \text{sable}} = 650 \times \frac{1,5}{100} = 9,75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \\ E_{abs, \text{grau}} = Q_{\text{grau sec}} \cdot W_{A_{24}, \text{grau}} = 1150 \times \frac{2}{100} = 23 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \\ E_{abs, \text{grau recycle}} = Q_{\text{grau recycle}} \cdot W_{A_{24}} = 2270 \times \frac{6,16}{100} = 139,83 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \end{cases}$$

I.4/ Interactions nous du coefficient d'absorption

$$W_{A_{24}, \text{gr. rec}} > W_{A_{24}, \text{gr.}}$$

Les granulats recyclés proviennent de béton de démolition. Leur structure est souvent plus poreuse permettant d'absorber plus d'eau. Les granulats naturels ont une structure plus dense et moins poreuse. Leur coefficient d'absorption est donc plus faible car ils contiennent peu ou peu de micropores capables de retenir l'eau.

$$\underline{I.5/} \quad \frac{E}{C} = 0,45 \Rightarrow E_{eff} = 0,45 \times C$$

On suppose que $m_{ciment} = 350 \text{ kg}$ (béton standard)

$$\text{Ainsi : } E_{eff} = 0,45 \times 350 = 157,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$E_{abs} = \sum_i E_{abs, i} = 172,58 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\begin{aligned} \text{donc : } E_{TOT} &= E_{eff} + E_{abs} \\ &= 157,50 + 172,58 \\ &= 330,08 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \end{aligned}$$

On suppose aucun ajouts ou adjuvants au SP.

PROBLÈME II

II.1/ CEM II / A-D

CEM II : ciment Portland de type II

A-D : ciment Portland à la fumée de silice

$$\hookrightarrow 90\% \leq \text{Clinker} \leq 94\%$$

$$6\% \leq \text{Fumée de silice} \leq 10\%$$

II.2/ Fumée de silice : \neq sphériques présentant des pps pozzoloniques en raison de leur forte teneur en silice amorphe et ont une SS $7\text{ à }12\%$. En raison de leur finesse, elles complètent la granulométrie du ciment.

La fumée de silice est une pozzolane très réactive considérant la chaux (Ca(OH)_2) pour produire du gel CSH, améliorant ainsi la microstructure du béton.

C'est une synergie avec la présence de SiO_2 , ce qui la rend compatible avec les ciments Portland brisques.

Elle peut contenir de faibles traces d'oxydes.

III 3/ Selon la norme NF EN 197-1, la fumée de silice peut représenter au maximum 10% en masse du ciment composé.

$$\begin{aligned} V_{\text{ciment}} &= V_{\text{clinker}} + V_{\text{fds}} \\ \Rightarrow \frac{m_{\text{ciment}}}{\rho_{\text{ciment}}} &= \frac{m_{\text{clinker}}}{\rho_{\text{clinker}}} + \frac{m_{\text{fds}}}{\rho_{\text{fds}}} \\ \Rightarrow \frac{1}{\rho_{\text{ciment}}} &= \frac{x_{\text{clinker}}}{\rho_{\text{clinker}}} + \frac{x_{\text{fds}}}{\rho_{\text{fds}}} \\ \Rightarrow \rho_{\text{ciment}} &= \frac{1}{\frac{x_{\text{clinker}}}{\rho_{\text{clinker}}} + \frac{x_{\text{fds}}}{\rho_{\text{fds}}}} \end{aligned}$$

$$\text{AD: } \rho_{\text{ciment}} = \frac{1}{\frac{0,9}{3,15} + \frac{0,1}{2,25}} = 3,03 \text{ g.cm}^{-3}$$

$$\text{II. 4/} \quad SS = \frac{S}{m} = \frac{S}{\rho V} = \frac{477.7^2}{\frac{4}{3}\pi 1^3} \Rightarrow SS = \frac{3}{\rho 1}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} r_{\text{silice}} = \frac{3}{\rho_{\text{silice}} SS_s} = 0,0652 \mu\text{m} \\ r_{\text{ciment}} = \frac{3}{\rho_{\text{ciment}} SS_c} = 2,72 \mu\text{m} \end{cases}$$

$$\text{II. 5/} \quad 115 \text{ L} = 0,115 \text{ m}^3$$

$$\rho_{\text{ciment composé}} = 3,03 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \quad (\text{avec } 10\% \text{ FdS})$$

$$\rho_{\text{ciment Portland}} = 3,15 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} m_{cc} = 0,115 \times 3,03 \times 10^3 = 348,65 \text{ kg} \\ m_{cp} = 0,115 \times 3,15 \times 10^3 = 362,75 \text{ kg} \end{cases}$$

$$\Delta m = m_{cp} - m_{cc} = 13,8 \text{ kg}$$

Cela signifie que le ciment composé nécessite environ 13,8 kg de maïs par m^3 que le ciment Portland pur.

PROBLÈME 3

sans goût particulière \rightarrow que ciment + eau + sable

III. 1/ Formulation mortier normale : Plâtrier 1 par $\text{CU} = 0 \text{ g}$

III. 2/ Caractéristiques essentielles des ciments vertes :

- matériaux pyrotechniques composés de SiO_2 et Al_2O_3
- réagissent avec la chaux pour former CSH.
- finesse \nearrow

III. 3/ Composition du SP : 30% d'extrait sec et 70% d'eau

III. 4/ Hypothèse : 20% de l'eau ajoutée est absorbée par les granulats
donc : $E_{\text{abs}} = 0,20 E_{\text{aj}}$ et $E_{\text{em}} = E_{\text{aj}} - E_{\text{abs}}$

$$\text{III. 5/} \quad \rho_{\text{mortier}} = \frac{\sum m_i}{\sum V_i} = \frac{\sum m_i}{\sum \frac{m_i}{\rho_i}} = 0,8 E_{\text{aj}}$$