



Projet National de recherche et développement

PROPRIETES PHYSIQUES DES BETONS RECYCLES EN FONCTION DE LA TEMPERATURE

Thème 2 Axe A

Rédigé par
Anne-Lise Beaucour, Prosper Pliya, Albert Noumowé
L2MGC – Université de Cergy Pontoise

R/17/RECY/041
LC/14/RECY/63
Juin 2017

I. Problématique – objectifs de l'étude.....	3
II. Démarche expérimentale.....	3
1. Mesure des propriétés thermiques par dispositif hotdisk	4
2. Mesure de la réponse thermique des éprouvettes.....	6
III. Résultats.....	7
1. Influence des granulats recyclés sur les propriétés thermo physiques	7
2. Influence des granulats recyclés sur la réponse thermique d'une éprouvette	12
III. Conclusion	14

I. Problématique – objectifs de l'étude

Afin d'évaluer la résistance au feu des structures en béton, il convient de connaître les transferts de chaleur et la distribution de température dans les éléments en béton. Ces transferts dépendent notamment des propriétés thermophysiques du béton comme la conductivité thermique ou la chaleur spécifique. Des études précédentes ont montré l'influence de la nature minéralogique des granulats et de la porosité du béton sur les valeurs de ces propriétés thermiques à température ambiante [1-3]. Celles-ci apparaissent fortement liées à la minéralogie et à la porosité des granulats, ceux-ci composant en effet 60 à 80% du volume du béton. Par exemple, des travaux ont mis en évidence la plus forte conductivité de bétons de quartzite par rapport aux bétons composés d'autres natures de granulats [2]. Le quartzite est en effet composé de quartz macro-cristallin bien cristallisé dont la structure périodique ordonnée favorise la propagation des ondes et présente donc une conductivité beaucoup plus élevée que la silice micro-cristalline pouvant être rencontrée notamment dans les silex. Avec l'augmentation de température, les modifications physico-chimiques des constituants du béton telles que la décomposition des CSH, de la portlandite pour la pâte de ciment ou bien la décomposition de minéraux hydratés et les changements de phase du quartz pour les granulats affectent les propriétés thermophysiques du béton à travers la diminution des liaisons conductrices et le départ d'eau [4-7]. Ces transformations chimiques ou changements de phase s'accompagnent d'une consommation de chaleur plus ou moins importante. Les granulats recyclés ont la particularité d'être constitués en partie par une ancienne pâte de ciment source de composés hydratés et de porosité supplémentaire par rapport aux granulats naturels. Ainsi leur addition dans le béton peut avoir un impact sur l'évolution des propriétés thermiques avec la température et sur les flux de chaleur mis en jeu [8]. Jusqu'à présent, l'eurocode 2 partie 1-2 relatif au dimensionnement des structures en béton au feu définit l'évolution de la conductivité thermique pour des bétons de granulats naturels. Il est ainsi nécessaire de connaître l'évolution des propriétés thermophysiques des bétons de granulats recyclés afin de pouvoir utiliser les codes réglementaires existants ou de suggérer une adaptation. Cette étude s'inscrit dans ce contexte et concerne d'une part les mesures de conductivité thermique, de chaleur spécifique et de diffusivité thermique de trois bétons avec des substitutions variables en gravillons ou sable recyclés. D'autre part, la réponse thermique d'éprouvettes issues de ces mêmes bétons, est étudiée afin de prendre en compte les flux de chaleur inhérents aux changements de phase que les précédentes mesures en condition isotherme ne permettent pas de quantifier.

II. Démarche expérimentale

Les formulations de béton C25/30 OR-OR, C25/30 3OR-3OR et C25/30 OR-100R, correspondant respectivement à 100% de gravillons et sable naturels, 30% de gravillons et 30% de sable recyclés et 100% de sable naturel et 100% de gravillons recyclés, sont confectionnés. Les formulations et matériaux du PN Recybeton sont utilisés conformément au rapport de T. Sedran [9].

Le ciment utilisé est de type CEM II/A-L 42.5 de Rochefort fourni par HOLCIM. Les fillers Calcaires betocarb HP-OG sont utilisés pour améliorer le squelette granulaire. Le superplastifiant MC Power

Flow 3140 et dans le cas du C25/30 30R-30R le retardateur Centrament retards sont ajoutés au mélange. Les granulats naturels sont le sable semi-concassé lavé 0/4 de Sandrancourt et les gravillons calcaires concassés 4/10 et 6.3/20 de Givet. Le sable et les gravillons recyclés utilisés proviennent de la plateforme DLB de Gonesse fournis en tant que classes granulaires 0/4, 4/10 et 10/20. Les granulats recyclés sont présaturés à 1% au-dessus de leur coefficient d'absorption dans des tonneaux 48 heures avant le gâchage. Des éprouvettes cylindriques 110x220 et 150x300 mm sont confectionnées. Trois cylindres 150x300 mm pour chaque type de béton sont équipées à leur centre d'un thermocouple qui mesurera la température au cours du chauffage pour la caractérisation de la réponse thermique de l'éprouvette. Les éprouvettes sont conservées avec des chiffons mouillés dans des sacs étanches pendant 90 jours conformément aux recommandations Rilem [12]. Des tranches de 40 mm d'épaisseur sont ensuite sciées à partir des éprouvettes 110x220 mm à destination des mesures des propriétés thermiques. Trois paires d'échantillons sont testées pour chaque béton.

1. Mesures des propriétés thermiques par dispositif Hot-Disk.

Les propriétés thermiques comprennent la conductivité thermique, la diffusivité thermique et la capacité thermique. Celles-ci sont mesurées lors du chauffage jusqu'à 600°C puis lors du refroidissement. Les principes de la caractérisation reposent sur la théorie développée par Gustaffson [10,11] pour la méthode TPS (Transient Plane Source). Le matériel utilisé est le Hot Disk TPS 1500, piloté par un ordinateur qui comprend un logiciel de traitement de données Hot Disk Thermal Constants Analyser. Les mesures sont réalisées dans un petit four de 5 litres lui-même piloté par le même logiciel (cf figure 1).

