



# ADAPTATION D'UNE MÉTHODOLOGIE DE CYCLES GEL-DÉGEL POUR DES COMPOSITES CIMENTAIRES À BASE DE GRANULATS DE PET

Mohamad Ali, Rose-Marie Dheilily, Michèle Queneudec t'Kint, Adeline Goullieux

## ► To cite this version:

Mohamad Ali, Rose-Marie Dheilily, Michèle Queneudec t'Kint, Adeline Goullieux. ADAPTATION D'UNE MÉTHODOLOGIE DE CYCLES GEL-DÉGEL POUR DES COMPOSITES CIMENTAIRES À BASE DE GRANULATS DE PET. Conférence Internationale Francophone NoMaD 2015, Nov 2015, Douai, France. 2015. <hal-01349079>

**HAL Id: hal-01349079**

**<https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-01349079>**

Submitted on 26 Jul 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Douai, France  
5-6 Novembre 2015

## **ADAPTATION D'UNE MÉTHODOLOGIE DE CYCLES GEL-DÉGEL POUR DES COMPOSITES CIMENTAIRES À BASE DE GRANULATS DE PET**

ALI Mohamad, DHEILLY\* Rose-Marie, QUENEUDEC T'KINT Michèle, GOULLIEUX Adeline

Laboratoire EPROAD-EA 4669 Axe IMaP – UPJV, 7 Rue du Moulin Neuf, 80000 Amiens, France

\*rose-marie.dheilly@u-picardie.fr

**RESUMÉ** : Les plastiques sont utilisés en grande quantité dans les emballages alimentaires. Leur recyclage est une préoccupation majeure. Une des voies intéressantes est leur valorisation matière au sein de matériaux de construction, elle est la mieux adaptée au Développement Durable. Depuis une dizaine d'années plusieurs études ont été réalisées pour utiliser ces déchets comme granulats dans des matrices cimentaires mais la durabilité de ces composites est encore mal connue.

Ce travail est une contribution à l'étude de la durabilité des matériaux formulés avec des granulats issus d'emballages de post consommation à base de polyéthylène téréphtalate (PET) avec comme seule technique de transformation le broyage. Les particules de PET ont été substituées au sable selon une même fraction volumique. Les taux de substitution choisis sont 25, 50 et 75%. Il s'agit de bétons légers présentant une porosité importante et variable suivant le taux de substitution. Une méthodologie de cycles gel-dégel a dû alors être adaptée à ce type de composite cimentaire. Les travaux réalisés ont conduit à choisir la procédure A de la norme ASTM C 666 03. Les différents essais ont permis, pour chacun des taux de substitution, d'établir les couples temps-température permettant de respecter au mieux cette norme.

**MOTS CLES** : Polyéthylène téréphtalate (PET), Gel-dégel, Béton léger, Durabilité, Valorisation.

---

## 1. INTRODUCTION

Depuis plus de 25 ans les matières plastiques sont utilisées dans tous les domaines de la vie quotidienne. L'augmentation de la population et une recherche constante de l'amélioration du niveau de vie ont conduit à une forte consommation de ces matières plastiques et à la création d'une quantité importante de déchets de post-consommation. Le développement de nouveaux modes de fabrication et/ou le recyclage sont proposés comme solutions permettant la réduction de la production de déchets et la limitation de l'impact des activités humaines sur l'environnement (Damien, 2013).

La valorisation matière au sein de matériaux de construction est très intéressante pour donner une « seconde vie » à ces déchets. En fonction du taux d'incorporation des granulats de matières plastiques, les composites obtenus présentent des propriétés thermo-physiques et mécaniques différentes permettant de les classer en tant qu'isolants ou isolants porteurs (Choi et al., 2005, Yazoghli, 2005, Ismail et al., 2008, Albano et al., 2009, Choi et al., 2009, Frigione, 2010, Saikia et al., 2012).

Aujourd'hui les mécanismes de vieillissement de ces matériaux (PET) ne sont pas complètement élucidés. Pour déterminer l'influence des conditions environnementales sur les composites cimentaires, le test des cycles gel-dégel a été choisi. Il vise à déterminer les effets de larges variations de températures sur les propriétés physico-mécaniques des bétons, et est destiné à fournir une mesure quantitative de la durée de service qui peut être attendue. Une étude bibliographique a permis d'identifier que ces essais peuvent être réalisés suivant plusieurs normes : ASTM C 666/C 666M 03 (procédures A (Wilson et al., 1988, Malhotra et al., 1989, Saito et al., 1994, Jo et al., 2007, Shang et al., 2009, Kockal et al., 2010 et Kockal et al., 2011.) et B (Tikalsky et al., 2004, Polat et al., 2010, Karakoç et al., 2011 et Agavriloaie et al., 2012)), CSN 73 1322 (Kucharczyková et al., 2010 et 2012), NF P18-424/ 425 (Mohamed., 2011 et Haidar., 2011.), GBJ82-85 (Shang et al., 2006, 2008 et 2009). Les durées des phases de gel et de dégel ainsi que les températures à appliquer sont spécifiques à chaque norme.

