

Modélisation par la MED des transferts couplés hygrothermiques suite à un processus de séchage

A. Ammar^{1,2}, W. Leclerc¹, A. Jbeli², H. Haddad¹, M. Guessasma¹, N. Haddar²

¹ LTI, UR-UPJV 3899, UPJV, F-02100 Saint-Quentin, [ahmed.ammar, willy.leclerc, hamza.haddad, mohamed.guessasma]@u-picardie.fr

² LGME, LR11ES46, Université de Sfax, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, [ahmed.ammar, amira.djebali, nader.haddar]@enis.tn

Résumé — Cette contribution traite de la modélisation par la Méthode des Éléments Discrets des transferts couplés de masse et de chaleur. L'approche discrète mise en place est appliquée dans le cadre d'un processus de séchage d'un matériau homogène poreux. À des fins de validation, des comparaisons avec la Méthode des Éléments Finis (MEF) sont réalisées en termes de masse d'eau, de concentration d'eau et de gradient de concentration.

Mots clés — MED, transfert de masse, transfert de chaleur, milieu poreux, séchage.

1 Introduction générale

Le recours à la modélisation numérique pour prédire le vieillissement hygrothermique de matériaux est de plus en plus généralisé dans de nombreux secteurs industriels. Ce type d'approche est en effet privilégié en raison du coût et du temps requis par les études expérimentales, notamment dans le domaine des sols [1], des matériaux céramiques [2] et des matériaux du bâtiment [3]. Si les équations décrivant les transferts couplés de chaleur et de masse dans les milieux poreux sont connues depuis longtemps, leur application au cas concret des matériaux poreux ne s'avère pas triviale. En outre, dans la plupart des cas, le processus de vieillissement hygrothermique s'accompagne soit d'un rétrécissement du matériau dans le cas du séchage ou bien d'un gonflement dans le cas de l'absorption d'eau. Dans les deux cas, l'apparition des gradients de concentration d'eau engendrent des contraintes internes pouvant mener à la fissuration du matériau. Par ailleurs, le comportement macroscopique des matériaux poreux est déterminé par sa microstructure. Il est donc très important de comprendre la relation entre la microstructure et le comportement macroscopique par une étude multi-échelle des propriétés de ces matériaux aux échelles micro, méso et macroscopique. La MED se présente alors comme une approche pertinente pour traiter ce type des problèmes. L'approche discrète a en effet montré son potentiel à modéliser des problèmes à la fois multi-échelles et multi-physiques [4] dans lesquels des phénomènes de discontinuité interviennent à des échelles fines du matériau. Il s'agit par ailleurs d'une méthode prometteuse pour simuler des phénomènes complexes d'endommagement d'origine multi-physique [5].

Dans la présente contribution, notre objectif est de montrer la pertinence de l'utilisation de la MED pour simuler les transferts couplés de chaleur et d'humidité. Dans ce but, nous décrivons dans un premier temps le concept de Milieu Continu Équivalent (MCE) [6] permettant de modéliser un milieu continu par le biais d'un système particulière composé de sphères en contact ponctuel. Dans un second temps, nous présentons la méthodologie de modélisation des transferts thermique et hydrique par la MED, puis nous introduisons le modèle de couplage hygrothermique mis en œuvre dans cette étude. Dans un dernier temps, la modélisation des transferts hygrothermiques dans un matériau homogène poreux est discutée. L'étude est focalisée sur un essai de séchage d'aluminate de magnésium. Des comparaisons avec la MEF en termes d'évolution de la masse d'eau, de concentration et de gradient de concentration sont présentées.