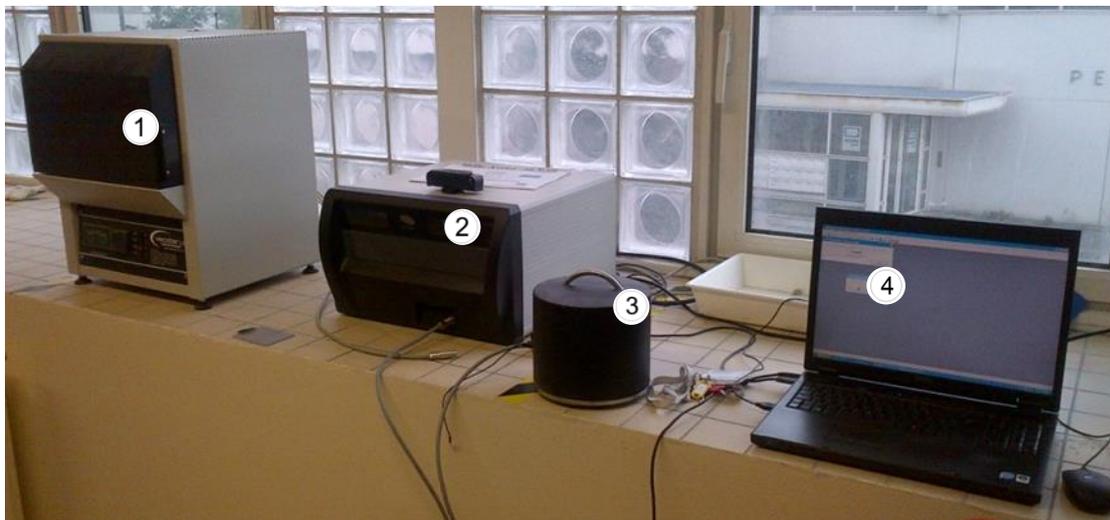


Figure 1. Appareillage du Hot-Disk@ TPS 1500, Le four (1), le hot-disk (2), le porte-échantillon (3) pour les mesures à la température ambiante et le PC d'acquisition [3] .

Les mesures à température ambiante et à haute température sont effectuées avec des sondes en mica de rayon 14,610 mm qui permettent de faire des mesures jusqu'à 750°C. Cependant après refroidissement et une fois hors de la pression exercée par les deux tranches de béton la capsule de

mica entourant la résistance se délamine au contact de l'air et la sonde n'est plus réutilisable pour un autre essai.

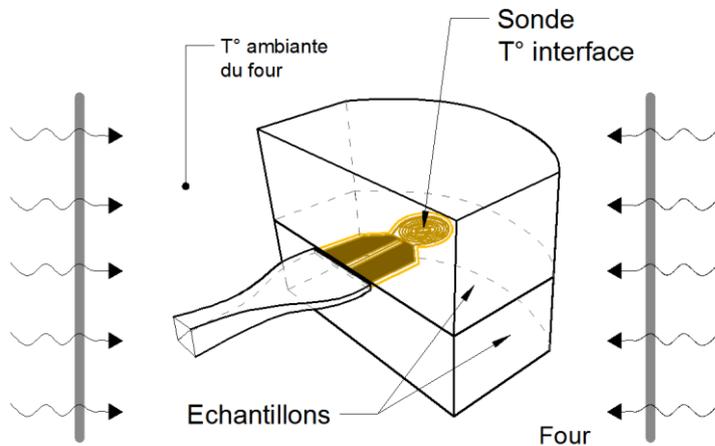


Figure 2. Sonde mise en sandwich entre deux tranches d'éprouvettes

Les échantillons sont préalablement séchés à l'étuve à 80°C jusqu'à masse constante. La sonde est mise en sandwich entre deux tranches d'éprouvette 110x220 mm de 40 mm d'épaisseur. Pour le pilotage de l'essai deux mesures sont prises en compte : celle faite par le régulateur du four et celle réalisée par la sonde. Le protocole de mesure est défini comme suit (cf figure 3).

- Une montée en température du four à 1°C/min jusqu'à la température cible : les paliers choisis sont 30°C, 150°C, 200°C, 250°C, 300°C, 450°C, 500°C, 550°C et 600°C. Les mesures sur les paliers 350°C et 400°C n'ont pu être exploitées car le nickel présente un changement de phase solide-solide exothermique autour du point de curie (358°C). Ainsi dans cette plage de température (330-420°C) la calibration de la sonde en fonction de la température n'est pas possible. Pour le refroidissement, une diminution de 1°C/min est aussi imposée avec des paliers à 500°C, 300°C, 200°C et 30°C.
- Phase A : Une fois la température atteinte, un temps de stabilisation de 30 min est nécessaire pendant lequel la température dans le four ne doit pas varier de $\pm 1,0$ °C ;
- Phase B : une limite de variation de $\pm 0,05$ °C de la différence de température de la sonde et de la température ambiante du four doit être atteinte. Ce critère doit être maintenu pendant un temps de stabilisation fixé à 30 min.
- Phase C : Une limite temporelle de 240 min est décomptée après le temps de stabilisation de la température du four (Phase A). La mesure est prise :
 - lorsque les deux (2) critères de stabilisation en température (four et sonde) sont atteints, c'est-à-dire juste après les 30 min de temps de stabilisation de la phase B ;
 - ou lorsque le décompte du temps de stabilisation de 240 min est atteint et ce, même si les critères en températures ne sont pas satisfaits (mesure de sécurité pour éviter l'interruption du programme).

- Trois mesures sont effectuées pour chaque palier de température. Elles sont espacées de 30 min pour que les conditions locales isothermes de température se rétablissent.
- La sonde émet une impulsion électrique qui augmente localement la température de l'échantillon. Suivant l'évolution de cette variation thermique, le capteur peut calculer indépendamment la conductivité thermique, la capacité thermique volumique du béton et en déduire la diffusivité lorsque tous les critères sont remplis : une élévation de la température suffisante pendant un temps suffisant. Il est souvent ardu de remplir ces critères car ils dépendent fortement du laps de temps pendant lequel la puissance est appliquée. A titre indicatif, une impulsion électrique de 800 mW est appliquée pendant 160 s jusqu'à 450°C et pendant 320 s au-delà. Les changements de propriété du matériau au cours du chauffage nécessitent d'adapter les paramètres de mesure afin de rester dans les hypothèses de calcul de la méthode TPS.

