

Année / Semestre School year / Semester:	2023 - 2024 / Semestre : 05
Classe / Coursus : Class / Speciality:	PGE1
Nom, prénom de l'enseignant / Identifiant : Teacher's name, first name / ID:	Johan COLIN Eliane KHOURY
Matière : Taught subject:	Ingénierie des matériaux de construction
Durée de l'évaluation : Duration:	2H00
Calculatrice autorisée : Calculator allowed :	Oui (yes) <input checked="" type="radio"/> Non (no) <input type="radio"/>
Documents autorisés : Authorized documents:	Oui (yes) <input type="radio"/> Non (no) <input checked="" type="radio"/>
Consignes à respecter	<ul style="list-style-type: none">- L'usage du téléphone portable est totalement interdit.- L'écriture doit être soignée et lisible.- La résolution de chaque problème doit être finalisée par une droite horizontale d'une extrémité à l'autre de la copie- Calculatrice autorisée. Toute information enregistrée dans la calculatrice sauf celle liée à l'opération de faire un calcul est totalement interdite. Tout élève ne respectant pas cette consigne sera sanctionné.- Les barèmes sont donnés à titre indicatif.
Nom et prénom de l'apprenant : Learner's name and first name:	

Répondre aux questions directement sur le sujet :

- en remplissant les parties « justification » pour la première partie,
- et sur une feuille distribuée pour la deuxième partie,

et rendre toutes les feuilles en fin d'épreuve.

Les réponses seront notées avec la partie explication pour chaque question.

Première partie : questions de cours

Question 1 (cocher la bonne réponse) (1pt)

On s'intéresse à l'utilisation de filler calcaire dans les bétons. Cochez, parmi les propositions suivantes, celle qui vous paraît vraie.

- a) ☒ Le filler calcaire est une addition minérale quasiment inerte chimiquement dans le béton
- b) ☐ Le filler calcaire est une addition pouzzolanique
- c) ☐ Le filler calcaire est un adjuvant

Justification :

Le filler calcaire sont des particules des fines de carbonate de calcium, ne participant pas au pou ou en chimiques. Son rôle est d'améliorer la compacité du ciment et de contribuer à la performance mécanique et à la durabilité du béton.

Question 2 (cocher la bonne réponse) (1pt)

Quel hydrate rend le ciment basique :

- a) ☐ ettringite
- b) ☐ silicate de calcium hydraté
- c) ☒ hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{CH}$ portlandite $\text{pH} \approx 12,5$
- d) ☐ monosulfo-aluminates de calcium hydraté

Question 3 (cocher la bonne réponse) (1pt)

Quelle est la conséquence de l'ajout de gypse à un clinker de ciment Portland ?

- a) ☐ augmenter la résistance mécanique à long terme
- b) ☐ dégager moins de chaleur à court terme
- c) ☒ réduire la quantité d'ettringite précipitée
- d) ☐ accélérer le temps de prise

→ diminuer

Justification :

Le gypse est ajouté au clinker de ciment Portland pour réguler la prise. Lors de l'hydratation, le gypse réagit avec les aluminates de calcium pour former de l'ettringite.

Question 4 (cocher la bonne réponse) (1pt)

Cochez, parmi les propositions suivantes, celle qui vous paraît fausse.

Les superplastifiants sont des adjuvants, incorporés dans le béton, et modifient des propriétés ou du comportement de celui-ci. On s'intéresse à l'utilisation de superplastifiants dans les bétons parce qu'ils permettent de :

- a) ☒ réduire très fortement la quantité d'eau de gâchage en diminuant la maniabilité
- b) ☐ réaliser des bétons à compacité élevée
- c) ☐ d'avoir des gains de performance très importante vis-à-vis des résistances mécaniques initiales et finales

car SP rend béton + liquide

Question 5 (cocher la bonne réponse) (2pt)

On souhaite comparer les propriétés des différents bétons dont les compositions (en kg/m^3 de béton frais) sont fournies dans le tableau suivant. Ces bétons sont réalisés avec les mêmes constituants. Le dosage en superplastifiant du béton 2 a été déterminé de manière à obtenir une pâte de ciment possédant exactement le même comportement rhéologique que celle du béton 1. La masse volumique absolue du ciment est $\rho = 3.13 \text{ g/cm}^3$.