La procédure A de la norme américaine ASTM C 666 03 consiste en une congélation rapide suivie d'une décongélation, menées dans l'eau, pour des échantillons préalablement saturés en eau. Le cycle de cette méthode d'essai doit consister en un gel des échantillons ( $4\pm 2$  à  $-18\pm 2$  °C) puis un dégel ( $-18\pm 2$  à  $4\pm 2$  °C) sur une durée de 2 à 5 h. L'essai doit être poursuivi pour chaque échantillon jusqu'à ce qu'il ait été soumis à 300 cycles ou jusqu'à ce que son module d'élasticité dynamique atteigne 60% du module initial (Wilson et al., 1988, Malhotra et al., 1989, Saito et al., 1994, Jo et al., 2007, ASTM C666, 2008, Shang et al., 2009, Kockal et al., 2010 et Kockal et al., 2011.). Quant à la procédure B, de cette même norme, elle préconise pour le même type d'échantillons une congélation rapide dans l'air et une décongélation dans l'eau (Tikalsky et al., 2004, ASTM C666, 2008, Polat et al., 2010, Karakoç et al., 2011 et Agavriloaie et al., 2012). Dans le cas de la norme tchèque CSN 73 1322, les échantillons ne sont pas préalablement saturés et sont comparés à un échantillon ayant subi une cure air-eau sans modification de température. Le cycle de cette méthode d'essai doit consister en un gel des échantillons (20 à -20 °C) puis un dégel (-20 à 20°C) sur une durée totale de 6h : 4 h gel et 2 h dégel. L'essai doit être poursuivi pour chaque échantillon jusqu'à ce qu'il ait été soumis à 200 cycles (Kucharczyková et al., 2010 et 2012). La norme NF P 18-424, connue sous le nom d'essai du gel sévère, consiste à réaliser le gel et le dégel dans l'eau. Pour la norme NF P18-425, appelée essai du gel modéré, le gel est réalisé dans l'air et le dégel dans l'eau. Les essais se composent de 300 cycles au cours desquels la température varie de  $9\pm 3$ °C à  $-18\pm 2$ °C (Mohamed, 2011 et Haidar., 2011.). La norme chinoise GBJ82-85 est similaire à la norme ASTM C 666. Les éprouvettes, complètement entourées d'eau, subissent au cours d'un cycle de 2,5 à 3h, une variation de température de  $-17\pm 2$  à  $8\pm 2$  °C (Shang et al., 2006, 2008 et 2009). La norme ASTM C 666 Procédure A est celle qui a été retenue pour ces travaux, parce qu'elle est la plus utilisée par la profession pour l'étude des bétons légers (Wilson et al., 1988, Malhotra et al., 1989, Saito et al., 1994, Jo et al., 2007, Shang et al., 2009, Kockal et al., 2010 et Kockal et al., 2011).

Pour respecter et appliquer cette norme, la relation entre la température de consigne de l'enceinte et la température au centre des éprouvettes, ainsi que les couples temps-température ont dû être déterminés.

## 2. MATIÈRES PREMIÈRES ET TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

### 2.1 Matières premières

Le liant hydraulique, utilisé pour cette étude, est un ciment Portland artificiel CPA CEM I 52,5 produit et fourni par la cimenterie Calcia de Gaurain (Belgique). Il contient plus de 95% de clinker. Sa composition chimique et ses caractéristiques physiques sont celles données par la documentation technique (Documentation Technique, Ciment Calcia, 2014).

Le sable utilisé est un sable à maçonner 0/4 (NF EN 12620) de masse volumique apparente  $1602 \text{ kg/m}^3$  et de masse volumique réelle  $2222 \text{ kg/m}^3$ . Sa répartition granulométrique est identique à celle présentée par Ali et al. (2014).

Les granulats de PET utilisés sont obtenus à partir de bouteilles d'eau minérale, préalablement triées, lavées et broyées. Ils sont broyés à une dimension maximale de 2 mm (Ali et al., 2014). Leur masse volumique apparente est égale à  $403 \text{ kg/m}^3$  et leur masse volumique réelle est égale à  $840 \text{ kg/m}^3$ .

L'eau de gâchage est de l'eau du réseau présentant un pH égal à 7,54.

### 2.2 Techniques expérimentales

#### 2.2.1 Elaboration des composites

Les composites sont élaborés selon la norme NF EN 196-1. Le rapport massique S/C (sable/ciment) est égal à trois. Le rapport E/C (eau/ciment), dans le cas de la substitution du sable par le PET, est déterminé pour que la valeur de la maniabilité soit constante et égale à celle du mortier de référence sans PET (Tableau 1).

Tableau 1 : Valeurs du rapport E/C en fonction du taux de substitution du sable

| PET (%) | 0    | 25  | 50   | 75   |
|---------|------|-----|------|------|
| E/C     | 0,48 | 0,5 | 0,55 | 0,68 |

Les granulats de PET sont intégrés au mélange de référence sur la base d'une substitution volumique de sable. Trois taux de substitution sont utilisés : 25, 50 et 75%. Une étude préalable a permis d'établir la formulation du mortier de référence en fonction de l'optimum des résistances mécaniques. Ce mortier présente un rapport E/C égal à 0,48 (Ali et al., 2014).