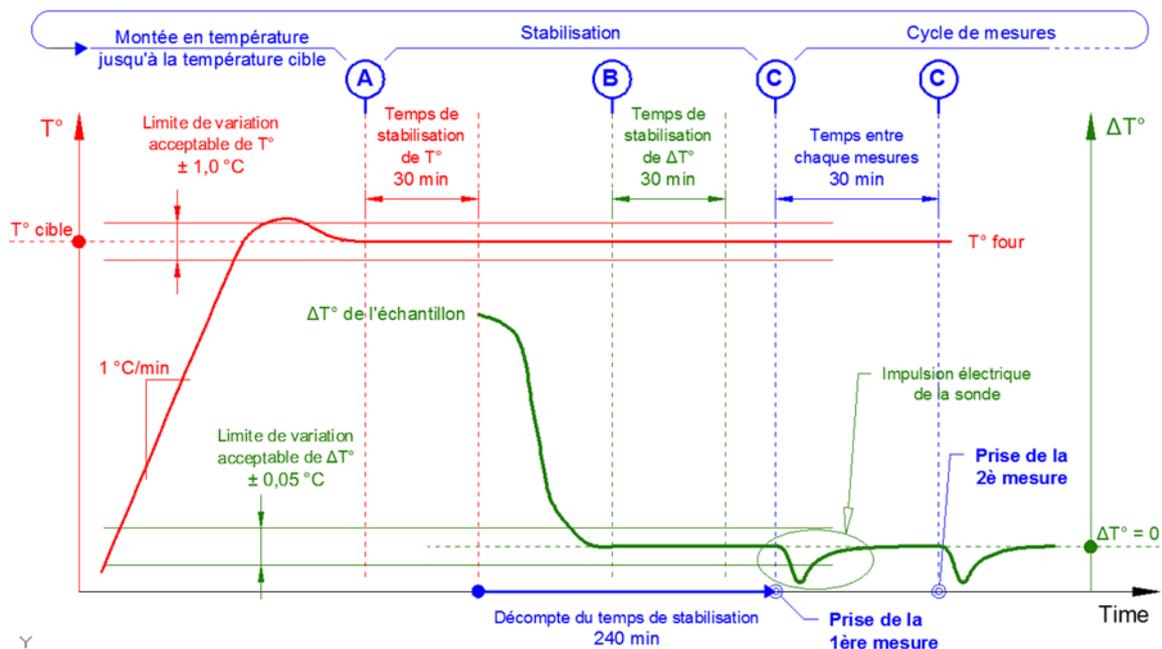


Figure 3. Paramètres et critères de pilotage des mesures sur le hot disk [3].

2. Mesures de la réponse thermique des éprouvettes

La réponse thermique des éprouvettes est évaluée par la différence de température entre la surface et l'intérieur des éprouvettes. Deux thermocouples sont placés respectivement au cœur et au quart diamètre d'une éprouvette 150x300 mm au moment du coulage et un autre thermocouple est fixé en surface de l'éprouvette. Trois éprouvettes par formulation de béton sont instrumentées.

Les éprouvettes subissent un cycle de chauffage-refroidissement à 0.5°C/min jusqu'à 600°C dans un four électrique de dimensions internes (Lxlxh) de 1200x1120x1000 mm (figure 4). Les deux parois latérales sont équipées de résistances électriques chauffantes. Le fond du four est équipé d'un dispositif de ventilation permettant d'assurer une bonne homogénéisation de la température. Ce four est équipé d'un régulateur programmeur thermique Eurotherm 2404 et d'un régulateur de contrôle West 6700. Le pilotage du four nécessite systématiquement deux types de thermocouples :

- Un thermocouple de régulation : placé en contact avec la surface d'un échantillon aux environs du centre du four ;
- Deux thermocouples de sécurité : qui servent de disjoncteur pour le chauffage en cas de différence trop importante entre les deux températures mesurées.

Une centrale d'acquisition permet de mesurer en continu les températures au moyen des différents thermocouples dans l'air, en surface et au cœur des éprouvettes.



Figure 4. Le four et le régulateur

III. Résultats

1. Influence des granulats recyclés sur les propriétés thermophysiques

Les caractéristiques des trois bétons à 28 jours à la température ambiante sont résumées dans le tableau 1. Les résistances à la compression des trois bétons sont voisines. Les deux bétons recyclés montrent logiquement une plus faible masse volumique et une porosité plus élevée que le béton de granulats naturels.

	C25/30 OR-OR	C25/30 30R-30R	C25/30 OR-100R
fc28j (MPa) N.F. E.N. 12390-3	29 ±2	28,5 ± 0.6	25 ± 0.6
Masse vol. sèche (kg/m³) N.F. P18-459	2285 ±5	2150 ± 6,6	2045 ± 13,1
Porosité sous vide (%) N.F. P18-459	14,8 ± 0,3	19 ± 0,1	21 ± 0,4

Tableau 1. Récapitulatif des caractéristiques des trois bétons étudiés

Les mesures des caractéristiques thermiques (conductivité, diffusivité, chaleur spécifique) à la température ambiante des trois bétons étudiés sont présentées dans le tableau 2.

