

Suivi diélectrique de l'hydratation d'une pâte de ciment : une approche multidisciplinaire

Sofiane AIT HAMADOUCHE

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

SATIE, UMR 8029, ENS Paris-Saclay, Université Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette, France

RESUME Les mesures diélectriques sont un bon candidat pour le suivi non destructif de l'hydratation des matériaux cimentaires. Dans le cadre d'une application in-situ de ces méthodes il est nécessaire de : (i) comprendre les processus à l'origine de la réponse diélectrique de la matrice cimentaire lors de l'hydratation (ii) passer à l'échelle de l'application sur des structures en béton et (iii) développer des méthodes expérimentales adaptées. Ce travail se focalise sur le point (i), avec une approche multidisciplinaire combinant modélisation (en dynamique moléculaire, micromécanique et modélisation thermodynamique) et expérimentations (mesures diélectriques et calorimétriques sur pâte de ciment). Expérimentalement, le but est de corréler la permittivité diélectrique $\varepsilon_r(f,t)$ au degré d'hydratation $\alpha(t)$. Plusieurs fréquences f sont testés entre 100 MHz et 3 GHz. Une corrélation plus directe est obtenue à partir de 600 MHz entre $\varepsilon_r(t)$ et $\alpha(t)$. En termes de modélisation, le but est de prédire $\varepsilon_r(\alpha)$. Une stratégie de modélisation multi-échelle est proposée où des résultats à l'échelle moléculaire sont utilisés comme données d'entrée dans une approche micromécanique tenant compte de la composition du matériau. Enfin, le modèle est comparé aux résultats expérimentaux à 800 MHz. Il donne des résultats satisfaisant avec 2,3% d'erreur moyenne par rapport aux données expérimentales.

Mots-clefs Permittivité diélectrique, Hydratation, Calorimétrie, Modélisation multi-échelle

I. INTRODUCTION

Le béton est actuellement le matériau le plus utilisé dans le monde. Être capable de caractériser les matériaux cimentaires est nécessaire du point de vue scientifique, pour la compréhension de leur évolution et de leur vieillissement. Cela l'est aussi du point de vue applicatif : pour le contrôle qualité lors de la fabrication et l'évaluation de la santé des ouvrages. Dans ce contexte, le suivi des processus d'hydratation du ciment est particulièrement important, étant donné que le développement de la microstructure au jeune âge est responsable du développement des propriétés des matériaux cimentaires, telles que les propriétés mécaniques (De Schutter, 2002).

Plusieurs méthodes expérimentales peuvent être utilisées pour suivre l'hydratation, telles que la calorimétrie et la thermogravimétrie (Parrott et al., 1990). Dans la perspective d'application de terrain, ces dernières ont toutefois l'inconvénient d'être destructives et non utilisables sur site. Les mesures diélectriques constituent une alternative intéressante car elles permettent, dans certaines configurations, un suivi non invasif et non-destructif de l'hydratation des matériaux cimentaires (Van Beek and Milhorst., 2000). En outre, elles ont l'avantage d'être très sensibles à la teneur en eau

dans les géomatériaux (Berg et al., 1992), étant donné que l'eau liquide présente une permittivité diélectrique nettement plus élevée que les phases gazeuses et solides.

Dans cet article, nous proposons une approche de suivi d'hydratation combinant expérimentation et modélisation diélectrique ainsi que des mesures calorimétriques. Cette approche permet de confronter l'évolution expérimentale et théorique de la permittivité diélectrique ε_r d'une pâte de ciment en fonction de son degré d'hydratation α . Sur le plan expérimental, le suivi de l'hydratation d'une pâte de ciment a été réalisé sur 28 jours, au moyen de mesures de spectroscopie diélectriques (de 100 MHz à 3 GHz ou 6 GHz) et des mesures de calorimétrie isotherme. La combinaison de ces mesures a servi à étudier la corrélation entre la permittivité diélectrique $\varepsilon_r(f,t)$ et le degré d'hydratation $\alpha(t)$. Sur le plan de la modélisation, une approche multi-échelle tenant compte de l'échelle moléculaire a été utilisée afin d'obtenir également l'évolution $\varepsilon_r(\alpha)$ de la permittivité d'une pâte de ciment en fonction de son degré d'hydratation et de sa composition. Le modèle a ensuite été confronté aux résultats expérimentaux.