#### 2.2.2 Fabrication des éprouvettes

Tableau 2 : Etapes de confection du mortier

| Etape                | 1                                      | 2  | 3  | 4  |
|----------------------|--|--|--|--|
| Constituants ajoutés | Eau + ciment                           | Sable ou sable+PET                       |  |  |
| Etape de malaxage    | Vitesse lente ( $140 \pm 5$ tours/min) | Vitesse rapide ( $285 \pm 10$ tours/min) | Arrêt du malaxeur pour décoller des parois le mortier adhérent | Vitesse rapide ( $285 \pm 10$ tours/min) |
| Temps de l'étape     | 30 s                                   | 30 s                                     | 1 min 30 s   | 60 s                                     |

Le mortier est confectionné selon la norme NF EN 196-1 en respectant les étapes données dans le Tableau 2.

### 2.2.3 Équipement d'application et de mesure de la température

Les essais ont été réalisés dans une enceinte climatique BINDER de la série MK dont les dimensions sont 1615x2005x1230 mm<sup>3</sup> (Notice d'utilisation APT.lineTM.MK BINDER). Elle convient aux essais thermiques entre -40 °C et 180 °C. Elle permet de reproduire de manière continue des cycles de refroidissement-chauffage préprogrammés. Elle est pilotée par un régulateur connecté à un thermocouple placé à l'intérieur, et équipée d'un ventilateur permettant de distribuer l'air refroidi à la température de consigne à l'aide d'un système réfrigérant.

Grâce à des thermocouples, différentes températures ont été relevées au cours des essais : la température de consigne (Tc) et la température de l'air dans l'enceinte (Ta), la température au centre des matériaux (Tm) et la température de l'eau entourant ceux-ci (Te). Pour mesurer la température Tm, un thermocouple a été positionné au moment de la fabrication au centre de chaque éprouvette. La lecture des températures a été réalisée soit manuellement grâce à un afficheur digital (précision à  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ ), soit automatiquement grâce à un système d'acquisition de données (précision à  $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$ ) relié à un ordinateur.

### 2.2.4 Les essais de gel-dégel

La majorité des études de durabilité en gel-dégel portant sur les bétons légers ont appliqué la norme ASTM C 666 Procédure A qui est proche de la norme française NF P18-424 (Tableau 3).

Tableau 3. Caractéristiques principales des normes américaine et française

| Norme                        | Principe                          | Durée totale du cycle (h) | Températures de gel-dégel. |
|------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| ASTM C 666 03<br>procédure A | gel et dégel réalisés dans l'eau. | 2-5                       | -18 $\pm$ 2/4 $\pm$ 2 °C   |
| NF P18-424                   | gel et dégel dans l'eau.          | 4-6                       | -18 $\pm$ 2/ 9 $\pm$ 3 °C  |

Selon la norme américaine, les éprouvettes utilisées doivent présenter une largeur, une profondeur ou un diamètre compris entre 75 et 125 mm, et une longueur comprise entre 275 et 405 mm. Cette recommandation n'a pas été suivie pour ces travaux car les équipements de caractérisation mécanique au sein du laboratoire sont prévus pour des éprouvettes 40x40x160 mm selon la norme NF EN 196-1. La norme ASTM C 666 03 préconise une cure des éprouvettes de 14 jours (sauf indication contraire), puis un conditionnement en humidité par immersion dans de l'eau de chaux saturée à  $23,0 \pm 2,0^{\circ}\text{C}$  pendant 48 h avant l'essai (sauf indication contraire). Les conditions utilisées dans le cadre de ce travail ont été les suivantes : après 24 h de conservation dans une enceinte climatique (HR=95 $\pm$ 2%, T=20 $\pm$ 2 °C), les éprouvettes sont démoulées et leur cure poursuivie dans les mêmes conditions climatiques pendant 23 jours, avant de les immerger dans l'eau pendant 4 jours puis de commencer les cycles de gel-dégel (Shang et al., 2009). La cure dans une enceinte saturée en humidité a été choisie car elle est plus simple à mettre en place et moins agressive pour les matériaux que la cure dans l'eau de chaux (Riding et al., 2013).

La condition selon laquelle chaque éprouvette doit être complètement entourée à tout moment par 1 à 3 mm d'eau a été respectée. Le cycle de cette méthode d'essai doit consister en un gel des échantillons (4 $\pm$ 2°C à -18 $\pm$ 2 °C) puis un dégel (-18 $\pm$ 2 à 4 $\pm$ 2°C) sur une durée de 2 à 5 heures. Sachant qu'au moins 25 % du temps doit être utilisé pour la décongélation, qu'à la fin de la période de gel la température au centre des éprouvettes doit être -18  $\pm$ 2 °C, et qu'à la fin de la période de dégel, la température doit être 4 $\pm$ 2 °C. Les travaux ont été menés pour respecter au mieux ces conditions.

