

De la formulation aux propriétés d'un béton

Le béton, par l'importance de sa production (estimée actuellement à un m³ par an et par personne), le faible coût et l'abondance des matières premières ainsi que sa forte résistance aux agressions extérieures (variations de température, agressions chimiques) est un matériau de choix pour la construction des bâtiments.

Dans le laboratoire de recherche et développement d'une entreprise spécialisée dans les matériaux de construction, vous êtes chargé d'étudier les bétons fabriqués.

Un client de l'entreprise qui a assuré la construction d'un bâtiment à Brest fait part de la réclamation suivante :

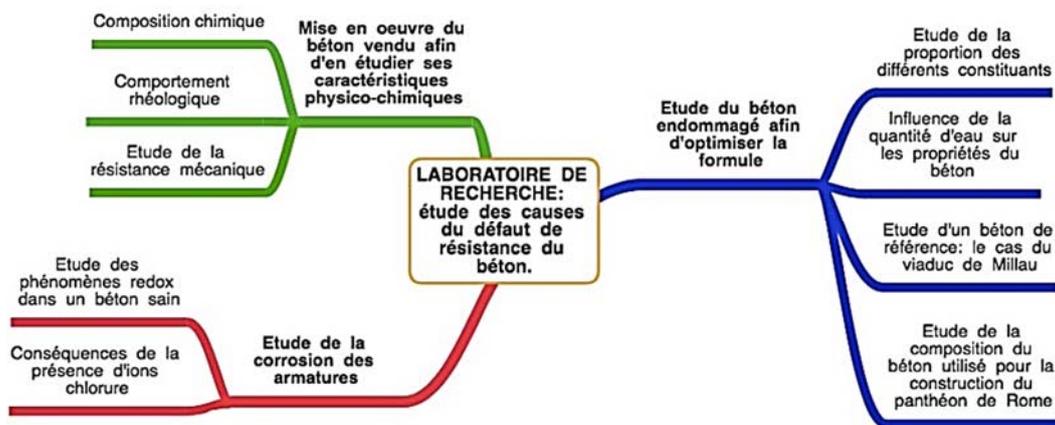
"Lors de la construction, l'ouvrabilité du béton (c'est-à-dire sa maniabilité lorsqu'il est frais) a été idéale : il s'est écoulé aisément dans les moules.

Toutefois, ce béton s'est révélé peu résistant car il a présenté rapidement des fissures, seulement quelques mois après la date de construction ».



Photo de béton détérioré
417queenswaybridges.ca

Après discussion au sein de l'équipe, la démarche suivie pour comprendre et résoudre ce problème est résumée de la façon suivante :



Chaque piste de travail compose une partie du sujet :

- partie 1 : mise en œuvre du béton vendu pour en étudier les caractéristiques physico-chimiques ;
- partie 2 : étude du béton endommagé afin d'optimiser la formule ;
- partie 3 : étude de la corrosion des armatures.

Partie 1 : Mise en œuvre du béton vendu pour en étudier les caractéristiques physico-chimiques.

A - Le béton

Le béton est un assemblage de matériaux de nature généralement minérale. Il met en présence des matières inertes, appelées granulats ou agrégats (graviers, sables, etc.), de l'eau, du ciment susceptible d'agglomérer les granulats ainsi que des adjuvants qui modifient les propriétés physiques et chimiques du mélange.

D'après <https://fr.wikipedia.org>

Composition du ciment :

La prise (ou durcissement) d'un ciment met en jeu de nombreuses transformations chimiques complexes. Toutefois, on peut considérer que la prise s'effectue en deux étapes.

- Au contact de l'eau les constituants du ciment (calcaire et argile) donnent des composés hydratés en solution.

- Les composés hydratés formés sont très peu solubles. Cela donne le phénomène de prise. Lors de cette précipitation, les hydrates formés enrobent les granulats et les grains de sable présents dans le béton et assurent ainsi la cohésion du mélange granulaire.

D'après J.-L. VIGNES : « Une vie de ciment »,
Bulletin de l'Union des Physiciens n°780, Vol. 90 – Janvier 1996

1. Nommer le type de milieu dispersé que constitue le béton. Justifier.

2. Expliquer le terme de « liant hydraulique » utilisé pour décrire le mélange {eau+ciment}.

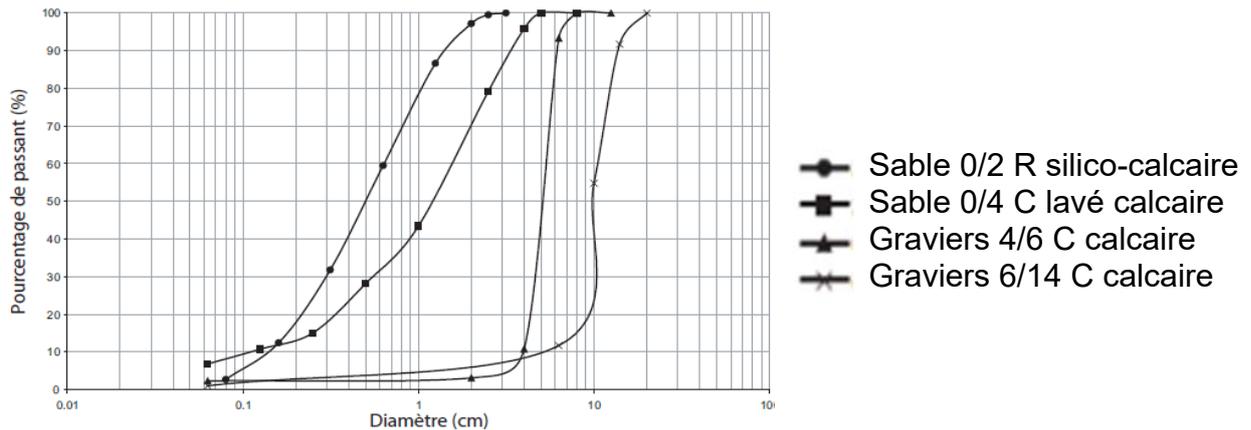
B - Réalisation de la formule du béton vendu au client

Le béton vendu au client présente la composition suivante (pour un m³ de béton) :

	ciment	eau	sable 0/2	sable 0/4	gravier 4/6	gravier 6/14
Masses (en kg)	310	200	312	368	362	802
Masse volumique (en kg.m ⁻³)	3150	1000	2640	2680	2697	2697

L'équipe cherche à réaliser cette formule afin de vérifier les affirmations du client, c'est-à-dire une maniabilité aisée lors de l'écoulement mais un défaut de durabilité.

L'analyse granulométrique des sables et graviers servant à la formulation fournit les courbes suivantes :



d'après «rhéologie des bétons fluides à haute performance», thèse de Joumana Yammine

3. A partir des courbes, expliquer les dénominations sable « 0/2 » et gravier « 6/14 ».

4. Les sacs de gravier dont dispose l'équipe pour réaliser la formule du béton ne précisent pas leur distribution granulométrique. Proposer une méthode permettant de réaliser une mesure granulométrique afin de palier ce défaut d'étiquetage.

