

Effet des conditions thermo-hydrriques accidentelles sur les propriétés mécaniques du béton

Shuai Cheng¹, Stéphane Poyet¹, Tulio Honorio¹, François Hild², Benoît Bary¹

¹ Université Paris-Saclay, CEA, Service de Recherche en Corrosion et Comportement des Matériaux, 91190 Gif-sur-Yvette, France

² Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS, LMPS - Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, 91190 Gif-sur-Yvette, France

RESUME

La prolongation de la durée d'exploitation des réacteurs nucléaires en France jusqu'à 60 ans exige une démonstration rigoureuse de sûreté, validée par l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN), avec une attention particulière portée aux conditions associées aux Accidents Graves (AG). Ces derniers sont censés entraîner une augmentation significative au sein du bâtiment réacteur de la température (150°C) et de la pression absolue (5,2 bar), en lien avec une forte pression de vapeur d'eau (4,2 bar). Dans cette étude, l'effet de ces conditions thermo-hydrriques est examiné. Des essais mécaniques effectués après traitement à 150°C dans un réacteur sous pression montrent une chute significative des propriétés mécaniques par rapport aux éprouvettes témoins non traitées. D'autre part, des essais mécaniques menés avec un traitement analogue (150°C) mais sous atmosphère sèche (1 bar de pression de gaz absolue) ne montrent pas de variation significative des propriétés. Ces résultats mettent en évidence la forte influence de l'eau dans la porosité du béton et le possible développement d'un endommagement induit par la vaporisation de cette eau ainsi que la pressurisation du squelette solide. Ces études seront complétées par la suite par une série d'essais visant à caractériser les déformations différées (fluage et retrait) du béton subissant ces conditions accidentelles.

Mots-clefs Matériaux cimentaires, 150°C, pression, module élastique, résistances mécaniques

I. INTRODUCTION

Les enceintes de confinement des centrales nucléaires ont pour rôle d'assurer le confinement des substances radioactives en cas d'accident. Ces structures, en béton armé et doublement précontraintes, doivent être capables de résister aux conditions thermo-hydro-mécaniques extrêmes rencontrées lors de scénarios d'accidents graves (AG) (IRSN, 2008), caractérisés notamment par des élévations rapides de température (jusqu'à 150°C) et de pression absolue (5,2 bar). Ce travail se concentre plus spécifiquement sur les enceintes à double paroi en béton dépourvues de liner métallique.

Le béton, matériau clé des enceintes de confinement (FIGURE 1), est poreux et hétérogène, son comportement est influencé par des interactions complexes entre ses constituants principaux : la

pâte de ciment (PDC), les granulats, et l'interface PDC-granulats. Sous des conditions extrêmes, des phénomènes couplés de retrait, fluage et endommagement peuvent se manifester, affectant ses propriétés mécaniques et sa durabilité.

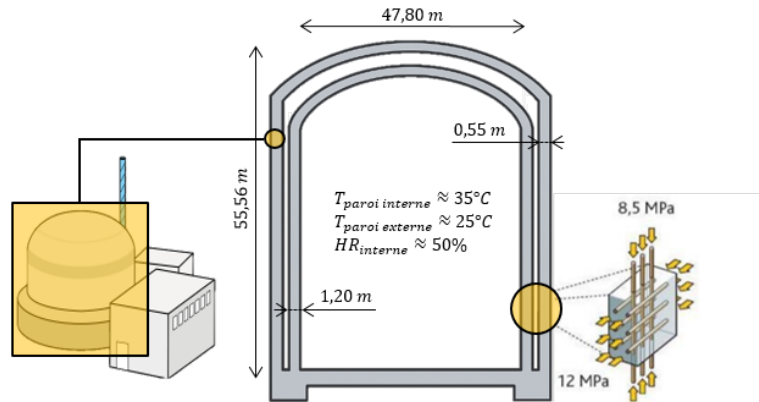


FIGURE 1. Conditions de fonctionnement d'un bâtiment de confinement en béton à double paroi d'une tranche de centrale de 1300 MWe : dimensions 47,80 × 55,56 m, épaisseur de la paroi interne 1,2 m, épaisseur de la paroi externe 0,55 m

La déformation différée du béton a fait l'objet de nombreuses études à température ambiante et pour des températures modérées ($< 90^{\circ}\text{C}$) (Bažant et al., 2004 ; Gawin et al., 2007 ; Koala, 2023 ; Ladaoui et al., 2013 ; Sellier et al., 2016 ; Tsitova, 2022). Les effets des températures élevées, comme celles observées lors d'incendies, sont relativement bien documentés (Li et al., 2004 ; Schrefler et al., 2002). Cependant, le comportement différé du béton soumis à des températures de l'ordre de 150°C reste peu exploré, malgré son importance dans le cadre des scénarios accidentels en réacteurs nucléaires. De plus, bien que l'effet de la température sur les propriétés mécaniques du béton ait été largement étudié (Hager et Pimienta, 2004 ; Husem, 2006 ; Khaliq et Kodur, 2011 ; Laneyrie et al., 2016 ; Lee et al., 2009 ; Lv et al., 2020 ; Ripani et al., 2018 ; Shen et Xu, 2019), les données expérimentales concernant l'impact de pressions élevées de vapeur d'eau à ces températures sont encore limitées, à l'exception de quelques travaux (Abd Elrahman and Hillemeier, 2015 ; Katayama et al., 2024).

