

Projet National

PERFDUB

approche PERFormantielle de
la DURabilité des ouvrages en
Béton

Site internet : www.perfdub.fr
Plateforme collaborative : www.omnispace.fr/perfdub

Groupe de travail : **GT1 – Essai de durabilité**
Titre du document : **Essai accéléré de réaction sulfatique
externe**

Essai accéléré de réaction sulfatique externe (RSE)

Ce document est issu des travaux du Projet National.

INDICE	INTITULE	Contributeurs	DATE
0	Mode opératoire provisoire – V0	F.Cassagnabère	19/03/2021

Sommaire

Introduction	3
1 Domaine d'application	3
2 Références normatives	3
3 Termes et définitions, symboles et unités	3
4 Essai accéléré de RSE par saturation (Méthode A)	5
5 Essai accéléré de RSE par immersion/séchage (Méthode B)	10
Bibliographie	12

Introduction

L'objectif est de démontrer que la formulation de béton que l'on souhaite utiliser (mais dérogeant à certains égards aux exigences de l'approche prescriptive) se comporte mieux vis-à-vis de l'essai de performance qu'une formulation répondant aux exigences en termes de moyens à l'approche prescriptive (norme EN 206/CN). Si cette exigence en termes de (meilleure) performance [9] est vérifiée, on considère que cette formule alternative a une durabilité au moins équivalente à celle répondant aux exigences du point de vue de l'approche prescriptive.

Dans le cadre de l'essai de performance pour la réaction sulfatique externe (RSE), deux modes opératoires ont été retenus. Il s'agit d'essais de vieillissement accéléré sur éprouvettes de béton qui consiste en l'immersion dans une solution d'attaque de sulfate de sodium de même nature après une phase de préconditionnement (saturation ou immersion/séchage). Les différents paramètres d'essais ont été choisis de manière à accélérer suffisamment l'attaque pour obtenir un test discriminant sur béton sur une durée de 12 ou 13 semaines.

Deux méthodes sont disponibles pour la détermination de résistance du béton à la réaction sulfatique :

- Méthode A « Protocole accéléré de RSE par saturation ». Elle est basé sur les travaux de doctorat de S.Messad intitulé « *Mise au point d'un essai de vieillissement accéléré de l'attaque sulfatique externe pour l'application du concept de performance équivalente dans le cadre de la norme NF EN 206* » [1] menée au LMDC Toulouse et une série d'études complémentaires [2-5].
- Méthode B « Protocole accéléré de RSE par immersion/séchage ». Cette méthode est inspirée de la norme Suisse SIA 262 (annexe G) [6].

Le choix entre deux protocoles dépendra de l'équipement disponible dans le laboratoire d'analyse.

1 Domaine d'application

Le présent document spécifie une méthode permettant de déterminer la résistance à la réaction sulfatique externe par un essai accéléré selon deux méthodes différentes. Elles s'appliquent à des éléments de béton confectionnés en laboratoire ou sur chantier, ou bien à des carottes prélevées sur ouvrage ou sur élément préfabriqué à condition que les échantillons soumis à l'essai ne soient pas pollués par les ions sulfates (sulfate de calcium, de magnésium ou sodium).

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

FD P 18-011 : Béton -Définition et classification des environnements chimiquement agressifs -Recommandations pour la formulation des bétons.

NF EN 206/CN, *Béton — Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité*, 2012.

NF EN 12390-2, *Essais pour béton durci — Partie 2 : Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance*, 2012.

NF P18-427, *Détermination des variations dimensionnelles entre deux faces opposées d'éprouvettes de béton durci*, 1996.

NF EN 12390-3, *Essais pour béton durci - Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes*, 2019.

NF P18-459, *Essai de porosité à l'eau et masse volumique sur béton durci*, 2010.

NF P18-462, *Essai sur béton durci – Essai accéléré de migration des ions Chlorure en régime non-stationnaire – Détermination du coefficient de diffusion apparent des ions Chlorure*, 2012.

3 Termes et définitions, symboles et unités

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions, symboles et unités suivants s'appliquent.