II. PREPARATION DU MATERIAU

Le ciment utilisé est de type CEM I 52,5 R CE CP2 NF. Il a été produit par Vicat à l'usine La Grave de Peille. La composition minéralogique du clinker est la suivante (d'après la fiche technique du fabricant) : $C_3S = 55,4 \%$, $C_2S = 18,6 \%$, $C_3A = 7,3 \%$ et $C_4AF = 10,7 \%$. La masse volumique est de $3,18 \text{ g/cm}^3$ et le diamètre médian des grains est de $11,6 \mu\text{m}$.

La pâte de ciment a un rapport $E/C = 0,4$. Le malaxage a été réalisé avec un malaxeur à mortier selon la norme EN 196-3. Les échantillons utilisés dans les mesures calorimétriques et diélectriques sont tous issus du même mélange de pâte de ciment.

III. MESURES CALORIMETRIQUES

III.A. Calorimétrie isotherme

Les mesures calorimétriques ont été effectuées avec un calorimètre isotherme TAM Air. Trois échantillons issus de la pâte de ciment préparée (voir section II) ont fait l'objet d'un suivi durant 28 jours à une température de 23°C .

III.B. Degré d'hydratation

Une mesure de calorimétrie isotherme, permet de déterminer le degré d'avancement de l'hydratation $\xi(t)$ à l'instant t à partir du dégagement de chaleur cumulé $q(t)$ [J/g] :

$$\xi(t) = \frac{q(t)}{q_{\max}} \quad 1$$

où $q_{\max}$ est le dégagement de chaleur à la fin de l'essai. Cette valeur est conventionnellement déterminée à 28 jours pour un ciment Portland et est relié à $\alpha = \alpha_{\max}$ et $\xi = 1$ (Lacarrière et al., 2019). Sachant qu'à 28 jours la réaction d'hydratation n'est pas encore finie, le degré d'hydratation $\alpha(t)$ peut être calculé de la manière suivante (Olivier, 2016) :

$$\alpha(t) = \alpha_u \times \xi(t) \quad 2$$

où α_u est le degré d'hydratation ultime au-delà duquel il n'y a plus de place dans la matrice cimentaire pour la formation de nouveaux hydrates (Van Breugel, 1997). Ce paramètre a été estimé avec le modèle de (Waller, 1999) :

$$\alpha_u = 1 - e^{-3,3\frac{E}{C}} = 0,73 \quad 3$$

La Fig. 1 représente l'évolution de $\alpha(t)$ calculé à partir de nos données expérimentales en utilisant le modèle de (Waller, 1999). Les résultats étant assez proches, seule l'échantillon 1 sera considéré pour l'étude de corrélation entre la réponse diélectrique et $\alpha(t)$.

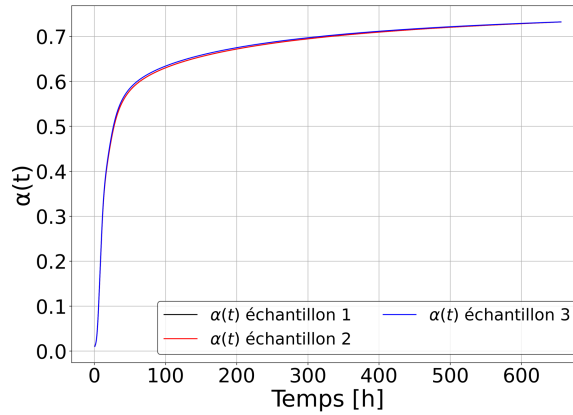


FIGURE 1. Degré d'hydratation calculé à partir des mesures de calorimétrie isotherme en considérant le modèle Waller pour le calcul de α_u