Cet article se concentre sur la caractérisation des propriétés mécaniques du béton d'enceinte, telles que la résistance à la compression, la résistance à la traction et le module d'élasticité, après exposition à deux conditions thermo-hydriques. La première condition correspond à un traitement thermique à 150°C sous pression absolue (6 bar) et humidité relative (100%). La seconde condition implique un traitement thermique à 150°C mais sous atmosphère sèche (1 bar de pression de gaz absolue et une humidité relative proche de 0%). Ces deux séries d'essais permettent d'évaluer l'effet de la température à 150°C et l'impact de la haute pression de vapeur d'eau sur les propriétés mécaniques du béton.

II. FORMULATION DU MATERIAU D'ETUDE

Le matériau étudié est un Béton Ordinaire (BO) désigné VeRCoRs (Vérification Réaliste du Confinement des Réacteurs), formulé à base de ciment CEM I (Mathieu et al., 2018). VeRCoRs est une maquette à l'échelle 1/3 d'un bâtiment de confinement en béton armé précontraint, construite sur le site de recherche EDF-Lab Les Renardières. Une vue d'ensemble du projet, ainsi que les détails et les leçons tirées du premier benchmark consacré à la modélisation de la maquette dans sa première phase d'âge, peuvent être consultés dans (Corbin et Garcia, 2016). Le béton VeRCoRs (TABLEAU 1) a été déjà étudié par d'autres auteurs (Huang, 2018 ; Kallel et al., 2016 ; Kinda, 2021 ; Koala, 2023 ; Vidal et al., 2019).

TABLEAU 1. Formulation utilisée pour le béton VeRCoRs à base de CEM I

Composant	Origine	Quantité, kg/m ³	Densité, kg/ m ³
CEM I 52.5	Gaurain	320,0	3130
Sable 0/4 rec	Varennes	830,0	2630
Gravillon 4/11 roulé	Varennes	445,0	2500
Gravier 8/16 roulé	Balloy	550,0	2530
Eau d'ajout	Réseau	195,5	1000
Superplastifiant	Sikaplast Techno-80	2,6	1055
E(totale)/C		0,61	

III. METHODES EXPERIMENTALES

A. Fabrication

La procédure de fabrication du béton suit les protocoles adoptés dans les travaux précédents (Huang, 2018 ; Kallel, 2016 ; Kinda, 2021 ; Vidal et al., 2019), conformément aux normes (NF EN 12390-1, 2001 ; NF EN 12390-2, 2001). Le béton est coulé dans des moules métalliques (ou en carton) en deux couches d'environ dix centimètres chacune, avec une vibration appliquée à l'aide d'une table vibrante pendant 10 s pour chaque couche afin d'assurer une bonne compacité. Pour prévenir la dessiccation, les moules sont fermés et stockés dans une salle humide maintenue à 20°C. Après 24 h de conservation, les échantillons de taille 11 × 22 cm sont démoulés puis mis en cure : soit en condition endogène, soit sous eau (avec CaO), jusqu'à 28 jours après fabrication.

B. Méthodes

Cette étude vise à évaluer les propriétés mécaniques du béton VeRCoRs avant et après exposition à deux conditions spécifiques :

1. 150°C, 100% HR et 6 bar de pression absolue
2. 150°C, ≈ 0% HR et 1 bar de pression absolue

La première condition est produite dans un réacteur passif, dont la pression absolue avoisine 6 bar (1 bar de pression de gaz atmosphérique + environ 5 bar de pression de vapeur saturante à 150°C) qui n'est pas exactement la condition AG (1 bar de pression de gaz atmosphérique + environ 4,2 bar de pression de vapeur saturante correspondant à 90% HR à 150°C). Cette condition a été retenue en