	Ciment (kg)	Eau efficace (kg)	Superplastifiant (kg)	Sable sec (kg)	Gravier sec (kg)
Béton 1	366	183	0	620	1178
Béton 2	448	157	1.35	620	1178
Béton 3	448	224	0	561	1065

a) Cocher la proposition qui vous paraît exacte :

- ☒ a) Les bétons 1 et 2 ont la même maniabilité et le béton 3 est plus maniable
☐ b) Les 3 bétons ont la même maniabilité
☐ c) Les bétons 1 et 3 ont la même maniabilité et le béton 2 est plus maniable
☐ d) Les 3 bétons ont des maniabilités différentes

b) Cocher la proposition qui vous paraît exacte :

- ☒ a) Le béton 2 est plus résistant que les bétons 1 et 3
☐ b) Les 3 bétons ont la même résistance
☐ c) Les bétons 1 et 2 ont la même résistance et sont moins résistants que le béton 3
☐ d) Les 3 bétons ont des résistances différentes

Question 6 (2 pts)

Veuillez décrire les notations des ciments suivants en s'appuyant sur le tableau extrait de la norme NF EN 197-1 ci-dessous :

• CEM IV/A (P) 32,5 N

CEM IV : Ciment Portland de type IV → ciment pouzzolanique

IV/A : $65\% < \text{Clinker} < 89\%$

P : présence de pouzzolanes naturelles

32,5 : classe de résistance

N : résistance à court terme ordinaire

• CEM V/B(S-V) 32,5 N

CEM V : Ciment Portland de type V → ciment pouzzolanique artificiel

V/B : $20\% < \text{Clinker} < 38\%$

(S-V) : présence de laitier de haut fourneau et de cendres volantes

32,5 : classe de résistance

N : résistance à court terme ordinaire

Deuxième partie: exercices/problèmes (I, II et III)

Problème I: Etat hydrique des matériaux granulaires

(8pts)

Les matériaux granulaires peuvent être caractérisés par deux grandeurs : teneur en eau w et coefficient d'absorption WA_{24} . Dans la formulation des bétons, ces deux grandeurs ont leur importance.

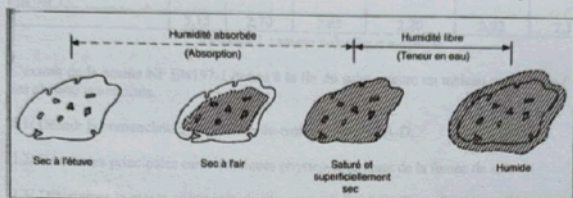


Figure 3.5. Représentation schématique des différents degrés de saturation d'un granulat

La figure ci-dessous issue du pdf Granulats – cours IMC – S5 illustre les différents états d'un granulat naturel GN.

Dans la suite, nous choisissons deux matériaux naturels : un sable 0/4 et un gravillon 4/10 et un matériau issu du recyclage des bétons de démolition.

Les matériaux naturels sont stockés à l'extérieur et ont les caractéristiques suivantes :

Sable ; $w = 5\%$ et $WA_{24} = 1,5\%$. Q Sable sec : 650Kg/m^3

Gravillon : $w = 2,1\%$ et $WA_{24} = 2\%$. Q gravillon sec : 1150Kg/m^3

Le matériau recyclé est un gravillon 4/10 de $\rho = 2,27\text{g/cm}^3$ et de $WA_{24} = 6,16\%$.

Remarque : les Q sec représentent les quantités nécessaires pour la formulation d'un m^3 de béton.

$$m_s = 650 \text{ kg} \quad m_g = 1150 \text{ kg}$$

- 1.1/ Calculer la quantité de S et de G humides nécessaires pour cette formulation ?
- 1.2/ Déterminer la quantité d'eau superficielle pour le sable et le gravillon ?
- 1.3/ Calculer la quantité d'eau absorbée par ces matériaux granulaires.
- 1.4/ Expliquer les différences observées concernant le coefficient d'absorption entre le gravillon naturel et celui issu du recyclage.
- 1.5/ Calculer la quantité d'eau efficace indispensable à la formulation d'un béton ordinaire en partant de l'hypothèse fixée : $E/C = 0,45$. Quelle est la deuxième hypothèse que vous devez fixer pour aboutir au résultat du calcul. **Attention, votre hypothèse doit être logique.**

Problème II: ciments composés.

(8pts)

Tous les ciments normalisés n'ont pas la même masse volumique. Le tableau 1 représente les masses volumiques des différents constituants des ciments.

Masse volumique (g/cm ³)	clinker	Fines		Cendres volantes siliceuses	Gypse	Fumée de silice
		calcaires	siliceuses			
	3,15	2,70	2,65	2,20	2,32	2,1-2,40

Tableau 1 : masse volumique moyenne

L'extrait de la norme NF EN197-1 donné à la fin du sujet montre un tableau complet de l'ensemble des ciments normalisés.

II.1/ Définir la nomenclature normalisée du ciment : CEM II/A-D.