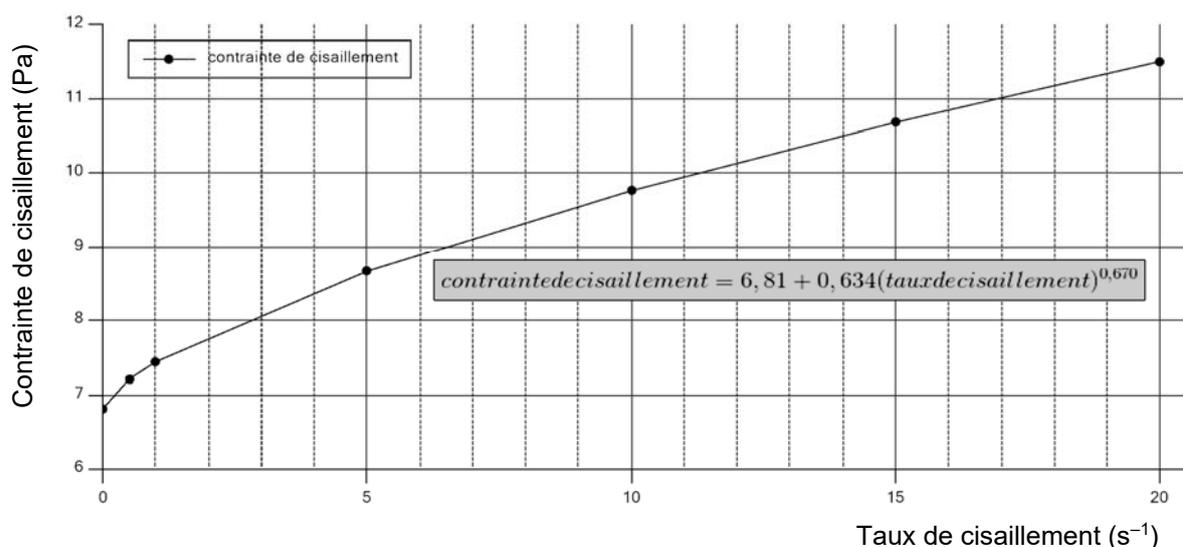
Après avoir réalisé un m³ de ce béton, l'équipe vérifie ses propriétés afin de répondre à la réclamation du client.

C - Étude de l'ouvrabilité du béton frais

L'ouvrabilité (ou maniabilité) du béton frais, c'est-à-dire sa faculté à s'écouler aisément dans les moules est directement liée à son comportement rhéologique.

Un béton frais sera apprécié s'il présente un comportement rhéofluidifiant avec une contrainte seuil de l'ordre de 10 Pa.

L'étude rhéologique du béton utilisé donne le graphique suivant :



5. En s'appuyant sur le modèle de Hershell-Buckley fourni, conclure sur l'affirmation du client quant à la maniabilité du béton utilisé.

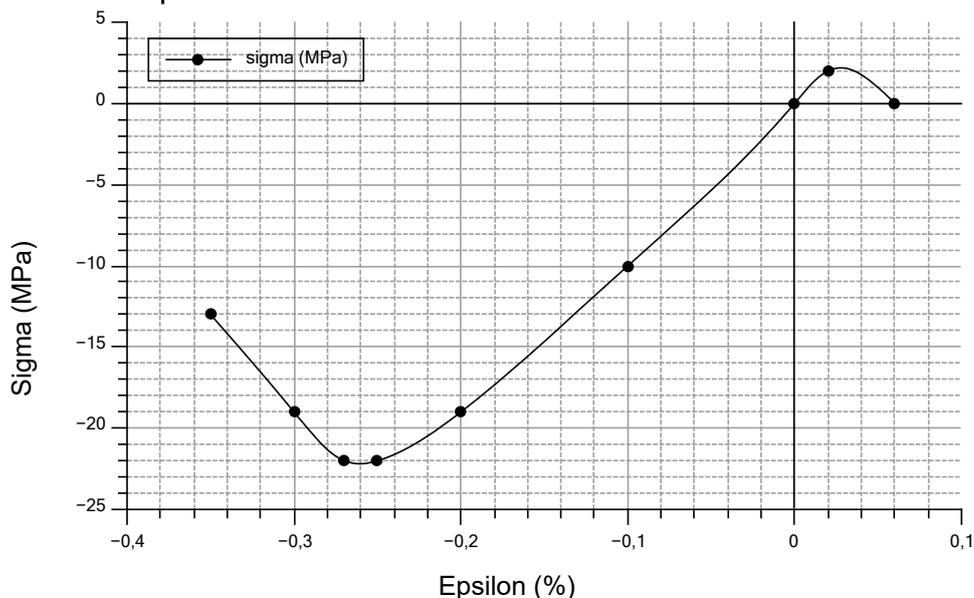
D - Étude de la durabilité

Pour évaluer la durabilité du béton, c'est-à-dire la résistance du béton face aux agressions extérieures, il est courant de mesurer la résistance mécanique du béton, 28 jours après la réalisation du mélange {eau+ciment+granulats}.

L'équipe cherche à déterminer la résistance mécanique en traction et en compression.

6. Décrire, en s'appuyant éventuellement sur un schéma, un dispositif permettant de déterminer la résistance mécanique du béton. Les grandeurs caractéristiques mesurées seront précisées.

La courbe de compression-traction du béton testé est la suivante :



7. Après avoir défini sur le graphique les domaines de compression et de traction, déterminer la résistance mécanique maximale de l'éprouvette de béton en traction et en compression (**document réponse 1 à rendre avec la copie**).

Partie 2 : étude du béton endommagé afin d'optimiser la formule

Le client a signalé au laboratoire que le bâtiment a été construit pendant une période de pluies abondantes. L'équipe propose alors d'étudier l'influence du rapport eau/ciment sur la durabilité.

A - Réalisation d'un plan d'expériences

Afin de comparer les propriétés du béton endommagé à celles de bétons sains, l'équipe étudie l'influence des proportions des différents constituants en réalisant un plan d'expériences.