IV. MESURES DIELECTRIQUES

IV.A. Permittivité diélectrique

La permittivité diélectrique représente la quantité d'énergie électrique pouvant être stockée par un matériau, elle est exprimée par rapport à la permittivité du vide ϵ_0 sous le nom de permittivité relative $\epsilon_r(f) = \epsilon(f)/\epsilon_0$ (Chen, 2004). La permittivité relative combine les effets de polarisation et de pertes diélectriques, c'est une grandeur complexe qui dépend de la fréquence f :

$$\epsilon_r^*(f) = \epsilon_r'(f) - j\epsilon_r''(f) \quad 4$$

où la partie réelle $\epsilon_r'(f)$ représente les effets du stockage de l'énergie électromagnétique dans le matériau dus aux différents phénomènes de polarisation qui s'y produisent, la partie imaginaire $\epsilon_r''(f)$ représente les pertes diélectriques qui se traduisent par des pertes électromagnétiques (Quan et al., 2017).

Il existe plusieurs types de polarisations en fonction de la fréquence : (i) interfaciale (ii) dipolaire, (iii) ionique et (iv) électronique. Les polarisations électroniques et ioniques se produisent dans des fréquences de l'ordre du THz. La polarisation interfaciale intervient à des fréquences $f < 50$ MHz

(Metaxas and Meredith, 1993). La polarisation dipolaire est présente à des fréquences $f < 10$ GHz (Schwing, 2016). La molécule d'eau se comporte naturellement comme un dipôle, en l'absence d'un champ électromagnétique (EM), les molécules d'eau sont orientées d'une manière aléatoire. Suite à l'application d'un champ EM, elles se polarisent car les dipôles s'alignent dans la direction du champ (Schwing, 2016). Le temps que mettent les molécules à se réorienter aléatoirement quand le champ EM n'est plus appliqué est le temps de relaxation τ_{relax} , qui est déterminé via la partie imaginaire $\varepsilon_r''(f)$.

Dans les géomatériaux, il y a un fort contraste entre la permittivité de l'eau et celle des phases solides et gazeuses. La permittivité de l'eau dépend de la fréquence et de la température. La partie réelle de sa permittivité statique $\varepsilon_r'(0)$ est égale à 80 à 20°C (Gregory and Clarke, 2005). Les permittivités des grains solides et de l'air ne dépendent pas de la fréquence ni de la température et n'ont pas de partie imaginaire : $\varepsilon_r(air) = 1$ et $3 < \varepsilon_r(grain) < 9$. De ce fait, l'eau est la phase qui contribue le plus à la réponse diélectrique des géomatériaux.

IV.B. Spectroscopie diélectrique RF

La méthode de spectroscopie RF adoptée consiste à mesurer le coefficient de réflexion $S_{11}(f)$ de l'onde électromagnétique à l'interface d'une sonde à effet de bout et du matériau sous test (Material Under Test – MUT) au moyen d'un analyseur de réseau vectoriel (Vector Network Analyser-VNA) (Fig. 2(A)). La sonde est constituée : (i) d'un connecteur de type N (avec une ouverture de 8 mm), relié à un plan de masse circulaire en cuivre avec un diamètre de 40 mm et (ii) d'un porte échantillon (Fig. 2(B)).

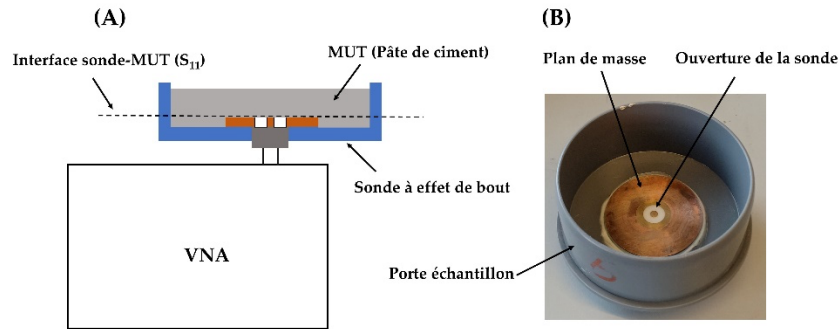


FIGURE 2. Banc de mesure expérimentale constitué d'une sonde à effet de bout reliée à un VNA