Les symboles listés ci-dessous sont utilisés dans le présent document :

R_c	résistance en compression (MPa)
D_{app}	coefficient de diffusion apparent des chlorures (m^2/s)
ρ_w	porosité accessible à l'eau (%)

$V_{\text{béton}}$	volume de béton (m^3)
V_{solution}	volume de solution de sulfate de sodium (m^3)
s_r	répétabilité (%)
s_R	reproductibilité (%)
τ	taux de saturation (%)
M_{air}	masse de l'éprouvette saturée pesée dans l'air (g)
M_{eau}	masse de l'éprouvette saturée pesée dans l'eau (g)
M_{sec}	masse, en gramme, de l'éprouvette sèche dans l'air (g)
var	variation relative du paramètre considéré (%)
m_{initial}	résultat obtenu sur matériau sain
m_{final}	résultat obtenu sur matériau dégradé (après 12 semaines d'immersion)
d	diamètre de la carotte (mm)
L	longueur initial de la carotte longueur initiale à 0.1 mm (mm)
HR	humidité relative (%)
L_0	longueur initiale, à 0,001 mm, mesurée après l'immersion de la carotte dans de l'eau à 20°C pendant 60±10min (mm)
t_0	début de l'essai
m_{Ti}	masse à 0,01 g, mesurée après le séchage du $i^{\text{ème}}$ cycle séchage) avec $i=1$ à 4 (g)
m_{Si}	masse à 0,01 g, mesurée après le $i^{\text{ème}}$ cycle de séchage / immersion, avec $i = 1$ à 4, séchage (50±5°C pendant 120±2 h dans une enceinte ventilée) et immersion (48±2 h d'immersion dans la solution de Na ₂ SO ₄ 33.8 g de SO ₄ /l) (g)
L_i	longueur à 0,001 mm, mesurée après le $i^{\text{ème}}$ cycle de séchage / immersion, avec $i = 1$ à 4, séchage (50±5°C pendant 120±2 h dans une enceinte ventilée) et immersion (48±2 h d'immersion dans la solution de Na ₂ SO ₄ 33.8 g de SO ₄ /l) (g) (mm)
m_{Sj}	masse à 0,01 g à la $j^{\text{ème}}$ mesure après l'immersion permanente dans la solution de sulfate de sodium respectivement à 7, 14, 28 et 56 jours avec $j = 5$ à 8 (g)
L_j	longueur à 0,001 mm à la $j^{\text{ème}}$ mesure après l'immersion permanente dans la solution de sulfate de sodium avec $j = 5, 6, 8, 10$ et 12 respectivement pour 7, 14, 28, 42 et 56 jours (mm)
V_0	volume initial de la carotte (mm^3)
dL_n	modification de longueur aux échéances avec $n = 1$ à 12
dM_{sn}	modification de masse aux échéances avec $n = 1$ à 4
dL_s	l'allongement à l'issue de la conservation permanente dans la solution de sulfate : $dL_s = dL_{12} - dL_4$ (‰)
dm_s	modification de masse à l'issue de la conservation permanente dans la solution de sulfate $dm_s = (m_{s12} - m_{s4}) / V_0$ (kg/m^3)

4 Essai accéléré de RSE par saturation (Méthode A)

L'essai de vieillissement accéléré dans le cadre de l'attaque sulfatique externe, consiste en l'immersion, pendant 12 semaines, d'éprouvettes de béton pré-saturées, dans une solution d'attaque de sulfate de sodium de même nature et concentration que celle ayant servi à la saturation. Les différents paramètres d'essais ont été choisis de manière à accélérer suffisamment l'attaque pour obtenir un test discriminant sur béton sur une durée de 12 semaines.

4.1. Matériel :

- Laboratoire régulé à $20\pm 2^\circ\text{C}$
- Plots en inox à coller
- Balance de résolution 0,01g précise à 0,03 g près.
- Pied à coulisse de résolution 0,01 mm précis à 0,05 mm.
- Compresseur de résolution 0,001 mm précis à 0,002 mm.
- Etuve ventilée, régulée à $50\pm 2^\circ\text{C}$ avec un bon renouvellement de l'air dans et autour de l'étuve.
- Dispositif de saturation sous vide (exemple de dispositif en Figure X) avec un récipient de volume suffisant pour permettre l'immersion totale du corps d'épreuve lors de sa saturation par la solution de Na_2SO_4 (6,0 g de SO_4/l) et pompe à vide permettant de réduire et maintenir la pression à une valeur inférieure ou égale à 25 mbar (2,5 kPa)
- Bac d'immersion avec régulation de pH et de température (exemple de dispositif en Figure 1).