Les facteurs étudiés dans le plan d'expériences et les modalités (exprimées en kg par m³ de béton) sont reproduits dans le tableau suivant :

Facteurs	Modalités	
	Niveaux	Affectation des niveaux
Ciment noté C	-1	270
	+1	350
Eau notée E	-1	165
	+1	225
Sable noté S	-1	600
	+1	700
Graviers noté G	-1	1030
	+1	1150

d'après « modélisation des bétons ordinaires par des plans d'expérience », Ayad et al

La réponse, notée R_C , correspond à la valeur de la résistance mécanique en compression (en MPa). Le traitement par logiciel des résultats expérimentaux propose une modélisation de la réponse selon l'équation suivante :

$$R_C \text{ (MPa)} = 26,204 + 3,123 \cdot (C) - 3,141 \cdot (E) + 1,669 \cdot (S) - 0,152 \cdot (G) - 0,222 \cdot (CE) + 1,717 \cdot (CS) - 0,417 \cdot (CG) - 0,972 \cdot (ES) + 1,749 \cdot (EG) + 0,304 \cdot (SG) - 1,489 \cdot (CES) + 0,045 \cdot (CEG) + 1,152 \cdot (CSG) - 0,641 \cdot (ESG)$$

Avec $r^2 = 0,8881$

Afin de valider ce modèle, on cherche à réaliser le mélange au point central correspondant aux proportions où tous les facteurs prennent le niveau 0. Le niveau 0 pour un facteur sera considéré comme la moyenne des valeurs affectées aux niveaux -1 et +1.

8. Déterminer les valeurs affectées de ciment, d'eau, de sable, de graviers pour réaliser un m³ de béton au point central.

Deux essais pour le mélange au point central sont réalisés donnant les résultats suivants :

Formulations	Résistance moyenne R_C (MPa)
1	26,5
2	27,8

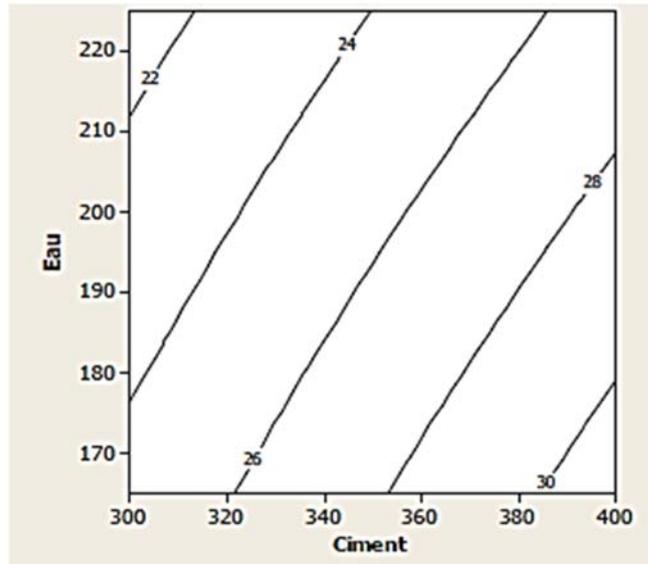
Collectivement, il est décidé que le plan d'expériences sera validé si :

- la moyenne des valeurs expérimentales obtenues au point central est comprise dans l'intervalle $[y_0 - k s_{\text{exp}} ; y_0 + k s_{\text{exp}}]$, y_0 étant la constante de l'équation du modèle, l'écart-type expérimental étant $s_{\text{exp}} = 0,0875 \text{ MPa}$ et $k = 12,7$ pour un intervalle de confiance égal à 95 % avec un degré de liberté.

- $r^2 > 0,65$

9. Vérifier la validité du plan d'expériences pour ce mélange.

La courbe d'isoreponse en fonction de la proportion d'eau et de ciment dans le béton, obtenue à partir du plan d'expériences réalisé, est représentée ci-dessous :



Courbe d'isoreponse de la résistance mécanique en compression en MPa en fonction de la teneur en eau et en ciment en kg par m³ de béton

10. Décrire l'influence de la quantité d'eau sur la résistance à la compression.

Deux photos au même grossissement de deux bétons secs contenant une quantité d'eau différente sont prises par l'équipe et présentées ci-dessous :

Béton ayant une teneur en eau proche de 150 kg par m³ de béton



Béton ayant une teneur en eau proche de 250 kg par m³ de béton



www.canstockphoto.fr

11. Expliquer en quoi augmenter le rapport eau/ciment est nécessaire en termes d'ouvrabilité mais néfaste d'un point de vue durabilité.

Afin de conclure sur l'influence de la pluviométrie lors de la formulation du béton, l'équipe s'intéresse à la teneur en eau des sables stockés sur le chantier. En effet, les tas de sables utilisés sont humides car laissés à l'air libre.

On définit la teneur en eau, notée w , d'un sable par le rapport :

$$w = \frac{\text{masse d'eau présente dans les granulats}}{\text{masse de granulats secs}}$$

Le protocole permettant de déterminer la teneur en eau est le suivant : peser une masse m_1 de granulats humides et chauffer à 120°C jusqu'à masse constante m_2 . Les résultats obtenus pour les sables utilisés sont les suivants :

m_1 (granulats humides)	1000 g
m_2 (granulats secs)	970 g

12. Déterminer la teneur en eau des sables et la composition réelle du point central.

13. En tenant compte de l'humidité des sables, estimer la résistance en compression pour le mélange au point central à partir de la courbe d'isoréponse (**document réponse 2 à rendre avec la copie**) et conclure sur l'influence de l'humidité des sables sur le défaut de durabilité.

B - Choix des adjuvants du béton

Afin d'optimiser au mieux la formule d'un béton sain, l'équipe s'intéresse à la formulation d'un béton de référence qui a fait ses preuves puisqu'il a servi à la construction du viaduc de Millau.



Pile du Viaduc de Millau, Aveyron
© D. Viet - Tourisme Occitanie

Composition du béton du viaduc de Millau pour un m³ de béton :

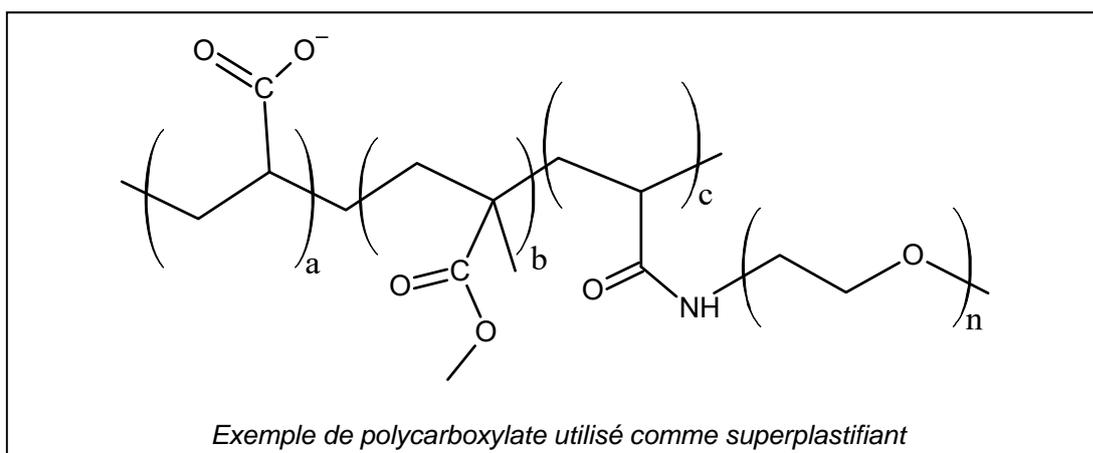
	ciment	eau	optima 175	sable 0/2	sable 0/4	gravier 4/6	gravier 6/14
Masses en kg	420	140,9	5,9	312	468	362	711
Masses volumiques en kg.m ⁻³	3150	1000	1055	2640	2680	2697	2697

Le béton du viaduc de Millau présente une résistance mécanique en compression exceptionnelle ($R_{C28} = 88 \text{ MPa}$) et pourtant se révèle très maniable grâce à l'introduction d'un adjuvant, le CHRYSO® Fluid optima 175, un superplastifiant dont les caractéristiques techniques sont décrites dans la fiche technique ci-dessous.