2 Milieu Continu Équivalent - MCE

Nous considérons une approche numérique basée sur la MED pour modéliser les transferts hygrothermiques dans un domaine 3D continu et homogène. Ce dernier est constitué d'un empilement granulaire polydisperse lequel peut être considéré comme un MCE si la génération de l'empilement granulaire véri-

fié certaines hypothèses. Le nombre de particules doit d'abord être suffisamment important afin d'assurer que le système est bien représentatif d'un milieu continu. Le nombre de coordination, la fraction volumique, la polydispersité et l'orientation des angles de contact doivent aussi être contrôlés afin de vérifier que l'empilement est bien aléatoire et garanti au matériau un comportement isotrope. À titre d'information, une fraction volumique ϕ proche de 64% et un nombre de coordination minimum Z de 6,2 sont typiques d'un système de particules sphériques en 3D. Dans le cadre de ce travail, nous avons néanmoins choisi un nombre de coordination $Z = 8,2$ afin de limiter les effets indésirables liés à une faible coordination locale. Ceci correspond à la génération d'environ 24% de nouveaux contacts et permet donc d'obtenir un réseau de contacts plus dense. Une légère polydispersité basée sur un modèle gaussien avec un coefficient de variation de 0,3 est choisi afin d'éviter d'éventuels effets directionnels.

3 Modélisation du transfert thermique

Le phénomène de transfert de chaleur par conduction est typiquement modélisé par la loi de Fourier [7] :

$$\frac{dT}{dt} = D_t \nabla^2 T \quad (1)$$

où T (K) est la température absolue, t (s) est le temps et D_t ($m^2.s^{-1}$) est la diffusivité thermique du matériau. L'approche discrète mise en œuvre pour modéliser le transfert thermique dans un matériau homogène utilise le concept d'Élément Représentatif (ER) associé à chaque particule du système particulaire. Dans un tel concept, il est nécessaire de définir les caractéristiques effectives de chaque ER telles que son volume et sa surface de transmission de chaleur. À noter que la géométrie de l'ER est sans importance dans la modélisation. Le volume de chaque ER est défini afin de vérifier la conservation de masse de telle sorte que la somme des volumes de tous les ER soit égale au volume du matériau homogène étudié. Pour satisfaire cette condition, la masse volumique de chaque Élément Discret (ED) est ajustée à la masse volumique de l'ER correspondant au moyen de la fraction volumique ϕ du système particulaire comme suit :

$$\mu_d = \frac{\mu_c}{\phi} \quad (2)$$

où μ_d ($Kg.m^{-3}$) et μ_c ($Kg.m^{-3}$) sont respectivement les masses volumiques du système particulaire et du matériau homogène. Le flux de chaleur $Q_{m,n}$ transmis par la surface de transmission $S_{m,n}^t$ entre deux ER (Figure 1) associés respectivement aux particules m et n en contact, est donné par :

$$Q_{m,n} = H_c^{m,n} (T_n - T_m) \quad (3)$$

où T_m , T_n sont respectivement les températures des ED m , n et $H_c^{m,n}$ est le coefficient de conductivité thermique :

$$H_c^{m,n} = \frac{\lambda S_{m,n}^t}{d_{m,n}} \quad (4)$$

avec λ la conductivité thermique du matériau et $d_{m,n}$ la distance centre à centre des ED m et n . Ainsi, l'équation de transfert de chaleur pour chaque ED est donnée par :

$$C_m^d \frac{dT_m}{dt} = Q_T + \sum_{n=1}^{n_m} Q_{m,n} \quad (5)$$

avec

$$C_m^d = \mu_c C_p V_m / \phi \quad (6)$$

où Q_T représente le flux thermique externe imposé à la particule m , n_m est le nombre de particules en contact avec la particule m , V_m est le volume de la particule m et C_p représente la chaleur spécifique du matériau représentatif. La discrétisation temporelle de l'équation 5 est réalisée par un schéma d'intégration explicite donné par l'équation suivante :

$$T_m^{t+\Delta t} = T_m^t + \underbrace{\frac{\phi \Delta t}{\mu_c C_p V_m} [Q_T + \sum_{n=1}^{n_m} \frac{\lambda S_{m,n}^t}{d_{m,n}} (T_n^t - T_m^t)]}_{Q_T^{tot}} \quad (7)$$