4.2. Réactifs :

- Solution de sulfate de sodium Na_2SO_4 dont la concentration est de 8,9g/L (6 g/L of SO_4) pour la phase de saturation et d'immersion des échantillons.
- Eau distillée ou déminéralisée.
- Solution d'acide sulfurique (H_2SO_4) diluée à 5g/l préparée à partir d'eau déionisée et d'acide sulfurique pur.

4.3. Corps d'épreuve

Les mesures des caractéristiques physiques et mécaniques qui vont servir à évaluer la durabilité du matériau, à l'état sain, sont les suivants :

- coefficient de diffusion des chlorures,
- résistance mécanique en compression,
- porosité accessible à l'eau.

Les essais qui vont servir à évaluer la vitesse de dégradation sont, principalement, les mesures d'expansions et de suivi de masse.

Toutefois, il est recommandé d'effectuer les mesures des caractéristiques physiques et mécaniques, également, sur les éprouvettes qui ont été soumises à l'essai de vieillissement accéléré. En effet, l'évolution de ces paramètres entre l'état initial (sain) et l'état final (après dégradation) rendent eux aussi compte de l'endommagement subi par le matériau et apportent plus de précisions sur les mécanismes responsables de la plus ou moins grande sensibilité d'une formulation donnée à l'attaque sulfatique.

A l'exception des mesures d'expansion et du suivi de masse, les autres mesures sont réalisées sur deux séries d'échantillons : à l'état sain juste après la période de cure et à l'état dégradé après 12 semaines d'immersion. Pour chacun de ces essais, la mesure est effectuée sur trois échantillons, le résultat et l'incertitude sont donnés par la moyenne et l'écart type.

Le Tableau 1 dresse un bilan du nombre et du type d'échantillons associés à chaque essai ainsi que du nombre et du type d'éprouvettes à prévoir par gâchée.

Tableau 1. Bilan du nombre et du type d'échantillons associés à chaque essai

Essai	Type d'échantillon	Nombre d'échantillons à tester	
		à l'état sain	à l'état dégradé
Résistance en compression (R_c)	Cylindres (x6) ($\varnothing 11 \times h 22$) cm	3	3
Migration des ions Cl^- (D_{app})	Cylindres (x6) ($\varnothing 11 \times h 5$) cm	3	3
Porosité accessible à l'eau (p_w)	Cylindres (x6) ($\varnothing 11 \times h 5$) cm	3	3
Expansion et suivi de masse	Prisme (x3) ($7 \times 7 \times 28$) cm	-	3

Pour une gâchée, il faudra prévoir pour la totalité de la campagne de caractérisation 3 prismes et 10 cylindres

Pour les classes XA1 et XA2, utilisant la méthode comparative, au minimum, deux gâchées sont nécessaires ; l'une pour l'élaboration du béton de référence et l'autre pour l'élaboration du béton à qualifier.

4.4. Essais sur matériau sain.

Dans le cadre des classes XA1 et XA2, utilisant la méthode comparative, le béton de référence et le béton à qualifier sont testés à l'état sain par la mesure des propriétés physiques et mécaniques du matériau

Les mesures à réaliser sur matériau sain sont effectuées après 28 jours de cure, en respectant les recommandations données dans la norme, le guide ou le protocole établi pour chaque essai (Tableau 2).

Tableau 2. Essais à mener sur bétons à l'état sain (avant protocole de RSE)

Essais	Références
Résistance mécanique en compression (R_c)	NF EN 12390-3
Migration des ions Cl^- (D_{app})	NF P18-462
Porosité accessible à l'eau (p_w)	NF P18-459

Dans le cas de bétons contenant des additions, il est préférable d'effectuer les essais après 90 jours de cure, afin de prendre en compte l'évolution des propriétés du matériau au-delà de 28 jours.

4.5. Conduite de l'essai

4.5.1. Préconditionnement

Après gâchage, les éprouvettes sont placées en cure humide durant 28 jours (20°C, 100% d'humidité relative). A la fin de la cure humide, les échantillons sont sciés afin d'obtenir la dimension souhaitée du corps d'épreuve.

Pour les mesures d'expansion (norme NF P18-427), il est nécessaire d'utiliser des plots en acier inoxydable (noyés ou collés), afin d'éviter les problèmes de corrosion qui pourraient se produire au cours du séchage ou de l'immersion des éprouvettes dans la solution d'attaque.