CHRYSO®Fluid Optima 175 est un superplastifiant de nouvelle génération à base de polycarboxylate et de phosphonate modifiés. Il permet d'obtenir des bétons à ouvrabilité importante, tout en ayant une diminution du rapport eau/ciment. Il permet également de garder dans le temps l'ouvrabilité du béton frais sans retard de prise préjudiciable. **CHRYSO®Fluid Optima 175** est particulièrement adapté pour les bétons prêts à l'emploi et pour la mise au point des bétons fluides demandant des résistances élevées à court et long terme.

Informations indicatives

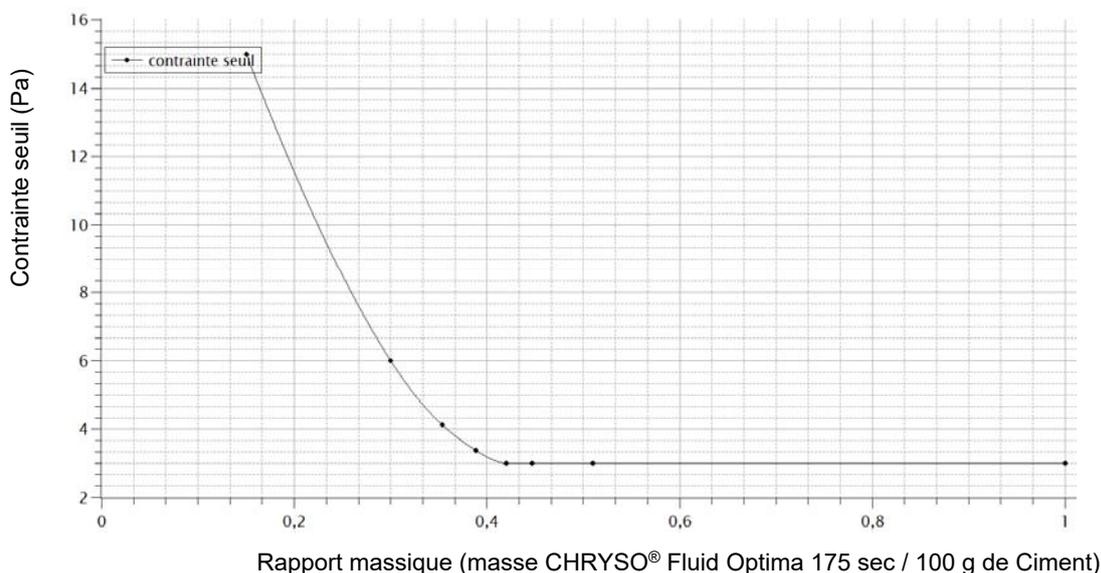
- Nature : liquide
- Couleur : Jaune
- Densité (20°C) : $1,055 \pm 0,010$
- pH : $6,00 \pm 1,00$
- Extrait sec (halogène) : $30,00 \% \pm 1,50 \%$
- Extrait sec (EN 480-8) : $30,50 \% \pm 1,50 \%$
- Teneur en Na_2O équivalent : $\leq 1,00 \%$
- Teneur en ions Cl^- : $\leq 0,10 \%$
- Durée de vie : 12 mois



14. Expliquer le mode de fonctionnement de ce type de dispersant en identifiant, dans la structure du polymère ci-dessus, les parties responsables de l'effet dispersif.

15. Indiquer la nature des mesures à effectuer pour vérifier l'affirmation de la fiche technique du CHRYSO® Fluid optima 175 : « il permet d'obtenir des bétons à ouvrabilité importante tout en ayant une diminution du rapport eau/ciment ».

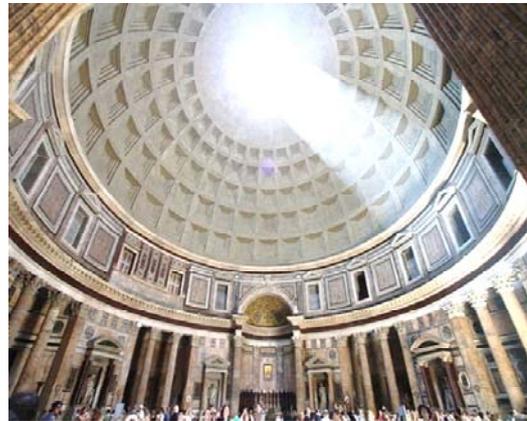
Pour vérifier la bonne proportion de superplastifiant dans le béton, l'évolution de la contrainte seuil est mesurée en fonction du rapport massique en superplastifiant. Les résultats obtenus sont les suivants :



16. Déterminer, à partir de la courbe de contrainte seuil, la masse minimale de CHRYSO® Fluid optima 175 à intégrer dans le béton pour avoir une bonne ouvrabilité et vérifier la cohérence avec la formulation du béton de Millau.

C - Choix des constituants du béton

Outre les proportions des divers constituants du béton, c'est leur composition chimique qui influe sur les propriétés finales. Ainsi le béton utilisé pour la construction du panthéon de Rome présente des caractéristiques de durabilité exceptionnelles, puisque l'édifice est intact après 2100 ans, ce qui s'explique par la formation de structures cristallographiques à base de silicium, calcium et aluminium particulièrement compactes.



Panthéon de Rome (d'après wikipedia)

Votre laboratoire s'intéresse à la composition de ce béton et pour cela procède à différentes analyses.

Détermination de la composition élémentaire

L'étude par diffraction des rayons X indique, pour le béton romain antique, la composition massique suivante :

Éléments	Masse, en g, pour 100 g de béton	Quantité de matière, en mol, pour 100 g de béton
Si	21,2	0,755
Al	4,10	0,152
Ca	30,4	A déterminer
O	43,8	
H	0,500	

D'après Phillipsite and Al-tobermorite mineral cements produced through low temperature water rock reactions in Roman marine concretes, M.D Jackson et al., American Mineralogist, 2017

La composition minéralogique du béton est évaluée par des proportions qui tiennent uniquement compte des éléments majeurs : calcium, silicium et aluminium.

17. Déterminer la fraction molaire en élément calcium par rapport à l'ensemble des éléments calcium, silicium et aluminium.