### 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'enceinte gel-dégel à disposition est capable d'appliquer une température donnée pendant un temps donné. Elle compare la température de consigne ( $T_c$ ) à la température de l'air intérieur ( $T_a$ ). L'application et le respect de la norme implique de connaître la température au centre des éprouvettes ( $T_m$ ) et le temps nécessaire pour atteindre les températures du gel et du dégel au cours des cycles. Pour programmer l'enceinte la relation entre ( $T_c$ ) et ( $T_m$ ) doit être trouvée, ainsi que les couples temps-température permettant de respecter les critères de la norme. La démarche a nécessité plusieurs étapes afin de mettre au point la méthodologie des cycles gel-dégel sur les composites cimentaires à base de granulats de PET.

#### 3.1 Première étape : réglage du dispositif sur un mortier de référence

La première étape a consisté à utiliser des éprouvettes de mortier de référence (0% PET) équipées de thermocouples au centre et un lecteur de température manuel précis à  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ . Les éprouvettes ont été placées dans l'eau dans une boîte plastique en PEHD avec plusieurs échantillons afin de remplir cette dernière complètement. Il faut 7h25 pour que la température au centre des éprouvettes ( $T_m$ ) arrive à  $4^\circ\text{C}$ , lorsque  $T_c$  initialement à  $20^\circ\text{C}$  est réglée à  $4^\circ\text{C}$  (Figure 1-A). Puis la température de consigne ( $T_c$ ) est réglée à la valeur la plus basse autorisée pour l'appareil  $-40^\circ\text{C}$  (Notice d'utilisation APT.lineTM.MK BINDER). 7h35 sont alors nécessaires pour que  $T_m$  soit égale à  $-18^\circ\text{C}$  (Figure 1-B).

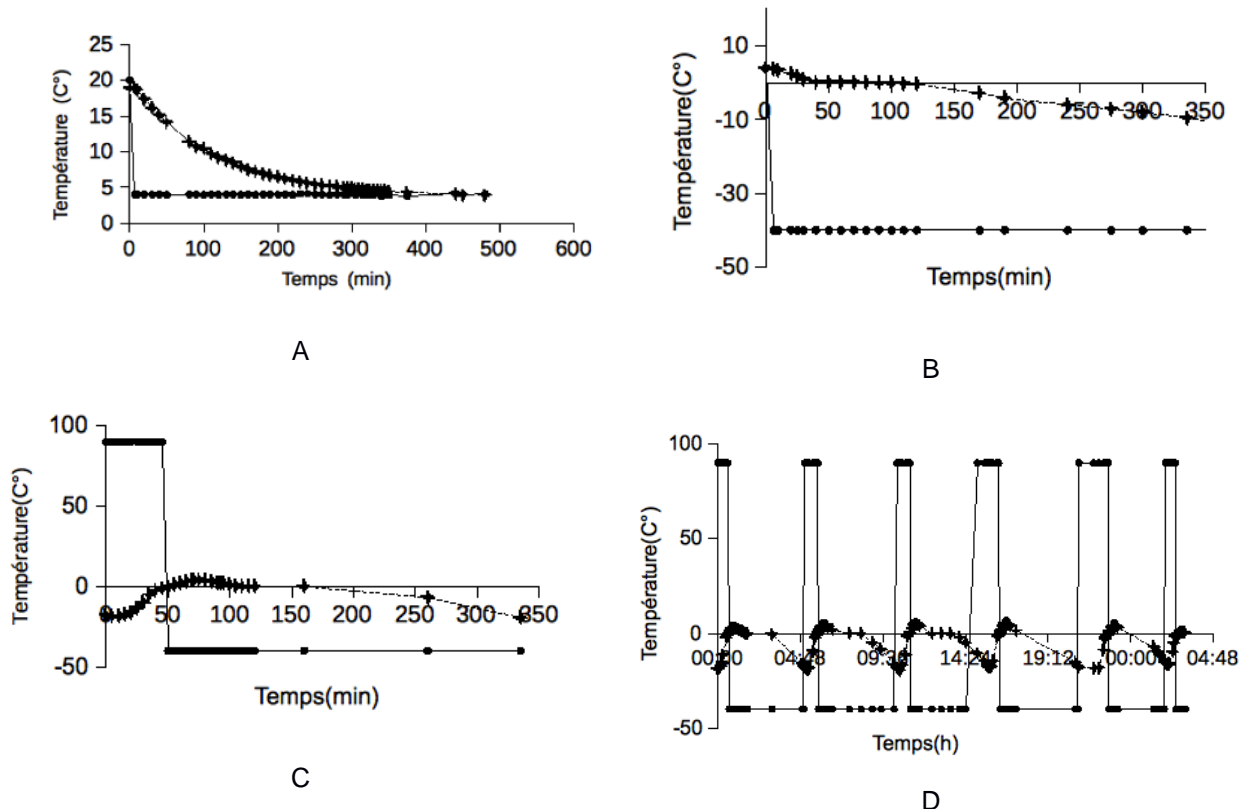


Figure 1. Evolution des températures  $T_m$  et  $T_c$  lors d'un cycle gel-dégel,  $T_c$  réglée respectivement de  $20$  à  $4^\circ\text{C}$  (A), puis à  $-40^\circ\text{C}$  (B), puis à  $90^\circ\text{C}$  (C) et alternativement de  $90$  à  $-40^\circ\text{C}$  (D) (+  $T_m$ , •  $T_c$ ).