Bétons	Conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	Diffusivité thermique ($mm^2.s^{-1}$)	Chaleur spécifique ($kJ.kg^{-1}.K^{-1}$)
C25/30 OR-OR	2.10 ± 0.02	1.05 ± 0.1	0.70 ± 0.02
C25/30 30R-30R	1.73 ± 0.04	1.09 ± 0.1	0.74 ± 0.04
C25/30 OR-100R	1.61 ± 0.17	1.12 ± 0.1	0.68 ± 0.05

Tableau 2. Propriétés thermiques des trois bétons à la température ambiante

On constate que les bétons de granulats recyclés présentent une conductivité plus faible que le béton de granulats naturels OR-OR ; $1.73 W.m^{-1}.K^{-1}$ et $1.61 W.m^{-1}.K^{-1}$ respectivement pour les bétons 30R-30R et OR-100R contre $2.1 W.m^{-1}.K^{-1}$ pour les bétons OR-OR. La conductivité thermique est liée au volume et à la distribution des vides ainsi qu'à la minéralogie des constituants. Par ailleurs les granulats calcaires du béton OR-OR et les granulats d'origine de granulats recyclés majoritairement composés de silex possèdent une conductivité thermique voisine. Ainsi la substitution des granulats naturels calcaires par des granulats recyclés implique essentiellement une augmentation de la porosité et de la fraction volumique de pâte de ciment par rapport à celle des granulats. La faible conductivité de l'air, $0.026 W.m^{-1}.K^{-1}$, la plus faible conductivité du ciment par rapport à celle des granulats expliquent logiquement les plus faibles conductivités des bétons de granulats recyclés.

Les chaleurs spécifiques sont obtenues à partir de la capacité volumique et des masses volumiques sèches présentées par le tableau 1. Les différences entre les trois bétons n'excèdent guère les écarts types. Les granulats recyclés ont ainsi peu d'influence sur la valeur de la chaleur spécifique.

La diffusivité (a) se calcule à partir de la conductivité thermique (λ), de la chaleur spécifique (C_p) et de la masse volumique (ρ) selon la relation $a=\lambda/(C_p\rho)$. La diminution de la conductivité s'accompagnant, pour les bétons de granulats recyclés, d'une diminution de la capacité thermique volumique liée à leur plus faible masse volumique, ceci explique le peu de variation de diffusivité entre les bétons recyclés et naturels.

Ces propriétés thermiques évoluent avec la température. Les figures 5, 6 et 7 montrent les évolutions respectives de la conductivité thermique, de la chaleur spécifique et de la diffusivité lors du chauffage puis du refroidissement. Les valeurs de conductivité thermique diminuent avec la température. Cette diminution est liée en partie à l'augmentation de l'énergie de vibration du réseau cristallin (phonons) qui, augmentant le nombre de collisions entre phonons, accroît la résistance à l'écoulement de la chaleur. Par ailleurs les transformations physico-chimiques, la microfissuration engendrée par les contraintes d'origine thermique diminuent les liaisons conductrices et génèrent un volume de vides supplémentaire.

Elles évoluent quasi-linéairement de la température ambiante à 600°C. On note que la conductivité thermique des bétons OR_OR diminue plus rapidement que celles des bétons comprenant des granulats recyclés. Ainsi, l'écart entre les deux types de béton se réduit avec la température. Il est en effet habituel d'observer que les bétons les plus conducteurs montrent une perte de conductivité plus rapide avec l'élévation de température [2], [3] et [13]. La perte moyenne de conductivité thermique pour une augmentation de 100°C est de 0.17 W.m⁻¹.K⁻¹ pour le béton C25/30 OR-OR et respectivement de 0.13 et 0.12 W.m⁻¹.K⁻¹ pour les bétons C25/30 OR-100R et C25/30 30R-30R. La conductivité à 600°C du béton de granulats naturels représente 50% de sa valeur initiale contre 55% pour les deux bétons de granulats recyclés. Ces valeurs sont proches et se situent dans la fourchette des valeurs que l'on rencontre pour l'ensemble des bétons.

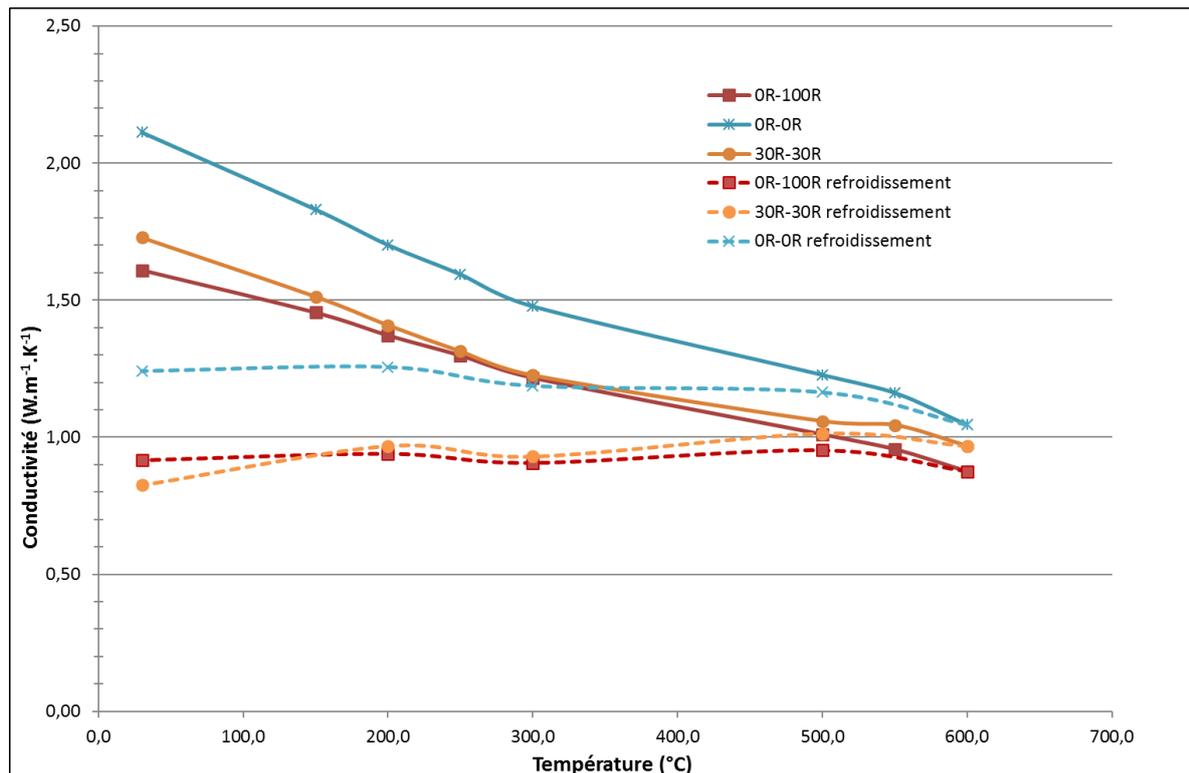


Figure 5. Evolution de la conductivité thermique avec la température lors du chauffage et du refroidissement.