Pour les résistances en compression (norme NF EN 12390-3), les éprouvettes, soumises à l'essai de dégradation, doivent être rectifiées avant les étapes de séchage et de saturation.

4.5.2. Séchage

Après la cure (28 ou 90 jours), les échantillons à dégrader sont placés en étuve à 60°C jusqu'à ce que la variation de masse, entre deux pesées successives réalisées à 24 h d'intervalle, ne dépasse pas 0,1%.

4.5.3. Saturation

A la sortie de l'étuve à 60°C, les éprouvettes doivent, d'abord, être ramenées à température ambiante et placées en étuve à 30°C ou 40°C pour éviter la reprise d'eau jusqu'à la mise en saturation.

Les échantillons sont, ensuite, saturés sous vide par une solution d'attaque de sulfate de sodium dont la concentration a été fixée à 8,9g/l. Le dispositif (Figure 1) est identique à celui utilisé pour la mesure de la porosité accessible à l'eau (norme NF P18-459).

Le temps de saturation est donc de 48h (4h de vide, 44h d'immersion).

Figure 1. Dispositif de saturation sous vide



4.5.4. Immersion des éprouvettes

a. Préparation des solutions

Au cours de l'essai, deux solutions sont préparées : l'une destinée à la régulation du pH, l'autre à la saturation et à l'immersion des éprouvettes.

- La solution servant à la régulation du pH est une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4) diluée à 5g/L préparée à partir d'eau déionisée et d'acide sulfurique pur.
- La solution d'attaque est une solution de sulfate de sodium dont la concentration a été fixée à 8,9g/L préparée à partir d'eau déionisée et de sel de sulfate de sodium.

b. Conditions d'essai

Les éprouvettes pré-saturées sont placées dans des bacs puis immergées dans une solution de sulfate de sodium dont la concentration est de 8,9g/l. Le pH et la température de la solution sont contrôlés tout au long de l'essai avec un pH maintenu à 7 (± 1) et une température devant rester supérieure à 25°C. Le renouvellement de la solution d'attaque doit être effectué tous les mois. La durée de l'essai a été fixée à 12 semaines.

Les conditions auxquelles sont soumis les échantillons sont récapitulées dans le Tableau 3.

Tableau 3. Condition d'essai LMDC	
Condition d'exposition	Immersion continue
Contrôle du pH à l'acide sulfurique	contrôlé à 7 (± 1)
Concentration en Na_2SO_4 de la solution d'attaque	8.9 g/L de Na_2SO_4 (6 g/L of SO_4)
Température	Contrôlée à 25°C
Renouvellement de la solution	Toutes les 4 semaines
$V_{\text{béton}}/V_{\text{solution}}$	1,0
Durée du test	12 semaines

4.6. Dispositif expérimental

Le dispositif est constitué d'un bac contenant la solution d'attaque et les éprouvettes, d'un agitateur permettant l'homogénéisation de la solution, d'un régulateur de température qui se déclenche à chaque fois que la température chute en dessous de 25°C, d'une électrode qui permet de suivre l'évolution du pH dans la solution d'attaque, d'un régulateur de pH (qui se déclenche à chaque fois que le pH devient supérieur à 7) relié à un autre bac contenant une solution d'acide sulfurique diluée à 5g/l.

L'ensemble du dispositif est représenté sur la Figure 2.