raison de la simplicité d'utilisation du réacteur passif. Le réacteur passif est constitué d'un cylindre en acier inoxydable, fermé par un couvercle maintenu par 12 vis et dont l'étanchéité est assurée grâce à un joint torique (FIGURE 2b). Une quantité appropriée d'eau a été ajoutée au fond du réacteur, sans contact direct avec les échantillons (FIGURE 2a). Pour un suivi précis de la température, deux thermocouples ont été insérés dans le réacteur pour suivre la température de l'air dans le réacteur ainsi qu'à la surface des éprouvettes (FIGURE 2c). Les mesures de température et de pression ont été enregistrées à intervalles réguliers (10 minutes). Les éprouvettes ont été placées dans le réacteur, qui a ensuite été chauffé à 150°C à l'aide d'une étuve. Cette configuration a permis de reproduire des conditions thermo-hydriques spécifiques. La vapeur d'eau et l'eau dans le réacteur atteignent un équilibre à 150°C, entraînant une humidité relative de 100% et une pression absolue d'environ 6 bar au début des essais.

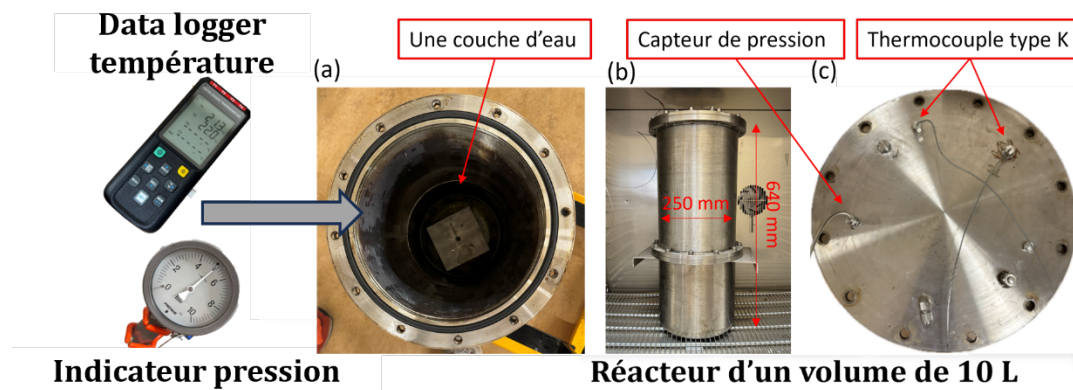


FIGURE 2. Réacteur connecté aux thermocouples et au capteur de pression pour l'exposition à la première condition : (a) interne, (b) externe, (c) couvercle d'étanchéité

La deuxième condition est obtenue simplement en utilisant une étuve maintenue à 150°C (Memmert UFE400). Le séchage a été contrôlé par convection forcée grâce à un ventilateur à vitesse variable intégré dans l'étuve. La vitesse de montée en température a été fixée à 1 °C/min pour correspondre à celle du réacteur passif. Les deux étuves ont été arrêtées au bout de 14 jours, laissant les échantillons refroidir lentement pendant la nuit. Les essais mécaniques ont ensuite été réalisés le 15^e jour.

C. Récapitulatif des travaux

Les propriétés mécaniques évaluées comprennent la résistance à la compression, à la traction et le module d'élasticité, mesurées selon les normes (NF EN 12390-3, 2001 ; NF EN 12390-13, 2014 ; NF P 18-408, 2005). Les tests ont été réalisés avant et après exposition, avec une distinction entre :

- Les propriétés mécaniques initiales : mesurées après 28 jours de cure, correspondant à la résistance à la compression (f_{c28}), à la traction (f_{t28}), et au module d'élasticité (E_{28})
- Les propriétés mécaniques résiduelles : mesurées après 14 jours d'exposition (soit un âge total de 42 jours pour le béton), correspondant à la résistance résiduelle à la compression (f_{cr}), à la traction (f_{tr}) et au module d'élasticité résiduel (E_r)

Cette approche permet d'évaluer l'impact des expositions sur les propriétés mécaniques du béton en comparant ses caractéristiques **avant et après** exposition. Plusieurs gâchées ont été préparées (78 cylindres au total) pour évaluer les propriétés mécaniques résiduelles (f_{cr} , f_{tr} et E_r) et mesurer les propriétés initiales (f_{c28} , f_{t28} et E_{28}) (

TABLEAU 2). En raison du volume limité du réacteur, le nombre maximal d'éprouvettes pouvant être exposées simultanément est de 6, avec des dimensions de 11 × 22 cm.