II.2/ Donner les principales caractéristiques physico-chimiques de la fumée de silice.

II.3/ Déterminer la masse volumique du ciment composé (g/cm³) **en fixant le maximum de fumée de silice autorisée.**

II.4/ La surface spécifique de la fumée de silice est de l'ordre de 15-30 m²/g alors que celle du ciment est de 0.25-0.50 m²/g. Comment expliquez-vous cette différence de surface spécifique entre ces deux matériaux et calculer le rayon moyen des grains (μm).

II.5/ On fixe un dosage volumique par exemple 115 litres (**volume de ciment dans une formulation de béton**), calculer le dosage pondéral du ciment de la question précédente. Comparer avec celui obtenu pour un ciment Portland pour le même dosage volumique et expliquer cette différence. **On fixe 2% le pourcentage maximal de gypse dans les deux ciments.**

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	Poudre de silice	Pozzolanes		Cendres volantes		Schiste calcaire	Calcaire			
	Naturels	Naturels calcaires				Siliceuses	Calcaires	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	
	Ciment Portland à la pouzzolane	CEM II/B-P	65-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	0-5	
	Ciment Portland à la pouzzolane	CEM II/A-Q	80-94	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	0-5	
	Ciment Portland à la pouzzolane	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	
	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/B-V	65-79	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	0-5	
	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/A-W	80-94	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	0-5	
	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/B-W	65-79	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	0-5	
	Ciment Portland au schiste calcaire	CEM II/A-T	80-94	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	0-5	
	Ciment Portland au schiste calcaire	CEM II/B-T	65-79	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	0-5	
CEM II	Ciment Portland au calcaire	CEM II/A-L	80-94	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0-5	
	Ciment Portland au calcaire	CEM II/B-L	65-79	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	0-5	
	Ciment Portland au calcaire	CEM II/A-LL	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	0-5	
	Ciment Portland au calcaire	CEM II/B-LL	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	0-5	
	Ciment Portland composé ^c	CEM II/A-M	80-88	12-20										0-5
	Ciment Portland composé ^c	CEM II/B-M	65-79	21-35										0-5
	Ciment Portland composé ^c	CEM II/C-M (S-P)	50-64	16-44	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0-5	
	Ciment Portland composé ^c	CEM II/C-M (S-V)	50-64	16-44	—	—	—	6-20	—	—	—	—	0-5	
	Ciment Portland composé ^c	CEM II/C-M (S-L)	50-64	16-44	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0-5	
	Ciment Portland composé ^c	CEM II/C-M (S-LL)	50-64	16-44	—	—	—	—	—	—	—	6-20	0-5	
	Ciment Portland composé ^c	CEM II/C-M (P-L)	50-64	—	—	16-44	—	—	—	—	—	6-20	0-5	
	Ciment Portland composé ^c	CEM II/C-M (P-LL)	50-64	—	—	16-44	—	—	—	—	—	—	6-20	0-5
	Ciment Portland composé ^c	CEM II/C-M (V-L)	50-64	—	—	—	—	16-44	—	—	—	6-20	0-5	
	Ciment Portland composé ^c	CEM II/C-M (V-LL)	50-64	—	—	—	—	16-44	—	—	—	—	6-20	0-5
CEM III	Ciment de haut fourneau	CEM III/A	35-64	39-65	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
	Ciment de haut fourneau	CEM III/B	20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
	Ciment de haut fourneau	CEM III/C	5-19	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
CEM IV	Ciment pouzzolanique ^d	CEM IV/A	45-69	11-35					—					0-5
	Ciment pouzzolanique ^d	CEM IV/B	45-64	36-55					—					0-5
CEM V	Ciment pouzzolanique au laitier ^e	CEM V/A	40-64	10-30	—	10-30					—			0-5
	Ciment pouzzolanique au laitier ^e	CEM V/B	20-36	31-49	—	31-49					—			0-5
CEM VI	Ciment composé ^f	CEM VI (S-P)	35-49	31-59	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0-5	
	Ciment composé ^f	CEM VI (S-V)	35-49	31-59	—	—	—	6-20	—	—	—	—	0-5	
	Ciment composé ^f	CEM VI (S-L)	35-49	31-59	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0-5	
	Ciment composé ^f	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 Poudre de silice est limitée de 6% à 10 %.

^c Dans les cas des ciments Portland composés CEM II/A-H, 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 dénomination du ciment (voir des exemples à l'Article 6).

^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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Par ailleurs :

$$E_{abs} = Q_{sec} \cdot W_{A_{24}}$$

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

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.

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

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

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

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

donc :

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

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 amorphes et ont une $SS \approx 10^{-2}$.
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 tétraques.

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.

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

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