Les mesures réalisées pendant le refroidissement montrent une hystérésis qui témoigne de l'irréversibilité des réactions qui conduisent à la dégradation du matériau, comme le départ de l'eau physiquement et chimiquement liée et l'apparition de microfissures. Très peu d'études concernent les mesures de conductivité au refroidissement mais des résultats similaires ont été mentionnés par [13], [6] et [7]. Une modélisation thermique du béton ne doit ainsi pas prendre en compte une valeur unique de conductivité par niveau de température, mais doit tenir compte de l'historique du chargement thermique.

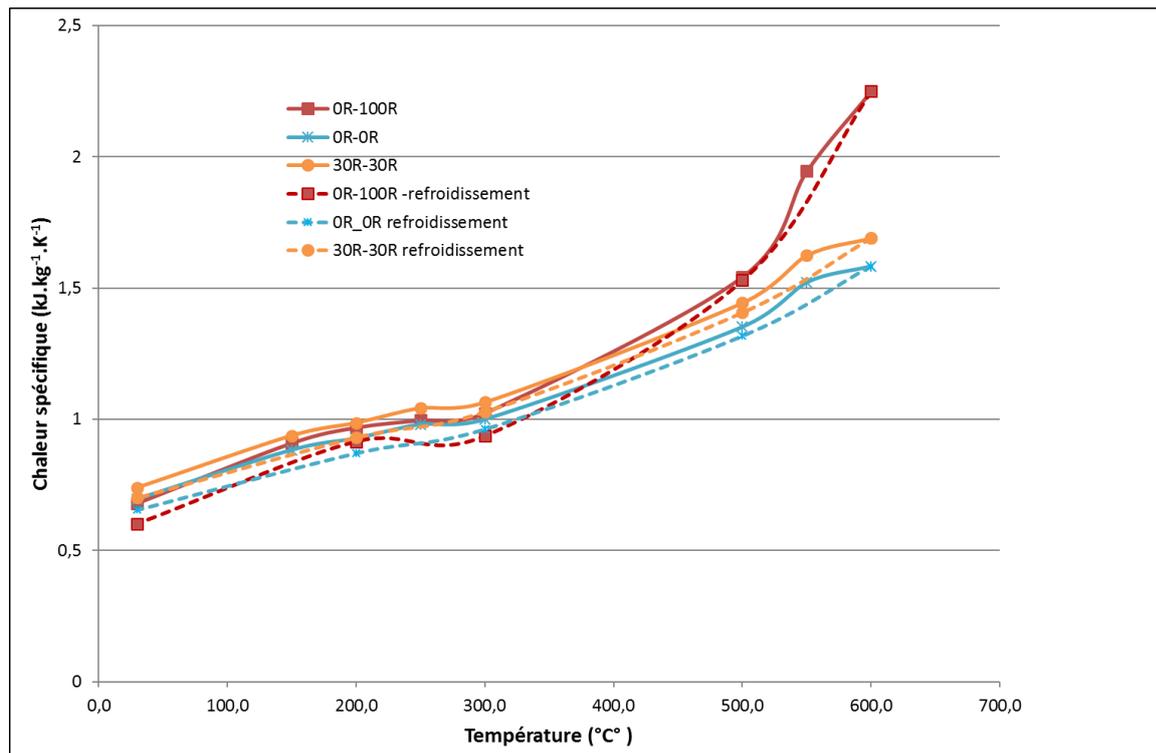


Figure 6 Evolution de la chaleur spécifique avec la température lors du chauffage et du refroidissement.

La figure 6 présente l'évolution de la chaleur spécifique lors du chauffage refroidissement jusqu'à 600°C. Les masses volumiques considérées pour le calcul de la chaleur spécifique à partir de la capacité thermique volumique sont celles mesurées après refroidissement sur des éprouvettes cylindriques 150x300 mm découpées en tranche et chauffées à 0.5°C/min. Les valeurs de capacité thermique sont mesurées en condition isotherme et ne prennent pas en compte la chaleur consommée pendant les réactions chimiques et les changements de phase.

Les résultats montrent une augmentation de la chaleur spécifique avec la température. Cette augmentation est surtout observée entre 30°C et 150°C et entre 500°C et 600°C. Ces mêmes caractéristiques ont pu être aussi observées sur d'autres classes de béton avec ou sans fibres [13-14]. L'évolution des trois bétons est semblable jusqu'à 500°C. Au-delà, la chaleur spécifique du béton OR-100R montre une plus forte augmentation. Le phénomène d'hystérésis est beaucoup moins marqué que pour la conductivité. L'augmentation de capacité thermique avec la température serait essentiellement liée à des phénomènes réversibles. La chaleur spécifique dépend fortement de la vibration atomique, principal mode d'absorption de l'énergie thermique dans les solides. Or l'amplitude des vibrations augmente avec la température entraînant ainsi de plus fortes valeurs de chaleur spécifique. Il est important alors de noter qu'il existe une différence importante entre la valeur à chaud à 600°C et la valeur résiduelle après refroidissement pour la chaleur spécifique (figure 6). Ceci rejoint d'autres résultats publiés qui montraient que la chaleur spécifique résiduelle était beaucoup plus faible que la chaleur spécifique à chaud à 600°C et que la diffusivité résiduelle se trouvait logiquement plus élevée que celle mesurée à chaud [15].