TABLEAU 2. Récapitulatif des travaux expérimentaux

Conditions	Cure	Cylindre	Nombre d'échantillons	Propriété
100%HR-6 bar	Sous eau	11×22 cm	15	f_{cr} , E_r et f_{tr}
	Endogène		6	f_{cr}
≈ 0%HR-1 bar	Sous eau		12	f_{cr} , E_r et f_{tr}
	Endogène		6	f_{cr}
Témoin	Sous eau		33	f_{c28} , E_{28} et f_{t28}
	Endogène		6	f_{c28}

IV. RESULTATS

A. Propriétés mécaniques initiales

Les propriétés mécaniques initiales ont été mesurées sur 39 cylindres de béton (11 × 22 cm) issus de gâchées différentes, après 28 jours de cure (**TABLEAU 3**). A titre de comparaison, la résistance à la compression, le module d'élasticité et la résistance à la traction du béton VerCoRs, mesurés par Kallel (Kallel, 2016), sont respectivement de $41,0 \pm 1,1$ MPa, 35 GPa et $3,7 \pm 0,3$ MPa, des valeurs cohérentes avec nos résultats. Par ailleurs, la résistance à la compression en conditions de cure endogène, inférieure à celle mesurée en conditions sous eau, est également en accord avec les données de la littérature.

TABLEAU 3. Propriétés mécaniques initiales

Propriété mécanique	f_{c28} , MPa	f_{c28} , MPa	f_{t28} , MPa	E_{28} , GPa
Type de cure	Sous eau	Endogène	Sous eau	Sous eau
Nombre	17	6	11	5
Résultats	$41,3 \pm 1,0$	$35,5 \pm 1,9$	$3,6 \pm 0,5$	$36,2 \pm 0,8$

B. Températures

Les courbes des **FIGURE 3** présentent l'évolution de la température moyenne de la surface de l'éprouvette et de l'air dans le réacteur pour des essais différents. L'évolution montre une phase de montée en température et un plateau à environ 150°C. La moyenne (μ) et l'écart type (σ) sont indiqués, montrant une faible dispersion autour de 150°C. Ces profils témoignent de la fiabilité de

la métrologie des essais. L'encadré indique la vitesse de montée en température ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$) au début de chaque test. La vitesse maximale observée est d'environ $0,6^{\circ}\text{C}/\text{min}$ pour la surface de l'éprouvette et $1,6^{\circ}\text{C}/\text{min}$ pour l'air dans le réacteur. Cet écart est dû à la différence d'inertie thermique entre l'air et le béton. En tenant compte de cet aspect, une montée en température moyenne de $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$, estimée à partir des enregistrements de la température de l'air dans le réacteur, est programmée pour l'étuve de séchage afin de reproduire les conditions thermiques du réacteur.

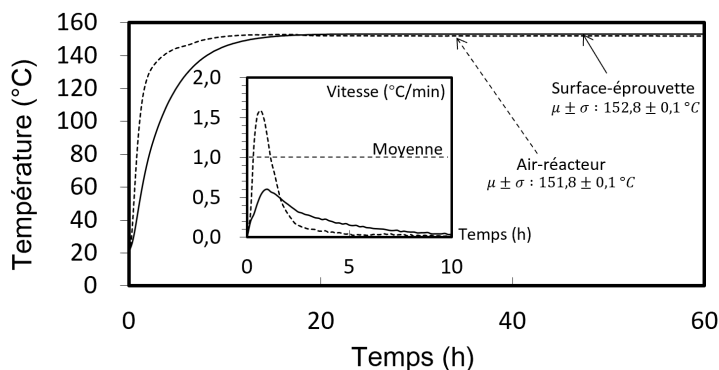


FIGURE 3. Courbes de température moyenne de la surface de l'éprouvette et de l'air dans le réacteur en fonction du temps pour différents essais

C. Pression absolue

Les courbes de la (FIGURE 4) illustrent l'évolution de la pression absolue pour le réacteur rempli de l'éprouvette et vide. Les profils montrent une montée rapide de la pression jusqu'à un plateau d'environ 6 bar, suivie d'une décroissance progressive autour de 5 bar et enfin une chute brutale en fin de cycle. Un test de chauffage du réacteur vide, contenant une couche d'eau, révèle que l'étanchéité du réacteur n'est pas entièrement assurée. Cependant, étant donné la quantité d'eau restante après 14 jours de chauffage, même si une partie de la vapeur d'eau s'échappe, celle-ci est rapidement compensée par l'évaporation de l'eau liquide, garantissant ainsi une humidité relative maintenue à 100%. La pression absolue se stabilise finalement autour de 5 bar, correspondant à la pression de vapeur saturante à 150°C . L'arrêt de l'étuve en fin d'essai entraîne une baisse de la température dans le réacteur, ce qui provoque une diminution de la pression de vapeur saturante. Une dépression se forme pendant plusieurs heures lors de la décharge, en raison de fuites du mélange vapeur-air sec au cours du chauffage, entraînant une diminution de la pression partielle d'air sec au profit de celle de la vapeur (forte vaporisation). Ainsi lorsque la température décroît, la pression de vapeur diminue également (condensation) pour atteindre des valeurs nettement inférieures à celle de la pression atmosphérique lorsque $T = 20^{\circ}\text{C}$. Cette dépression est rapidement compensée par la pression atmosphérique dès l'ouverture du réacteur en fin d'essai.