Le coefficient de réflexion mesuré à l'interface sonde-MUT dépend de la permittivité diélectrique de ce dernier. Une relation bilinéaire entre le $S_{11}(f)$ mesuré par le VNA et la permittivité relative $\varepsilon_r^*(f)$ du MUT est dérivée des travaux de (Marsland and Evans, 1987) :

$$\varepsilon_r^*(f) = \frac{c_1(f) \cdot S_{11}(f) - c_2(f)}{c_3(f) - S_{11}(f)} \quad 5$$

où $c_1(f)$, $c_2(f)$ et $c_3(f)$ sont des paramètres de calibration de la sonde, ils sont déterminés en réalisant des mesures sur des matériaux dont la permittivité est connue. Dans ce travail, la sonde a été

calibrée en faisant des mesures sur : un circuit ouvert (air), un court-circuit (laque d'argent) et de l'éthanol.

Afin d'étudier la répétabilité des mesures et la variabilité des caractéristiques des échantillons de pâte de ciment, nous avons choisi de mesurer simultanément les caractéristiques diélectriques de 6 échantillons issus d'un même mélange de pâte de ciment. Six bancs de mesures tels que représenté sur la Fig.2(A) ont été mis en place, dont 5 reliant une sonde à un NanoVNA de type SAA-2N V2 et un reliant une sonde à un VNA de type Anristu 2026C. Les mesures avec les NanoVNAs et le VNA ont été effectuées respectivement sur les bandes [100 MHz – 3 GHz] et [100 MHz – 6 GHz], compte tenu des limites des appareils. L'utilisation de deux types de VNA se justifie par le fait que les NanoVNAs ont un coût beaucoup plus faible que celui du VNA, permettant ainsi d'en utiliser plusieurs pour des mesures en simultanées.

IV.C. Suivi diélectrique de l'hydratation

Les mesures de spectroscopie diélectriques ont été réalisées sur 28 jours. Le banc de mesure a été placé dans une enceinte climatique à 23°C. Les échantillons de pâte de ciment ont été couverts avec du cellophane afin d'éviter le séchage.

La Fig. 3 montre l'évolution de la partie réelle de la permittivité diélectrique en fonction du temps $Re(\epsilon_r(t))$ pour plusieurs fréquences. Les lignes continues représentent la moyenne des mesures données par les différentes sondes. Les lignes discontinues représentent la moyenne $\pm$ l'écart type.

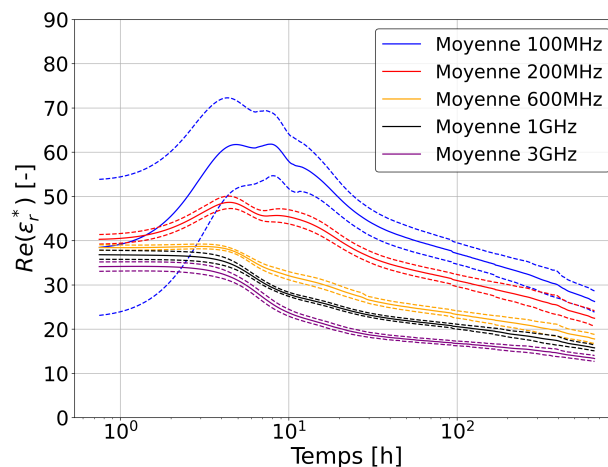


FIGURE 3. Evolution de la permittivité relative en fonction du temps.

Dans les basses fréquences (100 MHz et 200 MHz), la permittivité augmente pendant les 10 premières heures de mesure puis diminue. Ce phénomène serait dû à des effets de polarisation qui se produisent aux interfaces solide-liquide (polarisation interfaciale) lors de la formation des hydrates (Van Beek and Milhorst., 2000). Cependant, la polarisation d'interface intervient en dessous de 50 MHz (voir section IV.A). Etant donné que dans cette étude les mesures sont faites à partir de 100 MHz, la polarisation d'interface ne pourrait pas être la cause, des recherches

supplémentaires en exploitant la partie imaginaire seront menées afin de comprendre ce comportement.