L'analyse élémentaire en éléments silicium, calcium et aluminium du béton romain du Panthéon s'inscrit dans le diagramme ternaire suivant :

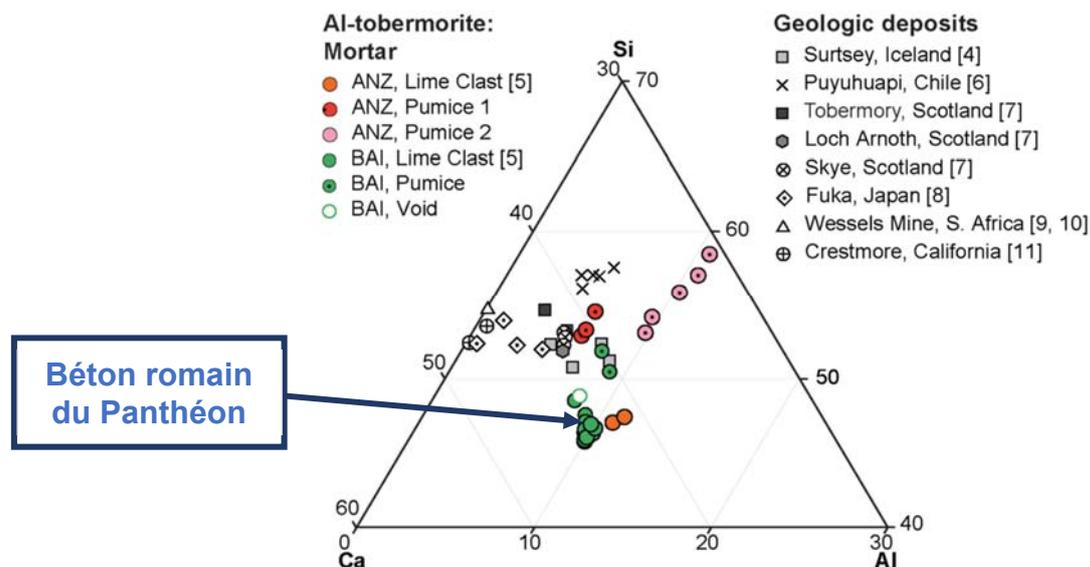


Diagramme ternaire réduit du béton romain
(les fractions molaires pour les éléments Ca, Si, Al sont exprimées en %)

18. Déterminer sur le **document réponse 3 à rendre avec la copie** les fractions molaires en silicium, calcium et aluminium du béton romain du Panthéon et vérifier que la fraction molaire en élément calcium est cohérente avec celle de la question précédente.

D - Étude de la composition du béton endommagé : dosage des ions calcium

A partir du béton endommagé, une solution aqueuse, notée S, a été préparée par dissolution en milieu acide d'une masse $m = 2,00$ g de béton pour obtenir $V_S = 1,00$ L de solution. Cette solution S contient donc des ions métalliques issus du béton, notamment des ions aluminium, calcium et magnésium. La concentration en ions calcium dans la solution S est estimée à environ $2 \times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

La solution titrante est une solution aqueuse, notée S_1 , d'un ligand L_1 à une concentration connue $C_1 = 3,00 \times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

Le titrage est réalisé en présence d'un indicateur de fin de réaction, la murexide. La murexide est un pentaacide, noté H_5In , dont la couleur dépend du pH. La valeur du pH de l'échantillon dosé doit donc être fixée à une valeur judicieusement choisie.

Les ions aluminium de la solution S sont neutralisés par réaction avec de la triéthanolamine ; ils n'interviennent au cours du titrage.

Réactions de complexation

Une réaction de complexation est une réaction entre un cation métallique M^{n+} et un ou plusieurs ions ou molécules, appelés « ligand », possédant des doublets non liants.

À toute réaction de complexation est associée une constante d'équilibre notée β , qui dépend de la température.

Les ions calcium et magnésium forment avec l'EDTA, l'EGTA et le CDTA des complexes à un seul ligand.

Les valeurs de $\log(\beta)$ à 25°C pour les réactions de complexation sont données ci-dessous :

$\log(\beta)$ à 25°C	Mg^{2+}	Ca^{2+}
EDTA	8,7	10,7
EGTA	5,2	10,9
CDTA	10,3	12,5

Chacun des ligands considérés forme un complexe avec un cation métallique. Une réaction de complexation, notée 2, peut être considérée comme négligeable devant une autre réaction de complexation, notée 1, si :

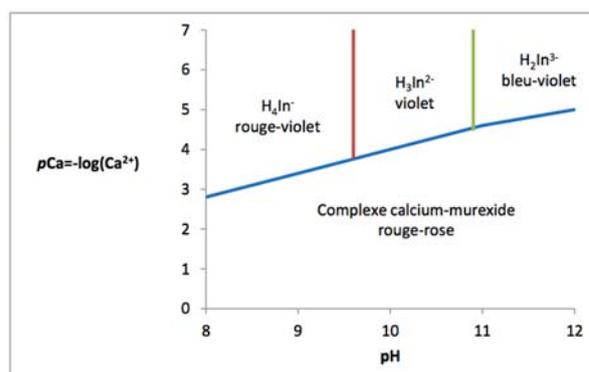
$$\frac{\beta_{\text{complexation 1}}}{\beta_{\text{complexation 2}}} \geq 10^4 \Leftrightarrow \log(\beta_{\text{complexation 1}}) - \log(\beta_{\text{complexation 2}}) \geq 4$$

Domaines de prédominance de la murexide et du complexe entre la murexide et l'ion calcium

Les diverses formes acido-basiques, H_4In^- , H_3In^{2-} et H_2In^{3-} de la murexide sont de couleurs différentes.

La murexide est un ligand pouvant réagir avec les ions calcium pour former un complexe coloré.

Quantité croissante d'ions Ca^{2+} libres en solution



19. À l'aide des informations données et de vos connaissances proposer un protocole expérimental détaillé permettant de titrer les ions calcium présents dans le béton.

La justification des choix effectués est attendue.

La structuration de l'argumentation, la rigueur des calculs, ainsi que toute initiative prise au cours de la démarche, même inachevée, seront valorisées.

Un extrait du cahier de laboratoire du technicien est fourni ci-dessous.

- Étalonnage préalable de la solution aqueuse S_1 du ligand L_1 :
 $C_1 = 3,00 \times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$

- Réalisation du titrage sur le béton endommagé:
Réalisation de 2 essais.
Prise d'essai = 20,0 mL de solution S
Obtention de deux volumes à l'équivalence :
 $V_{\text{éq1}} = 16,05 \text{ mL}$ et $V_{\text{éq2}} = 16,10 \text{ mL}$

20. Déterminer les concentrations en ions calcium, C_{Ca1} et C_{Ca2} , de la solution S fournies par les deux titrages.

21. La valeur de l'écart-type expérimental d'une série de mesures faites avec cette méthode d'analyse est : $s = 0,17 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$. Conclure sur la compatibilité des deux mesures sachant que le laboratoire impose que le z-score soit inférieur à 1.