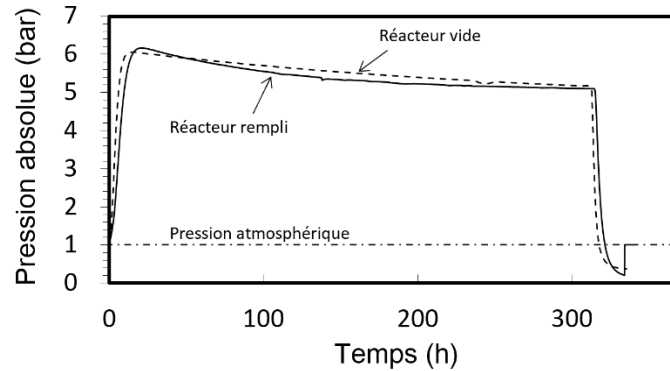


FIGURE 4. Courbes de pression absolue moyenne du réacteur vide et du réacteur contenant l'éprouvette en fonction du temps pour différents essais

D. Propriétés mécaniques résiduelles

Les résultats récapitulatifs des propriétés mécaniques résiduelles après exposition à la condition 100%HR-6 bar sont présentés dans le TABLEAU 4, tandis que ceux correspondant à la condition $\approx 0\%$ HR-1 bar sont listés dans le TABLEAU 5. Chaque résultat est calculé comme une moyenne issue d'au moins 6 éprouvettes.

TABLEAU 4. Propriétés mécaniques résiduelles suite à l'exposition de la condition (150-100-6-14)

Propriété mécanique	f_{cr} , MPa	f_{cr} , MPa	f_{tr} , MPa	E_r , GPa
Type de cure	Sous eau	Endogène	Sous eau	Sous eau
Nombre d'échantillons	9	6	6	6
Résultats	$30,7 \pm 0,9$	$29,9 \pm 0,9$	$2,6 \pm 0,2$	$22,6 \pm 0,8$

TABLEAU 5. Propriétés mécaniques résiduelles suite à l'exposition de la condition (150-0-1-14)

Propriété mécanique	f_{cr} , MPa	f_{cr} , MPa	f_{tr} , MPa	E_r , GPa
Type de cure	Sous eau	Endogène	Sous eau	Sous eau
Nombre d'échantillons	6	6	6	6
Résultats	$39,8 \pm 0,5$	$34,3 \pm 0,9$	$3,3 \pm 0,3$	$25,6 \pm 0,4$

D1. Résistance à la compression

Le béton VerCoRs, conservé sous eau, voit sa résistance à la compression passer de 41,3 MPa à 30,7 MPa sous la condition 100%HR-6 bar, soit une diminution d'environ 26%. La perte significative de la résistance à la compression du béton en présence d'une pression de vapeur d'eau élevée à la température de 150°C est peu documentée dans la littérature. Curé en conditions endogènes, il subit une réduction de sa résistance à la compression de 35,5 MPa à 29,9 MPa dans les mêmes conditions, correspondant à une diminution d'environ 16%, ce qui montre l'influence probable de la quantité d'eau présente dans la porosité. Sous la deuxième condition $\approx 0\%$ HR-1 bar, les bétons curés sous eau et en conditions endogènes subissent une diminution similaire de la résistance à la compression

d'environ 4% (FIGURE 5a), ce qui est cohérent par rapport à la littérature. Husem (2006) a traité un béton ordinaire à haute température, suivi d'un refroidissement lent à l'air, et a observé une perte de résistance de 4,7%. Shen et Xu (2019) ont séché un béton ordinaire à 150°C pendant 30 h jusqu'à un état complètement sec, notant une perte de résistance d'environ 4%. Selon l'Eurocode 2 (NF EN 1992-1-2, 2004), les pertes de résistance à 150°C sont de 2% pour les bétons calcaires et de 2,5% pour les bétons siliceux.

D2. Résistance à la traction par fendage

Un phénomène similaire est observé pour les résultats de traction par fendage : le béton soumis à l'exposition 100%HR-6 bar présente une perte de résistance plus importante, atteignant 31%, comparée à une diminution de seulement 12% sous l'exposition à la condition $\approx 0\%$ HR-1 bar (FIGURE 5b). Dans les études existantes, il est acceptable d'observer une perte de résistance à la traction de 12% en chauffant le béton en atmosphère sèche. Cependant, une perte de 31% obtenue sous une pression de vapeur d'eau élevée à 150°C est moins documentée et constitue une donnée comparative très importante. Ripani et al. (2018) ont réalisé une analyse bibliographique et développé le modèle thermomécanique Leon-Drucker-Prager dépendant de la température (TD-LDP). Ce modèle s'est révélé très cohérent avec la perte de 12%. Les études et modèles proposés par (Khaliq et Kodur, 2011 ; Laneyrie et al., 2016 ; Lv et al., 2020) montrent aussi une bonne concordance avec une perte de 12%.