Entre 600 MHz et 3 GHz la permittivité diminue au fur et à mesure que la quantité d'eau libre diminue suite à la réaction d'hydratation. A ces fréquences la mesure est sensible à la dynamique de l'eau libre dans les pores capillaires.

Les mesures diélectriques et calorimétriques de suivi de l'hydratation ont été réalisées dans une optique d'analyse mécanistique consistant à relier les variations de permittivité diélectrique à celle du degré d'hydratation de la pâte de ciment. Dans cette optique, il convient de n'utiliser que les mesures diélectriques faites au-delà de 600 MHz.

V. MODELISATION

Le modèle mécanistique, multi-échelle utilisé est basé sur les formalismes de Bruggeman et auto-cohérent généralisé. La loi de Bruggeman (Bruggeman, 1935) s'applique lorsque les phases d'un mélange ont des tailles équivalentes, aucune phase ne sert d'hôte aux autres, ce qui est représentatif de la pâte de ciment étudiée. L'estimation de $\varepsilon'_r(\alpha)$ à une fréquence fixée du MUT est faite via l'équation suivante :

$$\sum_{i=1}^N v_i \frac{\varepsilon'_{r,i} - \varepsilon'_{r,MUT}}{\varepsilon'_{r,i} + 2\varepsilon'_{r,MUT}} = 0 \quad 6$$

où N correspond au nombre de phases dans la pâte de ciment, i l'indice relatif à une phase donnée, v_i est sa fraction volumique et $\varepsilon'_{r,i}$ la partie réelle de sa permittivité intrinsèque. Dans la suite de ce travail, le modèle sera comparé aux résultats expérimentaux pour une fréquence de 800 MHz. Notons que le choix de la fréquence est arbitraire et que le but sera d'exploiter également les autres fréquences entre 600 MHz et 3 GHz.

V.A. Fractions volumiques

Deux méthodes ont été considérées pour le calcul des fractions volumiques des phases : (i) Le modèle de Königsberger (Königsberger et al., 2016) et (ii) une simulation thermodynamique donnant l'assemblage des phases avec cemGEMS (Kulik et al., 2021). Le modèle de Königsberger permet de calculer les fractions volumiques des phases en fonction du degré d'hydratation, tandis que cemGEMS est un outil de simulation thermodynamique de l'hydratation des matériaux cimentaires, qui permet d'obtenir également les fractions volumiques des phases mais de façon plus détaillée et en fonction de la composition du ciment.

La Fig. 4 montre l'évolution des fractions volumiques en fonction du degré d'hydratation avec le modèle de Königsberger (Fig. 4(A)) et la simulation cemGEMS (Fig. 4(B)).

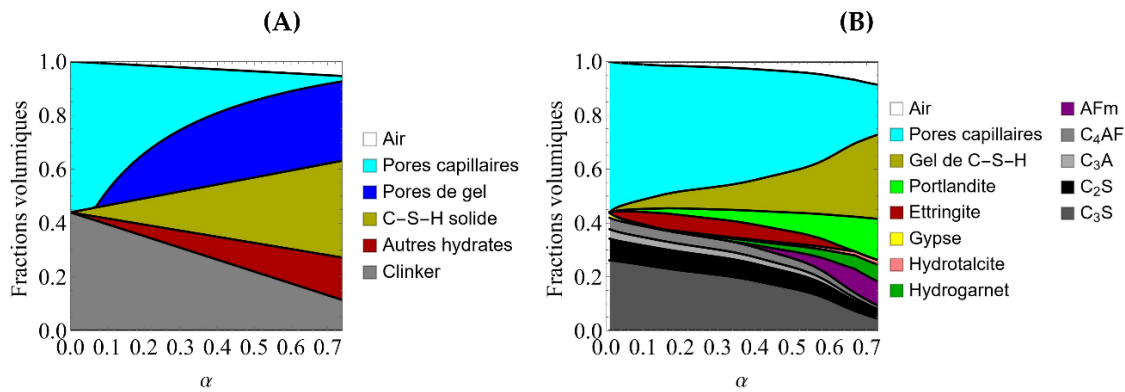


FIGURE 4. Fractions volumiques des phases en fonction de α : (A) Le Modèle de Königsberger (Königsberger et al., 2016) et (B) Simulations avec cemGEMS (Kulik et al., 2021)