Figure 2. Dispositif expérimental de l'essai à saturation

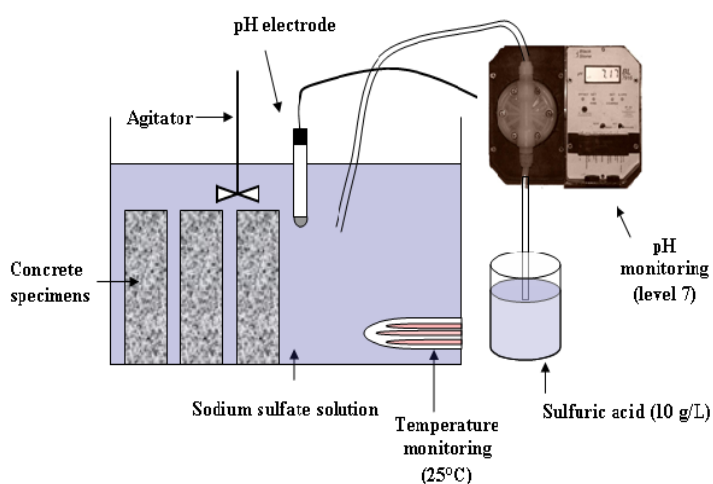


Schéma du dispositif



Photo du dispositif

4.7. Mesure de suivi de dégradation et mise en forme des résultats

4.7.1. Mesure de variation d'élongation et de masse dans le temps

Pour les expansions et le suivi de masse, les mesures sont effectuées toutes les semaines en suivant les recommandations de la norme NF P18-427 et la mesure initiale doit être réalisée juste après l'étape de saturation et avant l'immersion dans les bacs. A chaque mesure les plots de retrait doivent être nettoyés afin d'enlever l'eau et la couche de

sel ayant précipité en surface des plots. La mesure ne doit pas excéder 15 minutes afin de limiter l'évaporation de la solution d'attaque en surface d'éprouvette.

4.7.2. Mise en forme des résultats

Pour chaque essai, la mesure est réalisée sur 3 échantillons. Le résultat et l'incertitude sont donnés par la moyenne et la dispersion des résultats (min & Max).

Pour les mesures d'expansion et de suivi de masse, les résultats sont représentés graphiquement en fonction de la durée d'immersion.

4.8. Fidélité de la méthode

On ne dispose pas encore de données relatives à la fidélité de cette méthode d'essai.

4.9. Essais « optionnels »

4.9.1. Mesure du taux de saturation des éprouvettes

Juste après saturation, il est possible de calculer le taux de saturation des éprouvettes en réalisant une pesée dans l'eau et une pesée dans l'air. Le taux de saturation peut alors être calculé selon le même principe que la porosité accessible à l'eau à la différence près que la masse sèche est celle obtenue à la sortie de l'étuve à 80°C.

Le résultat est exprimé de la manière suivante :

$$\tau = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \cdot 100$$

Où :

τ est le taux de saturation en %,

M_{air} est la masse, en gramme, de l'éprouvette saturée pesée dans l'air,

M_{eau} est la masse, en gramme, de l'éprouvette saturée pesée dans l'eau,

M_{sec} est la masse, en gramme, de l'éprouvette sèche dans l'air.

Ce calcul permet, ainsi, de s'assurer qu'une grande partie de la porosité est saturée par la solution d'attaque, en comparant les taux de saturation avec les résultats de porosité accessible à l'eau obtenus sur matériau sain.

4.9.2. Mesures des propriétés mécaniques et physiques sur matériau à l'état dégradé

Les mesures des caractéristiques physiques et mécaniques [8] effectuées sur matériau sain qui ont servi à caractériser la durabilité du matériau peuvent également être réalisées sur les éprouvettes ayant subi l'essai de vieillissement accéléré, après les 12 semaines d'immersion.

Il est alors possible de calculer la variation relative d'un paramètre donné :

$$var = \frac{m_{initial} - m_{final}}{m_{initial}} \cdot 100$$

Où :

var est la variation relative en % du paramètre considéré,

$m_{initial}$ est le résultat obtenu sur matériau sain,

m_{final} est le résultat obtenu sur matériau dégradé (après 12 semaines d'immersion).

Deux bétons de compositions différentes peuvent ainsi être comparés vis-à-vis de la variation relative des caractéristiques mécaniques et physiques qui a eu lieu au cours de l'essai de vieillissement accéléré.

5 Essai accéléré de RSE par immersion/séchage (Méthode B)

Le second protocole accéléré est basé sur l'annexe G de la norme suisse SIA 262 [6]. Dans cet essai des carottes de **béton curées à 100% HR pendant 90 jours**[°] sont soumises à 4 cycles successifs de séchage à 50°C / imbibition à 20°C avec une solution à **50 g de Na₂SO₄ / l soit 33,8 g de SO₄ / l**, suivi d'une conservation de 56 jours supplémentaires dans cette solution. La longueur et la masse de chaque carotte sont mesurées régulièrement. **L'essai dure 25 semaines (5,8 mois) avec une cure de 90 jours**¹.

Les carottes sont prélevées dans des corps d'épreuve de laboratoire (idéalement des 2 cubes 150x150x150 mm) ou sur ouvrage.