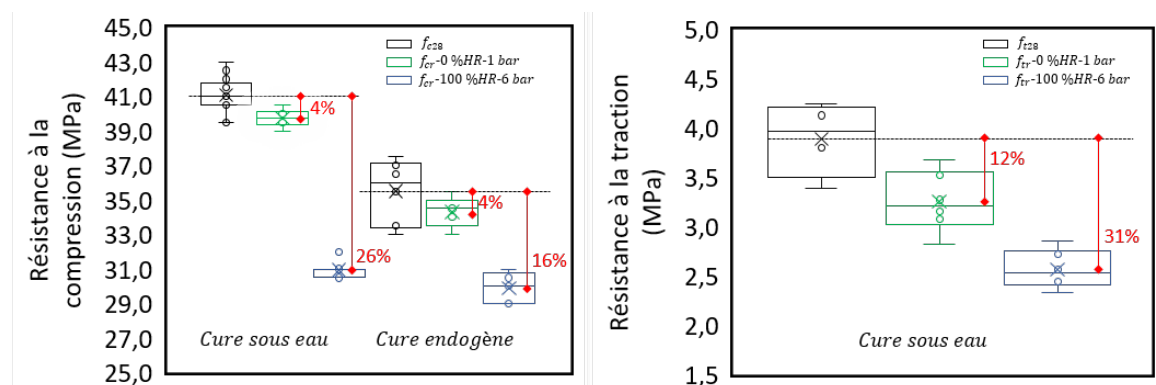


FIGURE 5. Comparaison de la résistance à la compression (a) et de la résistance à la traction (b) des éprouvettes 11 × 22 cm de béton en fonction de différents traitements thermiques sous deux types de cure (sous eau et endogène)

D3. Module d'élasticité

Le module d'élasticité présente également un phénomène similaire : le béton soumis à l'exposition 100%HR-6 bar enregistre une perte plus importante, atteignant 38%, par rapport à une diminution de seulement 29% sous l'exposition à la condition $\approx 0\%$ HR-1 bar (FIGURE 6). Ces résultats sont en cohérence avec différents travaux (Hager et Pimienta, 2004 ; Khaliq et Kodur, 2011 ; Lee et al., 2009 ; Mindeguia et al., 2010).

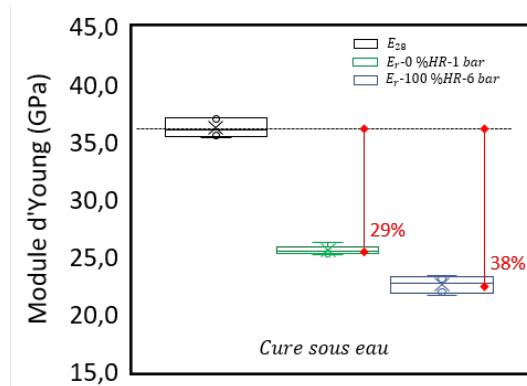


FIGURE 6. Comparaison du module d'Young des éprouvettes 11 × 22 cm de béton en fonction de différents traitements thermiques

V. CONCLUSIONS

Les essais mécaniques réalisés sur des bétons traités à 150°C, mais sous atmosphère sèche (1 bar de pression de gaz absolue), montrent une diminution de 4% de la résistance à la compression, de 12% de la résistance à la traction et de 29% du module de Young. Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés dans la littérature. Une perte de résistance à la compression comprise entre 2% et 4,7% a été rapportée dans les études de (Husem, 2006 ; Laneyrie et al., 2016 ; Shen et Xu, 2019), ainsi que dans l'Eurocode 2, pour des températures de 150°C à 200°C. De même, une diminution de la résistance à la traction comprise entre 6% et 16% a été observée dans les travaux de (Khaliq et Kodur, 2011 ; Laneyrie et al., 2016 ; Lv et al., 2020 ; Ripani et al., 2018), ainsi que dans l'Eurocode 2. De plus, les études expérimentales et les modèles proposés (Hager et Pimienta, 2004 ; Khaliq et Kodur, 2011 ; Lee et al., 2009 ; Mindeguia et al., 2010) rapportent des pertes de module d'élasticité comprises entre 22% et 40%, ce qui montre une bonne concordance avec nos résultats.