22. Exprimer le résultat de mesure en tenant compte d'une incertitude élargie relative de 1,0 %.

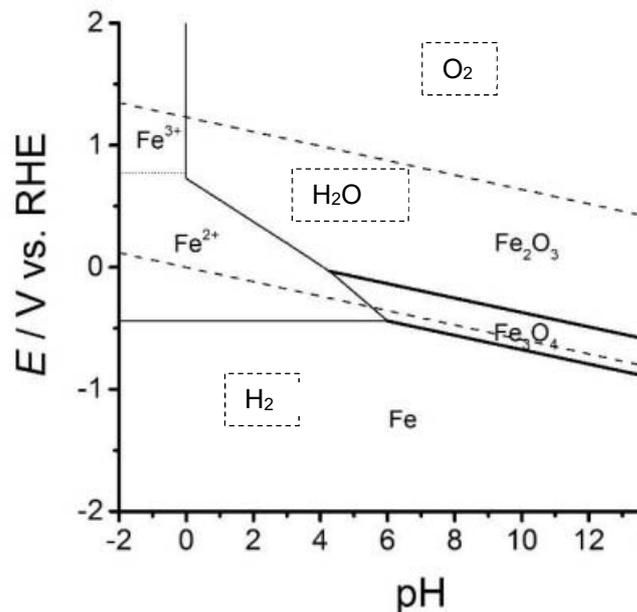
23. Déterminer le titre massique en ion calcium du béton endommagé. La comparer à celle du béton romain du Panthéon obtenue par diffraction des rayons X. Conclure.

Partie 3 : étude de la corrosion des armatures

Le béton est un matériau très résistant en compression mais peu en traction. Pour compenser ce défaut, des armatures en acier (alliage de fer et de carbone) sont ajoutées. Toutefois, les modifications chimiques subies par l'acier peuvent être la cause de l'éclatement du béton.

A - Étude des phénomènes d'oxydoreduction dans un béton sain

Le fer est responsable des propriétés oxydo-réductrices de l'acier c'est pourquoi dans cette partie, le diagramme E - pH du fer est étudié (conventions de tracé : concentrations en espèces dissoutes prises égales à $1,0 \times 10^{-6} \text{ g.L}^{-1}$, pressions partielles des gaz égales à 1,0 bar).



Diagrammes potentiel-pH superposés de l'eau et du fer

D'après « Pourbaix diagrams as a root for the simulation of polarization curves for corroding metal surfaces », S. Perry

24. Définir les termes passivation et corrosion.

25. Identifier les domaines de passivation, de corrosion et d'immunité du fer sur le diagramme E - pH (**document réponse 4 à rendre avec la copie**).

Les armatures métalliques, laissées à l'air libre sur les chantiers, sont recouvertes de rouille avant même leur utilisation (image de droite). En effet, en présence d'eau et de dioxygène, le fer subit une oxydation qui aboutit à la formation lente d'oxydes et d'hydroxydes de fer plus ou moins hydratés. Dans un souci de simplification, on assimilera la rouille à l'oxyde ferrique Fe_2O_3 .



26. Écrire l'équation de la réaction modélisant la formation de la rouille.

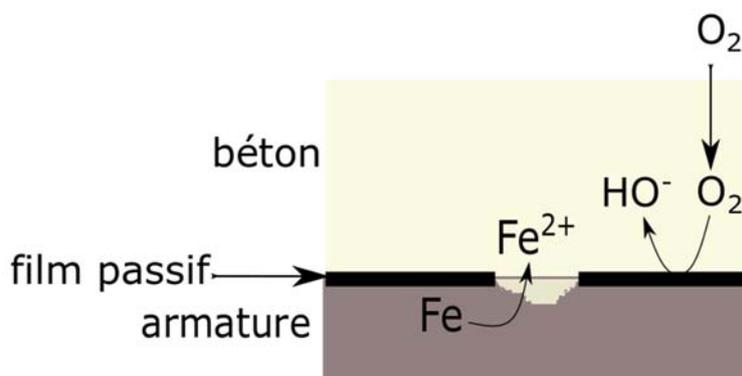
27. Le béton sain en présence d'eau peut être modélisé par une solution saturée en hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2(\text{s})$ dont le $\text{p}K_s$ vaut 5,2 à 25°C. Montrer que la valeur du pH de cette solution saturée est proche de 12.

28. Expliquer en quoi le béton sain ne constitue pas une menace de dépassivation des armatures.

B - Conséquences de la présence d'ions chlorure

La corrosion de l'acier du béton apparaît après la destruction de la couche de passivation. Celle-ci est accélérée lorsqu'il y a diffusion de certains agents, dits de corrosion, dans le béton.

Parmi ces agents de corrosion, les ions chlorure ont la faculté de migrer rapidement jusqu'à l'armature métallique. Cette diffusion entraîne le déplacement des ions hydroxyde et ainsi une diminution du pH au niveau du film passif. Il peut en résulter une dépassivation de l'acier et la création d'une micro-pile schématisée ci-dessous :



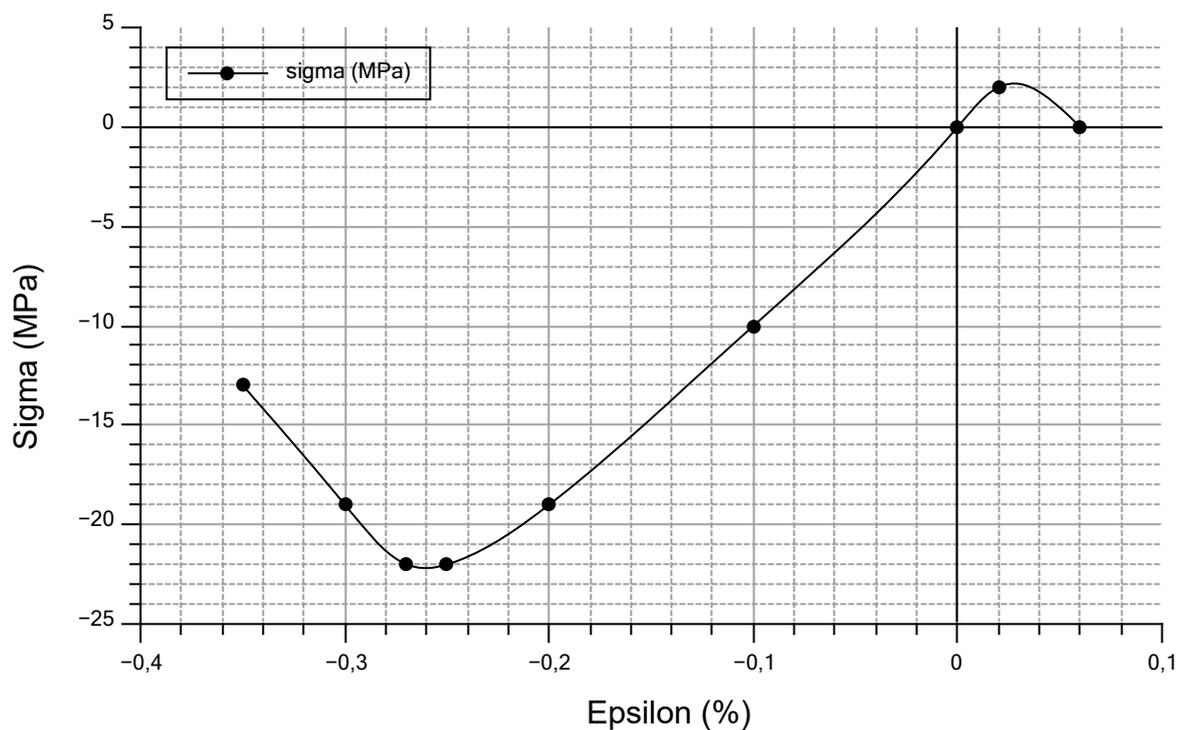
29. Préciser les polarités de la pile ainsi que les réactions se déroulant aux deux pôles (électrodes) en vous appuyant sur le schéma précédent.