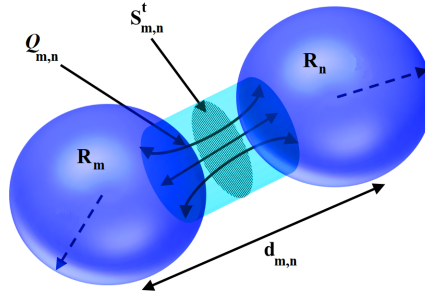


FIGURE 1 – Modèle de transfert thermique par conduction à l'échelle du contact interparticulaire

où Δt est le pas de temps. Afin de vérifier le critère de stabilité numérique lors de la résolution du problème thermique, le pas de temps critique est déterminé selon l'équation suivante [8] :

$$\Delta t_{crit}^{thermique} = \frac{2(d_{m,n}^{min})^2}{3D_t n_m C_t} \quad (8)$$

avec

$$D_t = \frac{\phi \lambda}{\mu_c C_p} \quad (9)$$

où $d_{m,n}^{min}$ est la distance minimale centre à centre des ED m et n , et C_t est un coefficient adimensionnel permettant d'ajuster la surface de transmission entre les deux ER en contact [8].

4 Modélisation du transfert hydrique

Le transport d'eau interne en milieu poreux est décrit par la loi de Fick [9], dans laquelle le flux d'eau est proportionnel au gradient de concentration d'eau :

$$\frac{dC}{dt} = D_w \nabla^2 C \quad (10)$$

où C ($mol.m^{-3}$) est la concentration de l'eau et D_w ($m^2.s^{-1}$) est le coefficient de diffusion massique. Par analogie au schéma d'intégration utilisé pour le transfert thermique, la discrétisation temporelle dans le cas du transfert hydrique est la suivante :

$$C_m^{t+\Delta t} = C_m^t + \frac{\phi \Delta t}{V_m} \underbrace{\left[Q_C + \sum_{n=1}^{n_m} \frac{S_{m,n}^t D_w}{d_{m,n}} (C_n^t - C_m^t) \right]}_{Q_C^{tot}} \quad (11)$$

où Δt est le pas de temps, C_m^t et $C_m^{t+\Delta t}$ sont respectivement les concentrations associées à la particule m aux instants t et $t + \Delta t$, ϕ est la fraction volumique du système particulaire, V_m est le volume de la particule m , Q_C décrit le flux de masse externe appliqué à m . Ce schéma explicite est contrôlé par un pas de temps critique afin d'assurer la stabilité de la résolution par la MED.

$$\Delta t_{crit}^{massique} = \frac{2(d_{m,n}^{min})^2}{3\phi D_w n_m C_t} \quad (12)$$

5 Modèle de couplage hygrothermique

Le vieillissement hygrothermique nécessite un transfert couplé de matière (vapeur d'eau) et de chaleur afin de favoriser le mécanisme d'absorption d'eau nécessaire au sein du matériau. Ce couplage assure l'évolution de la pression partielle de vapeur d'eau à la surface d'échange du matériau avec la température. En effet, les échanges entre la surface du matériau et l'air s'effectuent par diffusion, à travers la couche limite laminaire équivalente dans l'air située à la surface du matériau. Ces échanges par diffusion sont pris en compte via deux coefficients de transferts convectifs h ($W.m^{-2}.K^{-1}$) pour la chaleur,

et k ($m.s^{-1}$) pour la matière. Le débit de transfert de chaleur vers la surface dépend de la différence de température, de la surface d'échange et du coefficient de convection généralement forcée (dépend principalement de la vitesse d'air). Suite à un contact de la surface du matériau avec l'air, une couche limite se forme, laquelle est d'autant plus mince que la vitesse du flux d'air est importante. Dans cette couche on a deux flux simultanés de chaleur et de matière, d'une part le flux thermique de surface Q_T ($W.m^{-2}$) qui s'exprime comme suit :