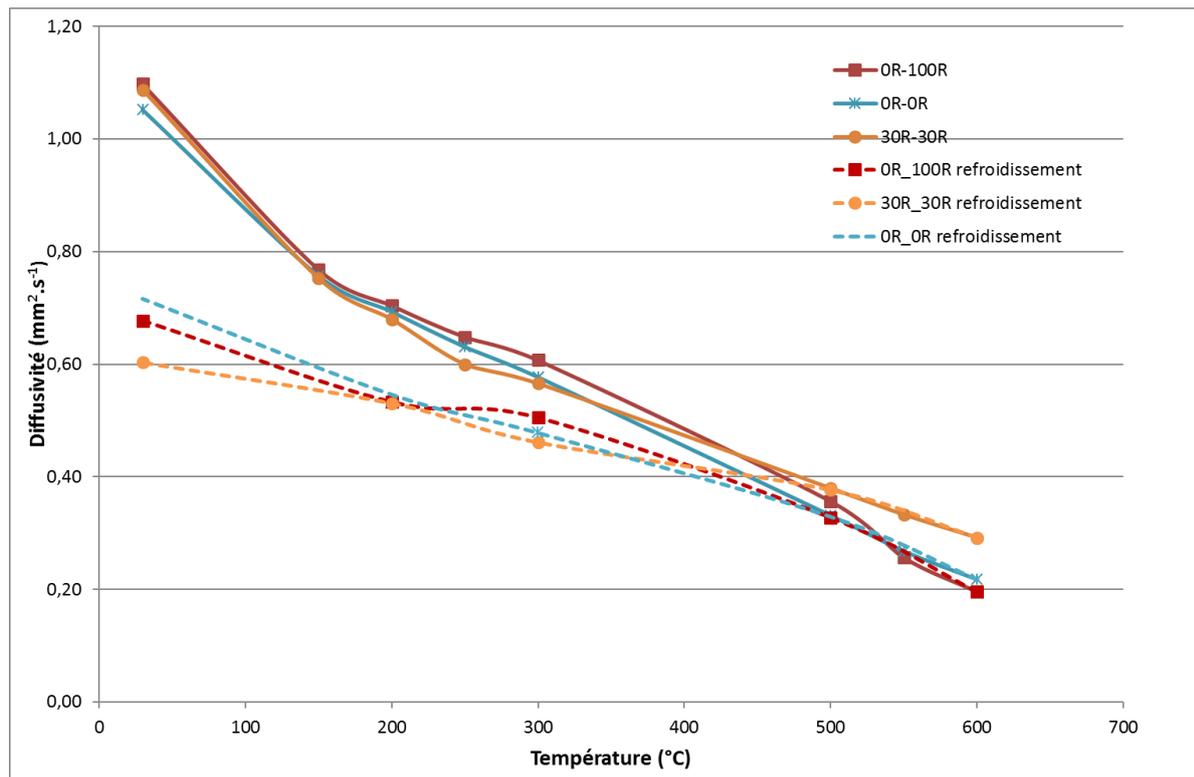


Figure 7. Evolution de la diffusivité avec la température lors du chauffage et du refroidissement

La figure 7 présente l'évolution de la diffusivité thermique lors du chauffage et du refroidissement jusqu'à 600°C. La diffusivité thermique diminue progressivement avec la température. Les résultats précédents ont montré que la diminution de la conductivité s'accompagnait d'une augmentation de la capacité thermique volumique (produit de la masse volumique et de la chaleur spécifique). Ceci explique logiquement la diminution de la diffusivité avec la température. La perte relative de diffusivité avec l'élévation de température est plus importante que pour la conductivité. Ainsi les valeurs à 600°C ne représentent plus que 20% environ des valeurs à la température ambiante. Les résultats des trois bétons sont quasi-similaires.

2. Influence des granulats recyclés sur la réponse thermique d'une éprouvette

La réponse thermique des éprouvettes est évaluée en mesurant la différence de température entre le cœur ($\Delta T_{1/2}$) ou le quart diamètre ($\Delta T_{1/4}$) et la surface d'une éprouvette cylindrique 150x300 mm au cours d'un cycle chauffage et refroidissement jusqu'à 600°C. Les figures 8 et 9 représentent respectivement les différences de température au quart et à mi diamètre avec la surface de l'éprouvette lors du cycle chauffage refroidissement pour les trois bétons. Les mesures ont été effectuées sur trois échantillons pour vérifier la répétabilité mais seule une courbe par formulation est représentée sur les figures 8 et 9. Le tableau 3 présente une moyenne, réalisée sur les trois essais, de l'écart maximal de température et de la température de surface correspondante.