30. Le volume molaire des produits d'oxydation ($\text{Fe}(\text{OH})_2$ et $\text{Fe}(\text{OH})_3$) peut être jusqu'à 6 fois supérieur à celui du fer. Expliquer l'apparition de fissures signalées par le client.

31. Indiquer un point de vigilance des fabricants concernant la formulation d'un béton.

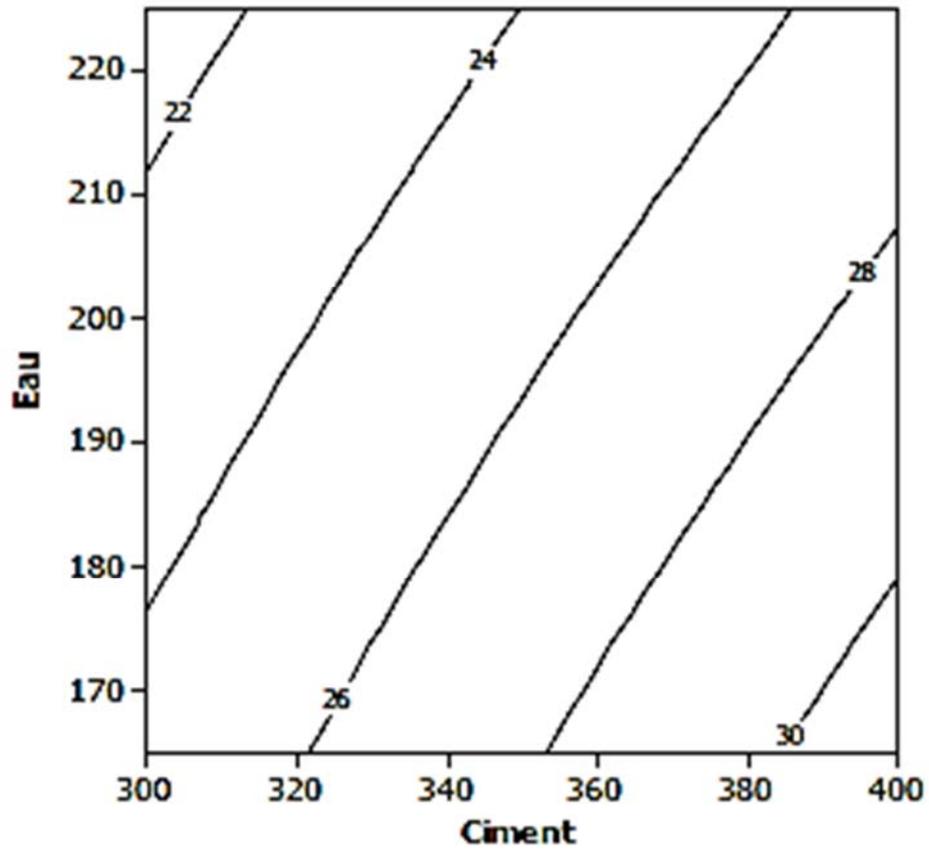
Document réponse 1 (à rendre avec la copie)

Courbe de traction-compression du béton



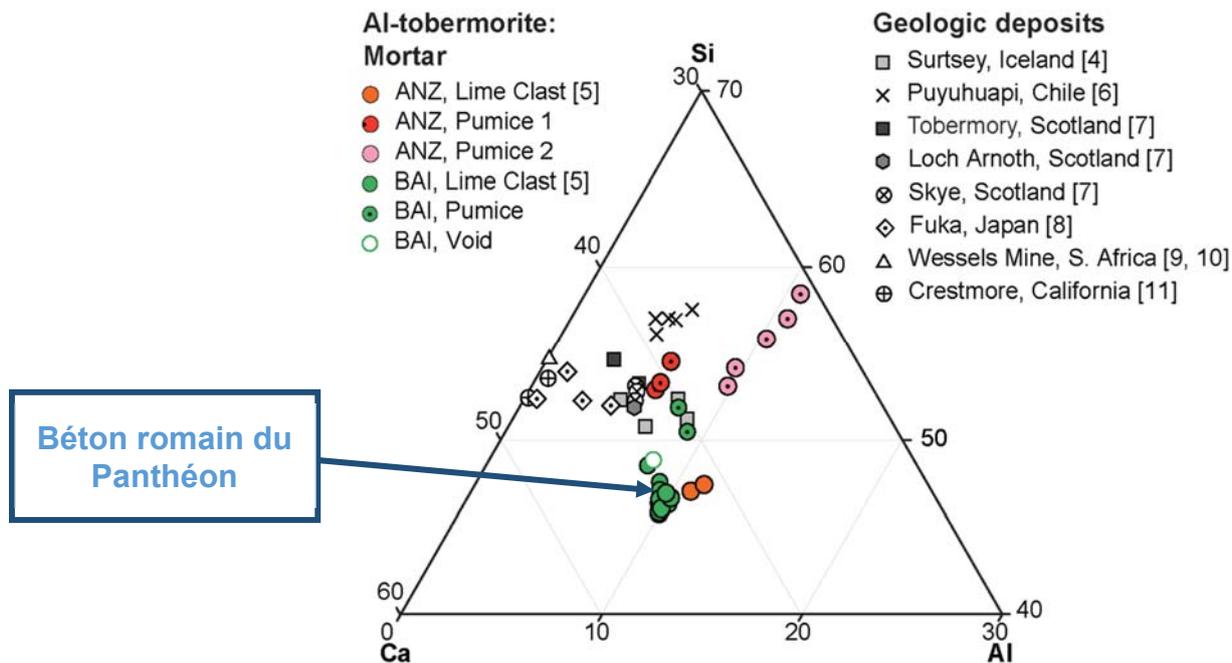
Document réponse 2 (à rendre avec la copie)

Courbe d'isoréponse de la résistance mécanique en compression (en MPa) en fonction de la proportion en eau et en ciment, en kg par m³ de béton.