La température  $T_c$  est alors augmentée jusqu'à la température maximale de résistance pour le PEHD, matière plastique de la boîte contenant les éprouvettes, soit  $90^\circ\text{C}$  (Dossogne, 1996).  $T_m$  a atteint  $4^\circ\text{C}$  en

1h11 (Figure 1-C). Les passages de 90 à -40°C et de -40 à 90°C ont été répétés plusieurs fois pour trouver la durée totale moyenne du cycle gel-dégel (Figure 1-D) et le rapport durée du gel sur durée totale du cycle. Les résultats obtenus sont respectivement 5h11 et 18,5% (Tableau 4).

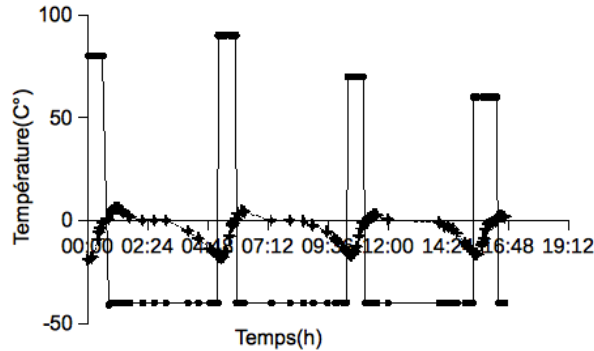


Figure 2. Evolution de  $T_m$  en fonction de différentes températures de consigne du dégel (+  $T_m$ , •  $T_c$ ).

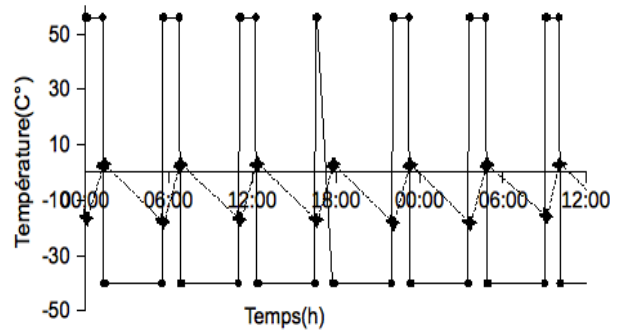


Figure 3. Evolution de  $T_m$  au cours d'une succession de cycles avec  $T_c$  réglée alternativement à 56°C et -40°C (+  $T_m$ , •  $T_c$ ).

Les conditions de la norme n'étant pas respectées, différentes températures de consigne du dégel ont été testées (80, 70, 60, 50, 55 et 56°C) (Figure 2). Le couple  $T_{c_{gel}}/T_{c_{dégel}}$  (56°C/-40°C) est retenu car c'est celui qui permet de s'approcher au mieux des critères de la norme : durée totale de 5h28 pour 5h attendue et 22,5% du temps en gel pour 25% attendu (Tableau 4). La répétition de ces consignes a permis de vérifier que ces valeurs n'évoluaient pas au cours des cycles (Figure 3).

Tableau 4. Durée totale du cycle gel-dégel et durée du gel selon les températures de consigne.

| $T_{c_{gel}}/T_{c_{dégel}}$ (°C) | Durée totale | Rapport durée du gel/durée totale du cycle (%) |
|----------------------------------|--------------|--|
| 90/-40                           | 5h11         | 18,5   |
| 80/-40                           | 5h16         | 20,9   |
| 70/-40                           | 5h20         | 19,3   |
| 60/-40                           | 5h25         | 19,9   |
| 50/-40                           | 5h52         | 20,4   |
| 55/-40                           | 5h29         | 22,3   |
| 56/-40                           | 5h28         | 22,5   |

### 3.2 Deuxième étape : vérification du réglage du dispositif pour des composites contenant 25% de PET

La deuxième étape a consisté à utiliser des éprouvettes de mortier de référence (0% PET) et des éprouvettes de composite contenant 25% de PET, afin de vérifier que le couple  $T_{c_{gel}}/T_{c_{dégel}}$  déterminé lors de la première étape permettait de conserver un rapport durée du gel sur durée totale du cycle et une température  $T_m$  conformes à la norme. Lors du premier cycle, lorsque  $T_c$  passe de 56°C à -40°C, il faut 6h15 pour que  $T_m$  soit égale à -18°C (Figure 4-A). Ensuite lorsque  $T_c$  passe de -40 à 56°C,  $T_m$  a atteint



4°C en 1h30 (Figure 4-A). Ce premier cycle a donc une durée plus importante, ce qui avait déjà été remarqué lors de la première étape avec un mortier de référence.

Les passages de 56 à -40°C et de -40 à 56°C ont été répétés plusieurs fois pour vérifier la durée totale moyenne du cycle gel-dégel (Figure 4-B) et le rapport durée du gel/durée totale du cycle. Le couple  $T_{c_{gel}}/T_{c_{dégel}}$  (56/-40°C) peut être aussi utilisé pour un composite contenant 25% de PET, puisqu'une durée totale de 5h29 est obtenue pour une durée de 5h attendue. De plus le rapport durée du gel/durée totale du cycle est égal à 22,5% ce qui est très proche des 25 % attendus.