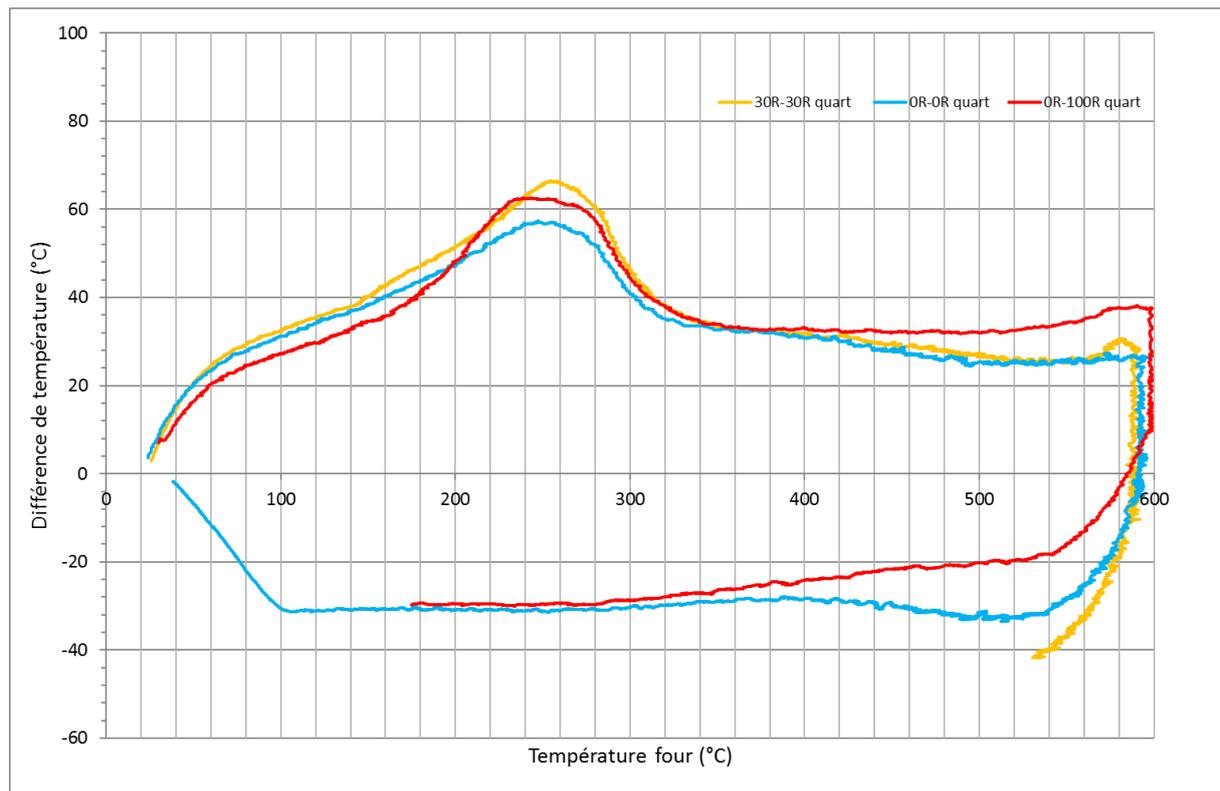


Figure 8. Différence de température entre la surface de l'éprouvette cylindrique 150x300 mm et le quart diamètre au cours du chauffage refroidissement

Pour les deux profondeurs de mesure, l'allure des thermogrammes des 3 bétons est similaire. L'écart de température est maximal pour une température de surface comprise entre 240 et 255°C au quart diamètre de l'éprouvette et entre 260 et 280°C au centre de l'éprouvette. On peut noter une amplitude de pic légèrement moins élevée pour le béton C25/30 OR-OR comparée aux deux bétons de granulats recyclés. Ce pic témoigne de la consommation de chaleur latente liée essentiellement à l'évaporation de l'eau mais aussi à la décomposition des hydrates. La teneur en eau plus élevée liée à la plus forte absorption des granulats recyclés et dans une moindre mesure à la fraction de pâte de ciment supplémentaire expliquent logiquement cette différence de température un peu plus importante. Toutefois en regard des résultats de la littérature les pics de température mesurés au cœur (figure 10) restent plutôt modestes par rapport aux pics de température enregistrés sur des bétons de résistance plus élevée et contenant une fraction volumique de pâte plus importante. Les deux bétons recyclés 30R-30R et OR-100R présentent des volumes de granulats recyclés et de pâte de ciment quasi-identique. Le pic plus important relevé pour le béton 30R-30R peut être lié au plus fort coefficient d'absorption du sable recyclé par rapport à celui des gravillons recyclés et par conséquent à la plus forte teneur en eau libre, les granulats étant utilisés à l'état saturé.

On peut remarquer vers 600°C une nouvelle augmentation de l'écart de température pour les deux bétons de granulats recyclés, que l'on peut associer à la déshydroxylation fortement endothermique de la portlandite. La pâte de ciment supplémentaire apportée par les granulats recyclés peut expliquer que l'on perçoive plus nettement cette nouvelle augmentation pour les bétons C25/30 OR-100R et 30R-30R.