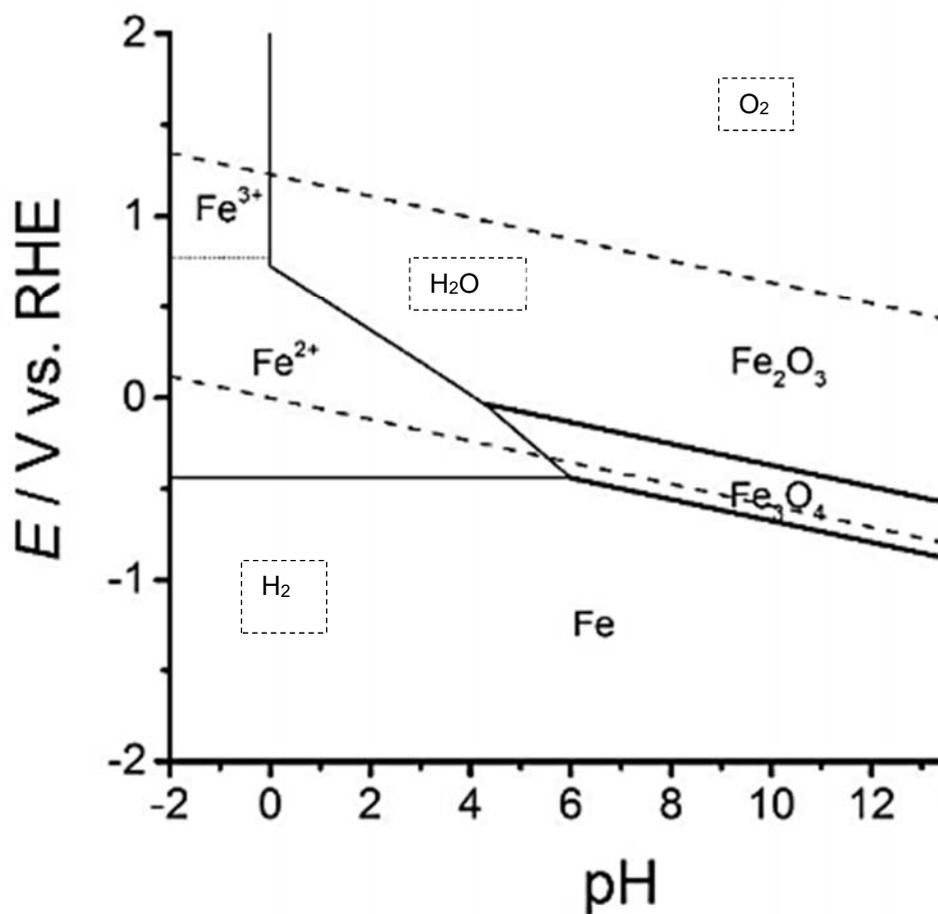
Document réponse 3 (à rendre avec la copie)

Diagramme ternaire réduit du béton romain



Document réponse 4 (à rendre avec la copie)

Diagrammes E-pH superposés du fer et de l'eau



ANNEXE

Sommaire

Annexe 1. Détermination du Z-score pour deux mesures	1
Annexe 2. Modèle de Hershell Buckley	1
Annexe 3. Classification périodique des éléments	2

Annexe 1. Détermination du Z-score pour deux mesures

Utiliser l'expression du z-score pour comparer des résultats de mesure.
Pour deux mesures, X_1 et X_2

$$\text{z-score} = \frac{|X_1 - X_2|}{\sqrt{2s^2}}$$

où s est l'écart-type expérimental d'une série de mesure réalisée avec la méthode d'analyse étudiée.

Annexe 2. Modèle de Hershell Buckley

Le modèle de Hershell Buckley établit que la contrainte de cisaillement τ est relié au taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ par la relation :

$$\tau = \tau_0 + \eta(\dot{\gamma})^n$$

Dans laquelle :

- τ contrainte de cisaillement, en Pa
- τ_0 contrainte seuil, en Pa
- η viscosité dynamique, en Pa.s
- $\dot{\gamma}$ taux de cisaillement, en s^{-1}

Dans ce modèle, un fluide est considéré comme rhéofluidifiant si $n < 1$

Annexe 3. Classification périodique des éléments

Numéros atomiques $Z(X)$, masses molaires $M(X)$ et électronégativités $\chi(X)$ selon l'échelle de Allred et Rochow d'un extrait de la classification périodique des éléments

Groupes :	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Périodes																		
n = 1																		He
	H																	Helium
	Hydrogène																	
Z(X)	1																	2
M(X)	1,001																	4
$\chi(X)$	2,1																	(5,5)
n = 2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
	Lithium	Beryllium											Bore	Carbone	Azote	Oxygène	Fluor	Néon
Z(X)	3	4											5	6	7	8	9	10
M(X)	6,94	9,01											10,81	12,01	14,01	16	19	20,18
$\chi(X)$	0,97	1,47											2,01	2,5	3,07	3,5	4,1	(4,84)
n = 3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
	Sodium	Magnésium											Aluminium	Silicium	Phosphore	Soufre	Chlore	Argon
Z(X)	11	12											13	14	15	16	17	18
M(X)	22,99	24,31											26,98	28,09	30,97	32,06	35,45	39,95
$\chi(X)$	1,01	1,23											1,47	1,74	2,06	2,44	2,83	(3,2)
n = 4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
	Potassium	Calcium	Scandium	Titane	Vanadium	Chrome	Manganèse	Fer	Cobalt	Nickel	Cuivre	Zinc	Gallium	Germanium	Arsenic	Sélénium	Brome	Krypton
Z(X)	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
M(X)	39,10	40,08	44,96	47,9	50,94	52	54,94	55,85	58,93	58,71	63,54	65,37	69,72	72,59	74,92	78,96	79,9	83,8
$\chi(X)$	0,91	1,04	1,2	1,32	1,45	1,56	1,6	1,64	1,7	1,75	1,75	1,66	1,82	2,02	2,2	2,48	2,74	(2,94)
n = 5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
	Rubidium	Strontium	Yttrium	Zirconium	Niobium	Molybdène	Technétium	Ruthénium	Rhodium	Palladium	Argent	Cadmium	Indium	Etain	Antimoine	Tellure	Iode	Xénon
Z(X)	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
M(X)	85,47	87,62	88,91	91,22	92,91	95,94	(99)	101,01	102,91	106,4	107,87	112,4	114,82	118,69	121,75	127,6	126,90	131,3
$\chi(X)$	0,89	0,99	1,11	1,22	1,23	1,3	1,36	1,42	1,45	1,35	1,42	1,46	1,49	1,72	1,82	2,01	2,21	(2,4)