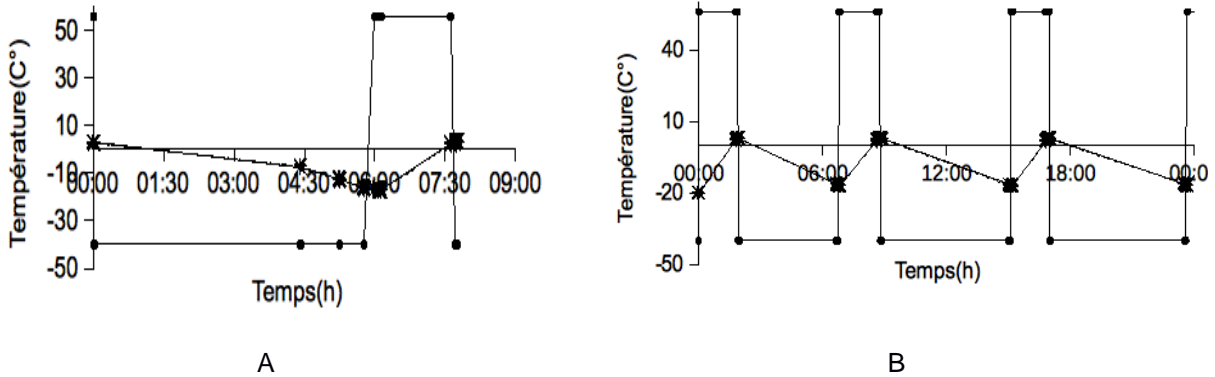


Figure 4. Evolution de Tm avec Tc réglée alternativement à 56°C et -40°C pour des composites contenant respectivement 0 et 25% de PET : au cours du premier cycle (A) et d'une succession de cycles (B) (+ Tm (0%PET), x Tm (25%PET), • Tc).

### 3.3 Troisième étape : vérification du réglage pour des composites contenant différents pourcentages de PET

La troisième étape a consisté à tester le réglage du dispositif à l'ensemble des composites (0, 25, 50 et 75% de PET), l'enceinte étant alors totalement occupée. Six boîtes ont été nécessaires pour contenir tous ces échantillons.

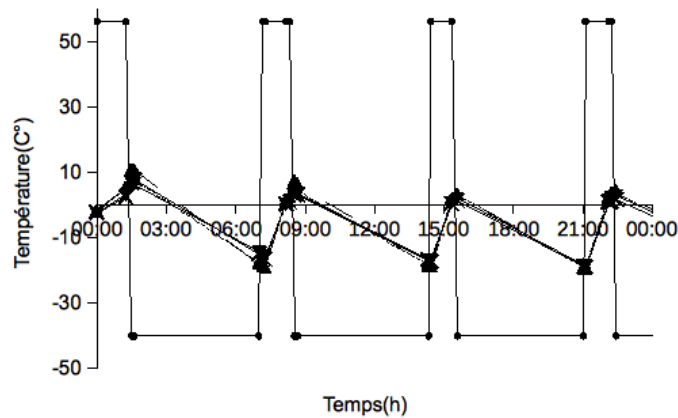


Figure 5. Evolution de Tm en fonction du temps pour les différents composites pour un couple  $T_{c_{gel}}/T_{c_{dégel}}$  (56/-40°C) (+ Tm (0%PET), x Tm (25%PET), ▼ Tm (50%PET), ▲ Tm (75%PET) • Tc).

Les durées totales de cycle pour tous les composites sont très proches, mais la durée totale moyenne d'un cycle est alors égale à 6h55. Elle est donc plus importante. Par contre le rapport durée du gel/durée totale du cycle n'évolue pratiquement pas, il est égal à 22% (Figure 5).

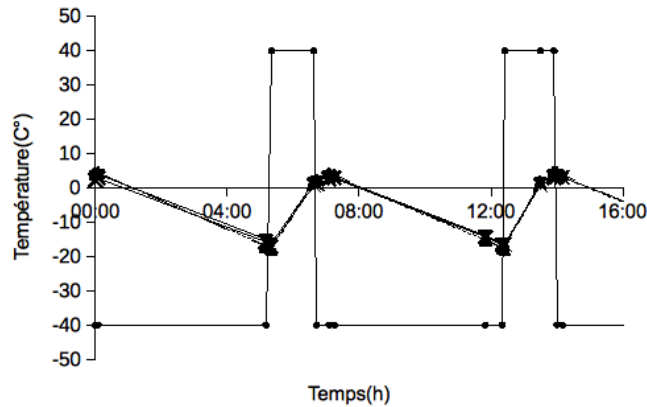


Figure 6. Evolution de  $T_m$  en fonction du temps pour les différents composites pour un couple  $T_{C_{gel}}/T_{C_{dégel}}$  (40/-40°C) (+  $T_m$  (0%PET), x  $T_m$  (25%PET), ▼  $T_m$  (50%PET), ▲  $T_m$  (75%PET) •  $T_c$ ).

Les conditions de la norme n'étant plus respectées, d'autres températures de consigne de dégel ont alors été testées. Le couple  $T_{C_{gel}}/T_{C_{dégel}}$  (40/-40°C) a été retenu car c'est celui qui permet de s'approcher au mieux des critères de la norme : durée totale de 6h45, pour 5h attendue et 24,7% du temps en gel pour 25 % attendu (Figure 6).