V.B. Permittivité intrinsèque des phases

L’approche multi-échelle adoptée nécessite la connaissance des permittivités intrinsèques des phases constituantes. Pour cela, la permittivité complexe du gel de C-S-H a été estimée à 800 MHz. Des simulations en dynamique moléculaire (DM) ont permis de calculer la réponse diélectrique des particules solides de C-S-H ainsi que celle des porosités de gel (pour des tailles de pores de 2, 3, 4 et 10 nm). Ces résultats ont servi de données d’entrée dans un modèle d’homogénéisation qui a permis d’estimer la réponse diélectrique du gel de C-S-H.

La tableau 1 illustre les valeurs de permittivité des phases considérées pour une fréquence de 800 MHz (Guihard et al., 2020; Kaatze, 1989). Notons que les permittivités de l’ettringite, AFm, gypse, hydrocalcite et hydrogarnet ne sont connues et que la valeur de permittivité du clinker leur a été attribuée.

TABLEAU 1. Permittivité diélectrique des phases considérées pour une fréquence de 800 MHz

Phases	ϵ'_r	Références
Air	1	-
Eau capillaire	$80,04 \pm 0,2$	(Kaatze, 1989)
Eau de gel (pore 10 nm)	68,24	
C-S-H solide microporeux	5,30	
Gel de C-S-H (pore 10 nm)	10,47	
Portlandite	$7,40 \pm 0,3$	(Guihard et al., 2020)
Ciment (CEM 1 52.5 N CE CP2 NF)	$9 \pm 0,3$	(Guihard et al., 2020)
Autres phases	9	-

V.C. Confrontation mesures/modèles

La Fig. 5 illustre la comparaison à 800 MHz de $\varepsilon'_r(\alpha)$ expérimental de la pâte de ciment avec $\varepsilon'_r(\alpha)$ modélisé. Les valeurs expérimentales sont représentées en termes de moyenne et $\pm$ l'écart type. Deux configurations ont été testées afin de modéliser $\varepsilon'_r(\alpha)$ avec l'équation 6, la différence entre les 2 configurations est le calcul des fractions volumiques des phases. Dans la configuration 1, elles sont calculées en utilisant le modèle de Königsberger. Dans la configuration 2, elles sont calculées en utilisant cemGEMS. Les valeurs des permittivités intrinsèques des phases sont les mêmes pour les 2 configurations.

On constate que les 2 configurations permettent de prédire la valeur de ε'_r pour une valeur de α proche de 0 (mélange ne contenant que du clinker et de l'eau). Cela montre que la permittivité relative du clinker est bien connue. De plus, les deux configurations sont qualitativement satisfaisant avec une diminution de la permittivité en fonction de α , mais calculer les fractions volumiques avec cemGEMS permet de mieux capturer l'allure des données expérimentales. Quantitativement les configurations en utilisant Königsberger et cemGEMS présentent des erreurs relatives par rapport à la moyenne expérimentale de 8,6 % et 2,3 % respectivement. La configuration qui prend en compte la composition du ciment en utilisant cemGEMS donne donc de meilleurs résultats.