$$Q_T = h(T_{ext} - T_s) + D_w M_w L_w \nabla C \quad (13)$$

où M_w ($kg.mol^{-1}$) est la masse molaire de l'eau et L_w ($J.kg^{-1}$) est la chaleur latente de vaporisation d'eau, et d'autre part le flux de transfert hydrique Q_C ($mol.s^{-1}.m^{-2}$) dont l'expression est la suivante :

$$Q_C = k(C_{ext} - C_{lim}) \quad (14)$$

où C_{ext} ($mol.m^{-3}$) et C_{lim} ($mol.m^{-3}$) sont respectivement la concentration d'eau dans l'air et dans la couche limite. Ces dernières sont déterminées à l'aide de la loi des gaz parfaits :

$$C_{lim} = a_w \frac{P_0(T_s)}{RT_s} \quad (15)$$

$$C_{ext} = H_R \frac{P_0(T_{ext})}{RT_{ext}} \quad (16)$$

où P_0 (Pa) est la pression de vapeur d'eau de saturation des molécules d'eau totalement libres à la température de la surface de l'échantillon T_s estimée par la formule de Rankine, R est la constante des gaz parfaits et H_R est l'humidité relative du milieu. a_w est l'activité de l'eau laquelle se définit au niveau de la couche limite Λ comme l'humidité relative au sein du matériau.

$$a_w = \frac{P_\Lambda}{P_0} \quad (17)$$

avec P_Λ (Pa) la pression de vapeur d'eau dans la couche limite Λ en équilibre avec la surface du matériau humide. Concernant l'activité de l'eau a_w , une étude menée dans [10] a montré que cette grandeur peut être reliée à la teneur en eau X à travers les isothermes de sorption. L'identification des paramètres de transfert d'eau est toutefois difficile à réaliser lorsque les deux procédés de transfert de chaleur et de masse doivent simultanément être pris en compte. Afin de relier les paramètres k et h , on introduit un terme de couplage entre les coefficients des transferts de masse et de chaleur, appelé le nombre de Lewis (Le_f) dont l'expression est la suivante :

$$Le_f = \frac{h}{k C_{pa} \mu_a} \quad (18)$$

où C_{pa} ($J.kg^{-1}.K^{-1}$) est la capacité thermique de l'air et μ_a ($kg.m^{-3}$) sa masse volumique. Un nombre de Lewis égal à 1 indique que la couche limite thermique et le transfert de masse par diffusion se développent d'une façon similaire et que les couches limites de température et de concentration se confondent presque.

6 Étude du séchage d'aluminate de magnésium

6.1 Mise en place du modèle

Dans la partie précédente, nous avons présenté une démarche permettant la résolution dans le domaine transitoire d'un problème hygrothermique pour un matériau homogène soumis à des gradients thermique et hydrique. Comme cadre applicatif, nous considérons maintenant les travaux expérimentaux réalisés sur une brique de spinelle d'aluminate de magnésium par Lallement et al. [10]. Le problème proposé est celui du séchage convectif d'un échantillon composé de 10^5 ED ayant une forme cubique de côté $L = 23,45$ mm. L'échantillon est déposé dans un four à un taux d'humidité de 75% où toutes les faces sont exposées au séchage. À l'état initial, l'échantillon présente une concentration en eau de 14200 mol.m^{-3} . La température initiale de l'échantillon et du four est fixée à 20°C . Une élévation de température du four est ensuite appliquée de 20 à 80°C selon une rampe linéaire de 10°C/h , puis maintenue constante à 80°C .