### 3.4 Quatrième étape : automatisation de l'enregistrement des températures

Cette étape a consisté, afin de faciliter les mesures, à mettre en place un système de lecture automatisé des températures des différents composites.

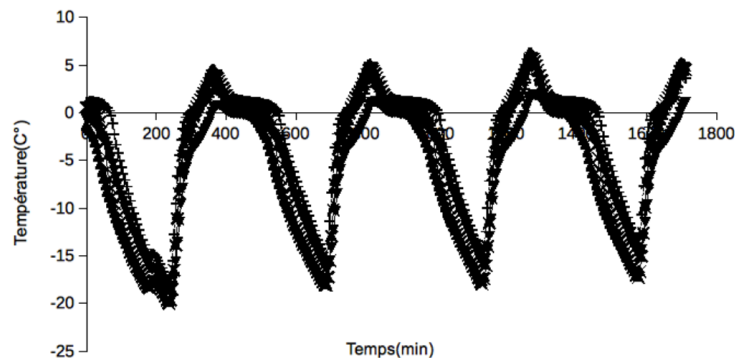


Figure 7. Suivi automatisé de  $T_m$  en fonction du temps pour les différents composites pour un couple  $T_{C_{gel}}/T_{C_{dégel}}$  (40/-40°C).

Les enregistrements obtenus permettent de constater que les conditions de température déterminées précédemment peuvent être conservées (Figure 7). Toutefois un ajustement léger des temps de gel et dégel est nécessaire lorsqu'un décalage apparaît au niveau de  $T_m$ . Ce décalage est sans doute dû à la modification des composites au cours des cycles.

#### 4. CONCLUSION

Dans le cadre de l'étude des mécanismes de vieillissement de composites contenant des charges de PET pour fournir une mesure quantitative de leur durée de service, le présent travail a consisté à élaborer une méthodologie de cycles gel-dégel permettant de suivre de façon automatisée la variation des températures au sein de ces bétons légers et de relier celle-ci à l'évolution des propriétés physico-mécaniques de ces matériaux.

Une étude bibliographique a permis d'identifier les normes existantes pour réaliser des tests de gel-dégel. La procédure A de la norme ASTM C 666 a été retenue. Pour respecter et appliquer cette procédure, la relation entre la température de consigne de l'enceinte et la température au centre des éprouvettes, ainsi que les couples temps-température ont été déterminés. Les températures de consignes retenues sont 40°C pour le gel et -40°C pour le dégel. Ce sont celles qui permettent de s'approcher au mieux des critères de la norme. La durée totale d'un cycle dans ces conditions est de 6h45, pour 5h attendue et le rapport durée du gel/durée totale du cycle vaut 24,7% pour 25 % attendu.

Il a été également observé que la température au centre des éprouvettes ( $T_m$ ) des différents matériaux (0, 25, 50 et 75% de PET) était pratiquement identique.

La durée de la phase de mise en régime (premier cycle gel-dégel) est toujours plus longue que celle des cycles suivants. Étant donné l'évolution des matériaux au cours des cycles de gel-dégel, un ajustement léger des temps de gel et dégel est nécessaire.

#### Remerciements

Les auteurs remercient la société Calcia pour la fourniture du ciment utilisé dans ce travail.

#### Références

- Agavrioloaie L., Oprea S., Barbuta M. et Luca F. (2012), Characterization of polymer concrete with epoxy polyurethane acryl matrix, *Construction and Building Materials* (37) 190–196.
- Albano C., Camacho N., Hernandez M., Matheus A. et Gutierrez A. (2009), Influence of content and particle size of pet waste bottles on concrete behaviour at different w/c ratios, *Waste Management* (29) 2707–16.
- Ali M., Goullieux A., Queneudec M., Dheilly R.M. (2014), Impact du broyage des granulats de PET sur les propriétés à l'état frais d'un composite cimentaire, Conférence Matériaux 2014 - Colloque Ecomatériau, Nov 2014, Montpellier, France. ECOMATERIAU.<hal-01121406>.
- ASTM C 666/C 666M – 03, Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, Designation: (Reapproved 2008).
- Choi Y.W., Moon D.J., Chung J.S. et Cho S.K. (2005), Effects of PET waste bottles aggregate on the properties of concrete, *Cement and Concrete Research* (35) 776–81.
- Choi Y.W., Moon D.J., Kim Y.J., Lachemi M. (2009), Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles, *Construction and Building Materials* (23) 2829–35
- CSN 73 1322, Determination of the concrete freeze-thaw resistance. Czech Standards Institute, 1968.
- Damien A. (2013), Guide du traitement des déchets, Syndicat National des Ingénieurs de l'Industrie et des Mines, Editions OPAS 2013, ISSN 1968-0082.
- Documentation Technique / fiches techniques / CEMENTS, i.tech ULTRACEM 52,5 N – CEM I 52,5 N CE CP, Ciment Calcia. 2014.
- Dossogne D. (1996) "Polyéthylène haute densité PEHD". Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites. A 3 315, 1-10.
- Frigione M. (2010), Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete, *Waste Management* (30) 1101–6.
- GBJ82-85, National Standard of the People's Republic of China. The Test Method of Long-Term and Durability on Ordinary Concrete, 1997 (in Chinese).
- Haidar M. (2011), *Optimisation et durabilité des micro-bétons à base d'époxyde*, Thèse, Université de Cergy-Pontoise, Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie.
- Ismail Z. et AL-Hashmi E. (2008), Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement, *Waste Management* (28) 2041–2047.