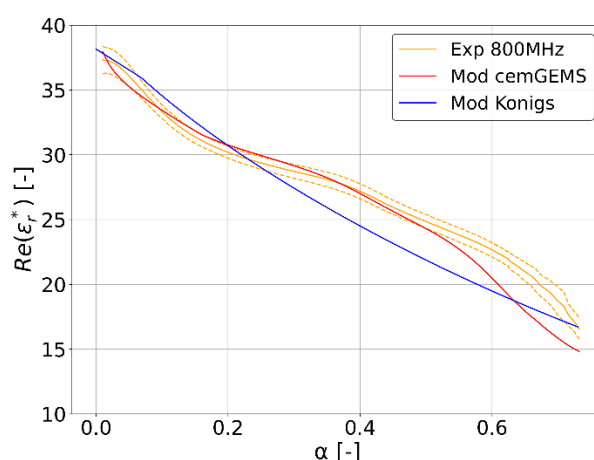


FIGURE 5. Comparaison à 800 MHz entre $\varepsilon'_r(\alpha)$ expérimental de la pâte de ciment et $\varepsilon'_r(\alpha)$ modélisé

IV. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette étude propose une approche multidisciplinaire permettant la caractérisation diélectrique de la matrice cimentaire lors de l'hydratation et de relier sa permittivité à son degré d'hydratation. Cette approche est basée sur des travaux expérimentaux et de modélisation. Un suivi de l'hydratation d'une pâte de ciment avec un rapport $E/C = 0,4$ a été réalisé pendant 28 jours. Pour cela des mesures diélectriques et de calorimétrie ont été lancés en parallèle. Cela permet de tracer la réponse diélectrique en fonction du degré d'hydratation $\varepsilon'_r(\alpha)$ pour différentes fréquences.

En suivant l'évolution de la réponse diélectrique en fonction du temps pour plusieurs fréquences, on remarque qu'à 100 MHz et 200 MHz la permittivité augmente puis diminue. Les mécanismes à

L'origine de ce phénomène ont été proposées dans la littérature mais n'ont toujours pas été validés. A partir de partir de 600 MHz, la réponse diélectrique est sensible à la polarisation de l'eau libre. Une diminution de $\varepsilon'_r(t)$ est alors observée suite à la diminution de la quantité d'eau libre qui réagit avec le ciment. La même tendance est observée pour $\varepsilon'_r(\alpha)$ à ces fréquences, étant donné que plus α augmente, moins il y a d'eau libre dans la matrice cimentaire.

Le but étant d'obtenir α à partir des mesures diélectriques, un schéma multi-échelle tenant compte de la dynamique de l'eau à l'échelle moléculaire est adopté afin de modéliser $\varepsilon'_r(\alpha)$. Ce dernier nécessite les fractions volumiques des constituants et leur permittivités intrinsèques comme données d'entrées. La permittivité du C-S-H est estimée par simulation en dynamique moléculaire, alors que les permittivités des autres phases sont extraites de la littérature. Les fractions volumiques sont calculées avec 2 méthodes, le modèle de Konigsberger et les simulations cemGEMS. Le modèle en utilisant cemGEMS capture l'allure des données expérimentales à 800 MHz d'une manière satisfaisante et avec une erreur relative de 2,3 %, montrant que α peut être obtenu uniquement à partir de mesures diélectriques. De plus, la prise en compte de la composition (via le modèle thermodynamique de cemGEMS) et les permittivités intrinsèques déterminés à une échelle pertinente (par simulation en DM) permettent de réduire l'empirisme dans l'interprétation des résultats diélectriques et donc de prédire l'évolution du degré d'hydratation pour différentes compositions cimentaires.

En termes de perspectives, il est envisagé de : (i) optimiser quantitativement le modèle pour les fréquences de 600 MHz à 3 GHz, (ii) faire des mesures en dessous de 50 MHz et comprendre les phénomènes de polarisation interfacial qui s'y produisent, ce qui pourrait permettre d'obtenir des corrélation avec la microstructure (porosité, perméabilité), (iii) exploitation de la partie imaginaire et enfin (iv) investiguer l'effet thermo-diélectrique dans les matériaux cimentaires qui pourrait être la cause de l'augmentation/diminution de la permittivité à basses fréquences.