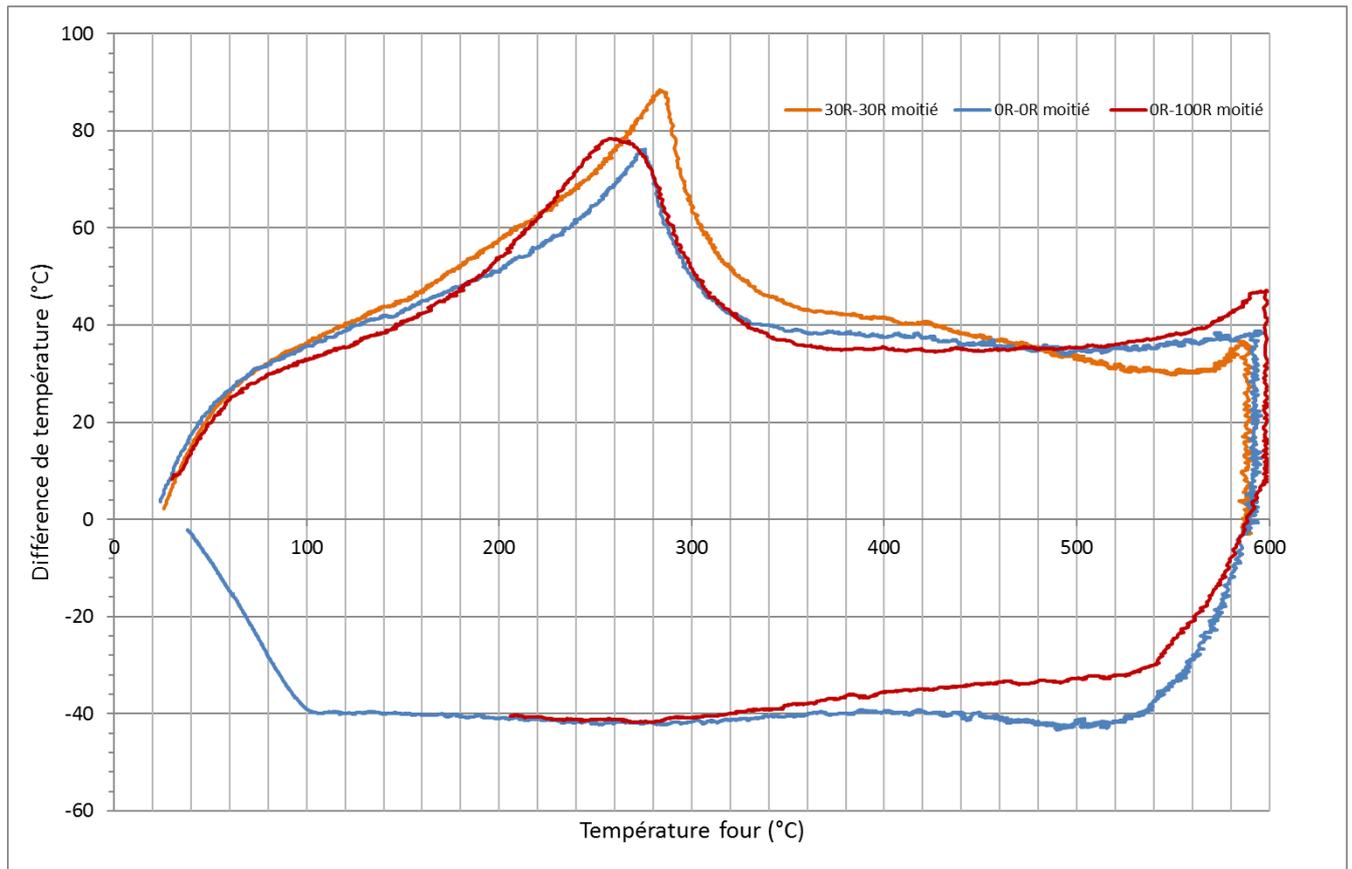


Figure 9. Différences de température entre la surface de l'éprouvette cylindrique 150x300 mm et le cœur de l'éprouvette au cours du chauffage refroidissement pour les trois bétons.

Granulométrie	$\Delta T_{1/2}$ max (°C)	$\Delta T_{1/4}$ max (°C)	Tsurf1/2 (°C)	Tsurf1/4 (°C)
C25/30 OR-OR	77 ± 1	60 ± 3	275 ± 5	250 ± 5
C 25/30 OR-100R	80 ± 5	63 ± 2	260 ± 5	240 ± 5
C25/30 30R-30R*	88	67	280	255

Tableau 3. Amplitude maximale de différence de température entre l'intérieur (mi-diamètre ou quart diamètre) et la surface de l'éprouvette et la température de surface relative à ce pic.

*Un seul essai exploitable

IV. Conclusion

Les mesures de propriétés thermiques ont mis en avant une plus faible conductivité thermique à la température ambiante des bétons de granulats recyclés. La présence de granulats recyclés modifie peu la chaleur spécifique. Au cours du chauffage la conductivité thermique des bétons diminue tandis que leur chaleur spécifique augmente faiblement. Par conséquent la diminution de diffusivité avec la température est plus marquée que celle de conductivité. Les allures des courbes de conductivité, diffusivité et chaleur spécifique en fonction de la température restent globalement les mêmes avec ou sans granulats recyclés. Les mesures de conductivité réalisées pendant le refroidissement montrent une hystérésis qui témoigne de l'irréversibilité des réactions qui conduisent à la dégradation du matériau. Une modélisation thermique du béton ne doit ainsi pas prendre en compte une valeur unique de conductivité par niveau de température, mais doit tenir compte de l'historique du chargement thermique.

Les mesures pendant le chauffage des températures en surface, au quart et à mi-diamètre d'une éprouvette ont permis de comparer la réponse thermique des trois types de bétons en incluant ainsi la part de chaleur consommée pendant les changements de phase et transformations chimiques. Les mesures réalisées en différents endroits de l'éprouvette et répétées sur trois échantillons ont montré un écart maximal de température légèrement plus élevé pour les bétons contenant des granulats recyclés, notamment pour la formulation C25/30 30R-30R en raison de la plus forte quantité d'eau absorbée par le sable recyclé. Au vu de l'ensemble de ces résultats, les bétons C25/30 OR-100R et C25/30 30R-30R présentent un comportement très proche du C25/30 OR-OR avec cependant des plus faibles conductivités thermiques.

Références

- [1] CHAN J. thermal properties of concrete with different Swedish aggregate materials. Master thesis. Lund 2013.
- [2] XING Z., BEAUCOUR A-L, HEBERT R., NOUMOWE A., LEDESERT B. (2015) Aggregate's influence on thermophysical concrete properties at elevated temperature. *Construction and Building Materials*, vol. 95, 2015, p.18-28
- [3] NIRY RAZAFINJATO Rijaiania (2015), Comportement des bétons à haute température : influence de la nature du granulats. *Thèse de l'université de Cergy-pontoise soutenue en 2015*.
- [4] KIZILKANAT AB, YUSER N, KABAY N. Thermo-physical properties of concrete exposed to high temperature. *Construction and Building Materials* 2013; 45: 157-161.
- [5] FLYNN DR. Response of high performance concrete to fire conditions: review of thermal properties and measurement techniques. NIST GCR ; 1999.
- [6] JANSSON Robert (2004), Material properties related to fire spalling of concrete, *Thesis work, Lund Institute of Technology* 2004.

- [7] JANSSON Robert (2004), Measurement of concrete thermal properties at high temperatures. In: *Fib task group 4.3 workshop "Fire design of concrete structures: What now? What next?"*, Milan; 2004
- [8] LANEYRIE C., BEAUCOUR A-L, GREEN M.F., HEBERT R., LEDESERT B. NOUMOWE A. (2016) Influence of recycled coarse aggregates on normal and high performance concrete subjected to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, vol. 111, 2016, p.368-378
- [9] SEDRAN T (2013). Mise au point des formules de béton de référence, rapport RECYBETON tranche 0, 2013.
- [10] GUSTAFSSON S.E. (1991) Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials. *Review of Scientific Instruments*, 62(3), 797-804.
- [11] GUSTAFSSON S.E. LONG T., (1995) Transient plane source (TPS) technique for measuring thermal transport properties of building materials. *Fire and Materials*, 19(1), 43-49.
- [12] RILEM TC 129-MHT. Mechanical concrete properties at high temperatures-modelling and application- part 3: compressive strength for service and accident conditions. *Materials and structures* 28(7), 410-414
- [13] YERMAK Nonna (2015), Comportement à hautes températures des bétons additionnés de fibres. *Thèse de l'université de Cergy-pontoise soutenue en 2015*.
- [14] HANICHE Rachid (2011) Contribution à l'étude des bétons portés en température ; Evolution des propriétés de transfert, Etude de l'éclatement. *Thèse de l'INSA de Lyon soutenue en 2011*.
- [15] MINDEGUIA Jean-Christophe (2009) Contribution expérimentale à la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons. *Thèse de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour soutenue en 2009*.