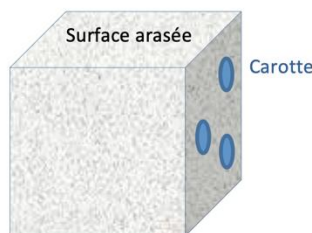
5.1. Matériel :

- Laboratoire régulé à 20±2°C
- Plots en inox à coller
- Balance de résolution 0,01g précise à 0,03 g près
- Pied à coulisse de résolution 0,01 mm précis à 0,05 mm.
- Comparateur de résolution 0,001 mm précis à 0,002 mm.
- Etuve ventilée, réglée à 50±2°C avec un bon renouvellement de l'air dans et autour de l'étuve.

5.2. Corps d'épreuve

Les corps d'épreuve sont deux cubes 150 x 150 x 150 mm curés selon la norme SN EN 12390-2. Entre le 87 et 89^{ème} jour de cure prélever 6 carottes traversantes de 28 mm +/- 1 mm dans les faces latérales de deux cubes (figure 3).

Figure 3. Prélèvement de carottes dans les cubes



Avant le carottage rectifier par ponçage la face de carottage et la face opposée de manière à ce qu'elles soient bien parallèles entre elles. Carotter pour extraire 3 carottes par cube. Utiliser un carottier en bonne état et une carotteuse d'une puissance adaptée. Assurer une avancé régulière du carottier, ne pas « forcer » sur la carotteuse ce qui aurait pour effet de créer une éventuelle microfissuration des carottes et une découpe irrégulière. La longueur des carottes doit être comprise entre 145 et 150 mm.

Avec le pied à coulisse mesurer la longueur initiale (L) en mm à 0.1 mm près des 6 carottes et leur diamètre (d) en mm en plusieurs points à 0,1 mm près. Conserver les carottes dans des boites à 20±2°C et entre 70 et 90% HR.

Le 90^{ème} jour, coller les plots en inox aux deux extrémités des carottes avec une résine époxy en utilisant le dispositif de centrage. Repérer l'emplacement du plot avec un crayon à papier. La part de la surface qui est couverte par le plot et la colle ne doit pas excéder 15 mm de diamètre.

5.3. Réalisation de l'essai

Une heure avant de débuter plonger les carottes dans de l'eau à 20°C pendant 60±10 min puis mesurer la longueur initiale (L₀) en mm à 0,001 mm près en utilisant la barre d'invar de 145 mm. Contrôler régulièrement cette barre et le comparateur avec une barre de référence.

A t₀ de l'essai, placer les carottes dans une enceinte ventilée à 50±5°C pendant 120±2 heures (5 jours). Les carottes doivent être placées sur de petites baguettes triangulaires de 10 mm de haut et des étagères perforées pour permettre une circulation homogène de l'air autour du béton. Au bout de ce temps sortir les carottes de l'étuve, les mettre à refroidir à 20±2°C pendant 1 heure dans une boîte étanche ou un dessiccateur (HR < 5%) puis mesurer leur masse (m_{T1}) en g à 0,01g près.

¹ La cure de 90 jours est prescrite pour les bétons de ciments composés ou des bétons contenant des additions minérales chimiquement réactives. Elle peut être réduite à 28 jours pour des bétons à base de CEMI ou ne contenant d'addition minérales non réactives.

Plonger ensuite les 6 carottes pendant 48 ± 2 h dans une solution à 50 g/l de Na_2SO_4 (33.8 g de SO_4/l). La solution est préparée en versant 50 g de Na_2SO_4 dans 950 g d'eau déminéralisée. Le volume de solution (V_{solution}) doit être de 2,4 litres. Les carottes doivent être totalement immergées. Les boîtes doivent avoir un couvercle étanche. Les carottes doivent être séparées du fond de la boîte, des parois et entre elles d'au moins 10 mm. Mettre uniquement une série de 6 carottes par boîte. Au bout de ce temps sortir les carottes de la solution les essuyer, mesurer leur longueur (L_1) en mm à 0,001 mm près et les peser (m_{s1}) en g à 0,01g près.

Replacer les carottes dans l'étude et effectuer 3 autres cycles identiques au premier. Mesurer m_{T2} , m_{T3} et m_{T4} , L_2 , L_3 et L_4 , m_{s2} , m_{s3} et m_{s4} .