Les essais mécaniques réalisés sur des bétons traités à 150°C dans un réacteur sous pression montrent une diminution de 26% de la résistance à la compression, de 31% de la résistance à la traction et de 38% du module de Young. Le béton présente une dégradation plus marquée de ses propriétés mécaniques à 150°C sous pression, un phénomène qui est très peu documenté dans la littérature. L'étude similaire d'Abd Elrahman et Hillemeier (2015) concernant l'impact d'une pression élevée de vapeur d'eau à 15,5 bar, lors d'un cycle de chauffage-refroidissement entre 20°C et 200°C, rapporte une dégradation de la résistance à la compression de 39%, plus marquée sur le béton ordinaire. L'étude de Katayama et al. (2024) met en évidence une perte de résistance à la compression 15% plus importante à 100°C sous pression par rapport à un chauffage sous atmosphère normale, après une semaine d'exposition. Ces études montrent que l'effet d'une pression élevée à haute température sur la dégradation des propriétés mécaniques du béton n'est pas négligeable, soulignant ainsi l'importance d'une caractérisation expérimentale plus approfondie de ces impacts.

Plusieurs conclusions peuvent être tirées :

- Les essais réalisés après traitement à 150°C dans un réacteur sous pression montrent une chute significative des propriétés mécaniques par rapport aux éprouvettes témoins traitées de manière similaire (150°C) mais sous atmosphère sèche (1 bar de

pression de gaz absolue). Ces résultats soulignent l'impact majeur de la vapeur d'eau sur la porosité du béton et suggèrent que l'endommagement pourrait être induit par la vaporisation de l'eau et/ou la dilatation différentielle entre l'eau et le solide qui pourrait conduire à la pressurisation du squelette solide (Ghabezloo, 2008).

- Les bétons conservés en cure endogène subissent une perte de résistance à la compression moins importante que ceux en cure sous eau, ce qui pourrait être lié à la saturation initiale ou à la porosité initiale, influençant ainsi la pression de vapeur interne générée par la vaporisation de l'eau et/ou à une dilatation différentielle moins prononcée entre l'eau et le solide, conduisant à une pressurisation réduite du squelette solide.

Par la suite, ces études seront complétées par une série d'essais visant à caractériser les déformations différées (fluage et retrait) du béton soumis aux conditions accidentelles. Par ailleurs, des investigations et caractérisations seront menées afin de comprendre et expliquer les effets des conditions extérieures de pression de vapeur élevée combinée à une température de 150°C sur la microstructure et les propriétés mécaniques du béton.

REFERENCES

- Abd Elrahman, M., Hillemeier, B., 2015. Influence of hydrothermal conditions with 200°C and 15.5bars on the properties of hardened HPC. *Constr. Build. Mater.* 85, 38–48. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.027>
- Bazant, Z.P., Cusatis, G., Cedolin, L., 2004. Temperature Effect on Concrete Creep Modeled by Microprestress-Solidification Theory. *J. Eng. Mech.* 130, 691–699. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2004\)130:6\(691\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2004)130:6(691))
- Corbin, M., Garcia, M., 2016. International Benchmark VeRCoRs 2015–Overview, synthesis and lessons learnt. EDF SEPTEN.
- Gawin, D., Pesavento, F., Schrefler, B.A., 2007. Modelling creep and shrinkage of concrete by means of effective stresses. *Mater. Struct.* 40, 579–591. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9165-1>
- Ghabezloo, S., 2008. Comportement thermo-poro-mécanique d'un ciment pétrolier (phdthesis). Ecole des Ponts ParisTech.
- Hager, I., Pimienta, P., 2004. Mechanical properties of HPC at high temperatures, in: *Proc. Int. Workshop Fib Task Group, Fire Design of Concrete Structures: What Now? What Next.* pp. 95–100.
- Huang, S., 2018. Comportement vieillissant du béton en fluage : application au béton VeRCoRs (These de doctorat). Paris Est.
- Husem, M., 2006. The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete. *Fire Saf. J.* 41, 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2005.12.002>
- IRSN, 2008. Accidents graves des réacteurs à eau de production d'électricité. www.irsn.fr.
- Kallel, H., 2016. Influence de la température et de l'hygrométrie sur le comportement instantané du béton (PhD Thesis). Université de Pau et des Pays de l'Adour-Laboratoire SIAME.
- Kallel, H., Carré, H., Laborderie, C., Masson, B., Tran, N.C., 2016. influence of Moisture and Temperature on Mechanical Properties of the Concrete, in: *Proceedings of the 9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures.* Presented at the 9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, IA-FraMCoS. <https://doi.org/10.21012/FC9.053>
- Katayama, Y., Kontani, O., Mihara, Y., Yasukochi, J., Inaba, Y., Kambayashi, D., 2024. Physical Material Properties of Normal Concrete Subjected to High Temperature.
- Khaliq, W., Kodur, V., 2011. Thermal and mechanical properties of fiber reinforced high performance self-consolidating concrete at elevated temperatures. *Cem. Concr. Res.* 41, 1112–1122. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.06.012>