- Jo B., Park S., Park J. (2007), Properties of concrete made with alkali-activated fly ash lightweight aggregate (AFLA), *Cement and Concrete Composites* (29) 128–135.
- Karakoç M., Demirboga R., Türkmen I et Can I. (2011), Modeling with ANN and effect of pumice aggregate and air entrainment on the freeze–thaw durabilities of HSC, *Construction and Building Materials* (25) 4241–4249
- Kockal N. et Ozturan T. (2010), Effects of lightweight fly ash aggregate properties on the behavior of lightweight concretes, *Journal of Hazardous Materials* (179) 54–965.
- Kockal N. et Ozturan T. (2011), Durability of lightweight concretes with lightweight fly ash aggregates, *Construction and Building Materials* (25) 1430–1438.
- Kucharczyková B., Keršner Z., Pospíchal O., Misák P. et Vymazal T. (2010), Influence of freeze–thaw cycles on fracture parameters values of lightweight concrete, *Procedia Engineering* (2) 959–966.
- Kucharczyková B., Keršner Z., Pospíchal O., Misák P. Daneřk P. et Schmid P. (2012), The porous aggregate pre-soaking in relation to the freeze–thaw resistance of lightweight aggregate concrete, *Construction and Building Materials* 30 761–766.
- Malhotra M. et Painter K. E.(1989), Early-age strength properties, and freezing and thawing resistance of concrete incorporating high volumes of ASTM class F fly ash, *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, (17) 37-46.
- Méthodes d'essais des ciments (1995), NF EN 196-1, ISSN 0335\_3931, AFNOR.
- Mohamed M.A S. (2011), Influence de la valorisation des microfibres végétales sur la formulation et la résistance aux cycles de gel dégel de BAP, Thèse, Université de Cergy-Pontoise.
- NF EN 12620, AFNOR, Granulats pour béton-A1 Juin 2008.
- NF EN 196-1, Méthodes d'essais des ciments-Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques, Indice de classement : P15-471, AFNOR, Août 1995.
- NF P18-424, AFNOR, Bétons - Essai de gel sur béton durci. Gel dans l'eau - Dégel dans l'eau. P18-424 Mai 2008.
- NF P18-425, AFNOR, Bétons - Essai de gel sur béton durci. Gel dans l'air - Dégel dans l'eau. P18-425 Mai 2008.
- Notice d'utilisation APT.lineTM La série MK BINDER, Art.Nr. 7001-0028, VERSION 03/2008.
- Polat R., Demirboğa R. , Karakoç M. et Türkmen İ. (2010), The influence of lightweight aggregate on the physico-mechanical properties of concrete exposed to freeze–thaw cycles, *Cold Regions Science and Technology* (60) 51–56.
- Riding K., Blackwell B., Momeni A. et McLeod H. (2013), Effects of Curing Methods and Supplementary Cementitious Material Use on Freeze Thaw Durability of Concrete Containing D-Cracking Aggregates, Report No. K-TRAN: KSU-11-2 ▪ *FINAL REPORT*▪.
- Saikia N. et de Brito J. (2012), Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review, *Construction and Building Materials* (34) 385–401.
- Saito M., M. Ohta, Ishimori H. (1994), Chloride Permeability of Concrete Subjected to Freeze-Thaw Damage, *Cement & Concrete Composites* (16) 233–239.
- Shang H.S. et Song Y.P. (2006), Experimental study of strength and deformation of plain concrete under biaxial compression after freezing and thawing cycles, *Cement and Concrete Research* (36) 1857–1864.
- Shang H.S., Song Y.P. et Qin L. (2008), Experimental study on strength and deformation of plain concrete under triaxial compression after freeze-thaw cycles, *Building and Environment* (43) 1197–1204.
- Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, Designation: C 666/C 666M – 03 (Reapproved 2008).
- Shang H.S. , Song Y.P. et Ou J. (2009), Behavior of air entrained concrete after freeze thaw cycles, *Acta Mechanica Sinica Sinica* (22), 261-266.
- Tikalsky P., Pospisil J. et Macdonald W. (2004), A method for assessment of the freeze–thaw resistance of preformed foam cellular concrete, *Cement and Concrete Research* 34/889–893.
- Wilson H. S. et Malhotra V. M. (1988), Development of high strength lightweight concrete for structural applications, *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, V10, N2.
- Yazoghli O. (2005), Contribution à la valorisation des emballages alimentaires de post-consommation en polyéthylène terephthalate et en polyéthylène haute densité dans des matrices cimentaires. Etude de faisabilité et évaluation des performances physico-mécaniques, hydriques et thermiques, Thèse de doctorat, Université de Picardie Jules Verne.