Suite au 4^{ème} cycle, après la mesure de masse et de longueur, replacer les carottes dans la solution de sulfate pendant 56 jours. A 7, 14, 28 et 56 jours à partir du début de cette immersion permanente, sortir les carottes, les essuyer et mesurer leur longueur et masse L_5 et m_{s5} à 7 jours, L_6 et m_{s6} à 14 jours, L_8 et m_{s8} à 28 jours, L_{10} et m_{s10} à 42 jours, L_{12} et m_{s12} à 56 jours avec une précision de 0,001 mm et 0,01g.

5.4. Calculs et résultats de l'essai

Divers calculs sont à réaliser pour suivre l'évolution de la RSE :

Calcul du volume initial des carottes : $V_0 = (d^2 \cdot \pi \cdot L) / 4 \cdot 10^9$ en m^3 , d et L en mm.

Calcul de la modification de longueur aux échéances : $dL_n = (L_n - L_0) / L_0$ en %, n = 1 à 12.

Calcul de la modification de masse aux échéances : $dm_{sn} = (m_{sn} - m_{Tn}) / V_0$ en kg/m^3 , n = 1 à 4.

Calcul de l'allongement à l'issue de la conservation permanente dans la solution de sulfate : $dL_s = dL_{12} - dL_4$ en %.

Calcul de la modification de masse à l'issue de la conservation permanente dans la solution de sulfate : $dm_s = (m_{s12} - m_{s4}) / V_0$ en kg/m^3 .

Noter tous problèmes et signes de dégradation observés lors de l'essai (fissuration des carottes, décollement des granulats, décollement des plots...).

Le résultat final de l'essai est la moyenne de l'allongement à l'issue de la conservation permanente dans la solution de sulfate (dL_s) sur les 6 éprouvettes (ou moins si certaines éprouvettes ne sont plus mesurables en fin d'essai).

Remarque : En cas de valeurs extrêmes élevées et dissymétriques par rapport à la moyenne, la moyenne peut être remplacée par la médiane des résultats.

5.5. Fidélité de la méthode

La méthode d'essai est fiable selon :

- une répétabilité de 0,02%,
- une reproductibilité suivant le niveau d'expansion (Tableau 4).

Tableau 4. Reproductibilité de l'essai selon le niveau d'expansion

Niveau d'expansion (‰)	Reproductibilité (‰)
0,20	0,05
0,77	0,22
1,79	0,61

Les valeurs de de répétabilité et reproductibilité sont issus de l'étude [7].

Bibliographie

- [1] (Messad 2009) Messad S. Mise au point d'un essai de vieillissement accéléré de l'attaque sulfatique externe pour l'application du concept de performance équivalente dans le cadre de la norme NF EN 206. Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse, 2008.
- [2] (Garcia 2009) Garcia V. M. Carcassés Complément expérimental 1 à la thèse de S. Messad, Rapport de recherche LMDC, 2009.
- [3] (Cassagnabère et al. 2013) Cassagnabère F., Carcassés M. Complément expérimental 2 à la thèse de S. Messad, Rapport de recherche LMDC, 2013.
- [4] (Rozière et al, 2013) Rozière E., Loukili A., El Hachem R. Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle (basée sur des essais de vieillissement accéléré) Compléments expérimentaux : influence du séchage à 80°C sur le classement des performances des bétons exposés aux attaques sulfatiques externes, Rapport de recherche GEM, 2013.
- [5] (Linger, 2014) Linger L. Carcasses M. Rozière E. Cassagnabere F. Cussigh F. Nicot P. Essai de vieillissement accéléré de l'attaque sulfatique externe pour l'application du concept de performance équivalente dans le cadre de la norme EN 206-1.
- [6] (SIA 262, 2013) Construction en béton – Spécifications complémentaires. Norme Suisse, 2013.
- [7] Roman Loser, VAB-Ringversuch Sulfatwiderstand von Beton nach SIA 262/1, Anhang D, Schlussbericht, Rapport VAB/ALA. Association des laboratoires accrédités d'essais des matériaux de construction, 2013.
- [8] « Grandeurs associées à la durabilité des bétons » (Ed. by G. Arliguie & H. Hornain, RGCU — AFGC — Presses de l'ENPC, Paris, avril 2007).
- [9] Maîtrise de la durabilité des ouvrages d'art en béton — Application de l'approche performantielle, Recommandations provisoires, Techniques et Méthodes des LPC (LCPC, Paris, mars 2010), 56 p.