- Kinda, J., 2021. Impact of drying rate on delayed strain behavior of cement-based materials - experimental and numerical study (phdthesis). Université Paris-Saclay.
- Koala, H., 2023. Loi de comportement du béton VeRCoRs en conditions accidentelles (These de doctorat). Toulouse 3.
- Ladaoui, W., Vidal, T., Sellier, A., Bourbon, X., 2013. Analysis of interactions between damage and basic creep of HPC and HPFRC heated between 20 and 80 °C. *Mater. Struct.* 46, 13–23. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9879-1>
- Laneyrie, C., Beaucour, A.-L., Green, M.F., Hebert, R.L., Ledesert, B., Noumowe, A., 2016. Influence of recycled coarse aggregates on normal and high performance concrete subjected to elevated temperatures. *Constr. Build. Mater.* 111, 368–378. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.056>
- Lee, J., Xi, Y., Willam, K., Jung, Y., 2009. A multiscale model for modulus of elasticity of concrete at high temperatures. *Cem. Concr. Res.* 39, 754–762. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.05.008>
- Li, M., Qian, C., Sun, W., 2004. Mechanical properties of high-strength concrete after fire. *Cem. Concr. Res.* 34, 1001–1005. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.007>
- Lv, N., Wang, H., Zong, Q., Wang, M., Cheng, B., 2020. Dynamic Tensile Properties and Energy Dissipation of High-Strength Concrete after Exposure to Elevated Temperatures. *Materials* 13, 5313. <https://doi.org/10.3390/ma13235313>
- Mathieu, J.-P., Charpin, L., Sémété, P., Toulemonde, C., Boulant, G., Haelewyn, J., Hamon, F., Michel-Ponnelle, S., Hénault, J.-M., Taillade, F., 2018. Temperature and humidity-driven ageing of the VeRCoRs mock-up, in: *Computational Modelling of Concrete Structures*. CRC Press, London, pp. 215–224. <https://doi.org/10.1201/9781315182964-27>
- Mindeguia, J.-C., Pimienta, P., Noumowé, A., Kanema, M., 2010. Temperature, pore pressure and mass variation of concrete subjected to high temperature — Experimental and numerical discussion on spalling risk. *Cem. Concr. Res.* 40, 477–487. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.10.011>
- NF EN 1992-1-2, 2004. Eurocode 2 : calcul des structures en béton - Partie 1-2 : règles générales - Calcul du comportement au feu, European Standard EN 1992-1-2.
- NF EN 12390-1, 2001. Essais pour béton durci - Partie 1 : forme, dimensions et autres exigences aux éprouvettes et aux moules, European Standard EN 12390-1.
- NF EN 12390-2, 2001. Essais pour béton durci - Partie 2 : confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance, European Standard EN 12390-2.
- NF EN 12390-3, 2001. Testing hardened concrete – Part 3: compressive strength of test specimens, European Standard EN 12390-3.
- NF EN 12390-13, 2014. Essai pour béton durci - Partie 13 : détermination du module sécant d'élasticité en compression, European Standard EN 12390-13.
- NF P 18-408, 2005. Bétons - Essai de fendage, French standards NF P 18-408.
- Ripani, M., Vrech, S., Etse, G., 2018. Numerical assessment of temperature effects on concrete failure behavior. *Int. J. Fract.* 212, 219–236. <https://doi.org/10.1007/s10704-018-0301-z>
- Schrefler, B.A., Brunello, P., Gawin, D., Majorana, C.E., Pesavento, F., 2002. Concrete at high temperature with application to tunnel fire. *Comput. Mech.* 29, 43–51. <https://doi.org/10.1007/s00466-002-0318-y>
- Sellier, A., Multon, S., Buffo-Lacarrière, L., Vidal, T., Bourbon, X., Camps, G., 2016. Concrete creep modelling for structural applications: non-linearity, multi-axiality, hydration, temperature and drying effects. *Cem. Concr. Res.* 79, 301–315.
- Shen, J., Xu, Q., 2019. Effect of elevated temperatures on compressive strength of concrete. *Constr. Build. Mater.* 229, 116846. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116846>
- Tsitova, A., 2022. Multiscale experimental and numerical study of creep and microcracking in cementitious materials (phdthesis). Université Paris-Saclay.
- Vidal, T., Cagnon, H., Nguyen, N., Torrenti, J.-M., Sellier, A., 2019. Risk due to creep of prestressed concrete at moderate temperature. *MATEC Web Conf.* 281, 01007. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928101007>