REFERENCES

Berg, A., Niklasson, G.A., Brantervik, K., Hedberg, B., Nilsson, L.O., 1992. Dielectric properties of cement mortar as a function of water content. *J. Appl. Phys.* 71, 5897–5903. <https://doi.org/10.1063/1.350488>

Bruggeman, D. a. G., 1935. Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen. *Ann. Phys.* 416, 636–664. <https://doi.org/10.1002/andp.19354160705>

Chen, L. (Ed.), 2004. *Microwave electronics: measurement and materials characterisation*. John Wiley, Chichester.

De Schutter, G., 2002. Influence of hydration reaction on engineering properties of hardening concrete. *Mater. Struct.* 35, 447–452. <https://doi.org/10.1007/BF02483131>

Gregory, A.P., Clarke, R.N., 2005. Traceable measurements of the static permittivity of dielectric reference liquids over the temperature range 5–50 °C. *Meas. Sci. Technol.* 16, 1506. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/16/7/013>

Guihard, V., Patapy, C., Sanahuja, J., Balayssac, J.-P., Taillade, F., Steck, B., 2020. Effective medium theories in electromagnetism for the prediction of water content in cement pastes. *Int. J. Eng. Sci.* 150, 103273. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2020.103273>

Kaatze, U., 1989. Complex permittivity of water as a function of frequency and temperature. *J. Chem. Eng. Data* 34, 371–374. <https://doi.org/10.1021/je00058a001>

Königsberger, M., Hellmich, C., Pichler, B., 2016. Densification of C-S-H is mainly driven by available precipitation space, as quantified through an analytical cement hydration model based on NMR data. *Cem. Concr. Res.* 88, 170–183. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.04.006>

Kulik, D.A., Winnefeld, F., Kulik, A., Miron, G.D., Lothenbach, B., 2021. CemGEMS – an easy-to-use web application for thermodynamic modelling of cementitious materials. *RILEM Tech. Lett.* 6, 36–52. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2021.140>

Lacarrière, L., Knoppik, A., Leal Da Silva, W.R., Honorio, T., Šmilauer, V., Asamoto, S., Fairbairn, E.M.R., 2019. Hydration and Heat Development, in: Fairbairn, E.M.R., Azenha, M. (Eds.), *RILEM State-of-the-Art Reports*. Springer International Publishing, Cham, pp. 13–46. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76617-1_2

Marsland, T.P., Evans, S., 1987. Dielectric measurements with an open-ended coaxial probe. *IEE Proc. H Microw. Antennas Propag.* 134, 341–349. <https://doi.org/10.1049/ip-h-2.1987.0068>

Metaxas, A.C., Meredith, R.J., 1993. *Industrial microwave heating*, IEEE Press power systems engineering series. P. Peregrinus on behalf of the Institution of Electrical Engineers, London, UK.

Olivier, K., 2016. Étude expérimentale et modélisation de l’auto-cicatrisation des matériaux cimentaires avec additions minérales (These de doctorat). Université Paris-Saclay (ComUE).

Parrott, L.J., Geiker, M., Gutteridge, W.A., Killoh, D., 1990. Monitoring Portland cement hydration: Comparison of methods. *Cem. Concr. Res.* 20, 919–926. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(90\)90054-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(90)90054-2)

Quan, B., Liang, X., Ji, G., Cheng, Y., Liu, W., Ma, J., Zhang, Y., Li, D., Xu, G., 2017. Dielectric polarization in electromagnetic wave absorption: Review and perspective. *J. Alloys Compd.* 728, 1065–1075. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.09.082>

Schwing, M., 2016. Mechanical, hydraulic, and dielectric characterisation of fine-grained soils during densification (PhD Thesis). The University of Queensland. <https://doi.org/10.14264/uql.2016.94>

Van Beek, A., Milhorst, M.A., 2000. Dielectric measurements to characterize the microstructural changes of young concrete. *HERON Vol 44* 1 2000.

Van Breugel, K., 1997. *Simulation of hydration and formation of structure in hardening cement-based materials*. Delft University Press.

Waller, V., 1999. Relations entre composition des betons, exothermie en cours de prise et resistance en compression (phdthesis). Ecole des Ponts.