pour le reste de l'essai. Il faut noter que le milieu à modéliser est un milieu poreux comportant les trois états de la matière (solide, liquide et gazeux). Il faut donc tenir compte de ces trois états à l'échelle du volume représentatif Γ_m de l'ER associé à chaque ED m . Par conséquent, un travail d'identification des paramètres, basé sur un certain nombre d'hypothèses, a été préalablement établi par Alhajj Hassan [4] afin de déterminer les propriétés de chaque ER et de son volume Γ_m . Selon cette étude, la masse volumique μ_m^t d'un ED m à un instant t est donnée par l'expression suivante :

$$\mu_m^t \approx \mu_s(1-p) + C_m^t M_w \quad (19)$$

où μ_s est la masse volumique de la phase solide, p est la porosité et C_m^t est la concentration d'eau associée à chaque ED m à un instant t . D'autre part, la conductivité thermique effective λ_m^t est exprimée par :

$$\lambda_m^t \approx \lambda_s(1-p) \quad (20)$$

où λ_s est la conductivité thermique de la phase solide de l'échantillon. Concernant la capacité thermique C_{pm}^t de l'ED m , elle est définie par :

$$C_{pm}^t \approx C_{ps} \frac{\mu_s(1-p)}{\mu_m^t} + C_{pw} \frac{C_m^t M_w}{\mu_m^t} \quad (21)$$

où C_{ps} et C_{pw} sont respectivement les capacités thermiques des phases solide et liquide. Enfin, la teneur en eau à un instant t , définie comme étant la quantité d'eau liquide contenue dans un échantillon de matière, est quantifiée comme suit :

$$X(t) = \frac{m_{tot}(t) - m_{sec}}{m_{sec}} \quad (22)$$

où $m_{tot}(t)$ désigne la masse totale de l'échantillon à l'instant t et m_{sec} représente la masse de l'échantillon sec. À l'échelle de l'ED, cette quantité est obtenue par la formule suivante :

$$X_m^t = \frac{C_m^t M_w}{(1-p)\mu_s} \quad (23)$$

Compte tenu de l'activité de l'eau a_w , nous avons choisi d'utiliser la formule simplifiée d'Oswin [11].

$$a_w = \left[1 + \left(\frac{A}{X} \right)^B \right]^{-1} \quad (24)$$

où A et B sont deux paramètres d'ajustement dont les valeurs doivent être identifiées expérimentalement. Dans les travaux de Lallement [10], A et B sont respectivement fixés à 0,008 et 0,48 pour l'échantillon d'aluminate de magnésium. Le reste des valeurs des paramètres utilisés pour les simulations sont aussi données par Lallement [10].

6.2 Évaluation des propriétés physiques d'aluminate de magnésium à l'issue de processus de séchage

Afin d'assurer la continuité du milieu à l'échelle microscopique, les propriétés et les paramètres locaux dans le cas d'une approche discrète doivent être corrélés aux propriétés macroscopiques. Pour satisfaire cette condition, l'estimation de la surface de transmission de la chaleur entre deux particules en contact est obtenue par calibration [8]. Dans notre cas, la conductivité thermique ou bien la diffusivité massique du milieu équivalent dépend de la surface de transmission $S_{m,n}^t$ entre deux ER. Nous avons choisi de corréliser $S_{m,n}^t$ à un coefficient C_t , sans aucun effet dimensionnel, et une surface $S_{m,n} = \pi R_{moy}^2$, où R_{moy} est le rayon moyen des particules en contact, de sorte que l'expression de $S_{m,n}^t$ soit :

$$S_{m,n}^t = C_t S_{m,n} \quad (25)$$

À titre d'information, un coefficient C_t de 0,75 est considéré dans nos calculs. Dans un premier temps, nous avons évalué la variation de la masse d'eau dans l'échantillon au cours du temps via la formule suivante :

$$m_w(t) = M_w \sum_{m=1}^{n_m} C_m^t \Gamma_m \quad (26)$$

où n_m est le nombre total de particules, C_m^t décrit la concentration d'eau associée à la particule m à l'instant t et Γ_m représente le volume associé à la particule m . À des fins de validation, une comparaison est effectuée avec des résultats obtenus par la MEF et les données expérimentales issues de l'étude réalisée par Lallement et al. [10]. À titre indicatif, les simulations EF ont été réalisées à l'aide d'un maillage

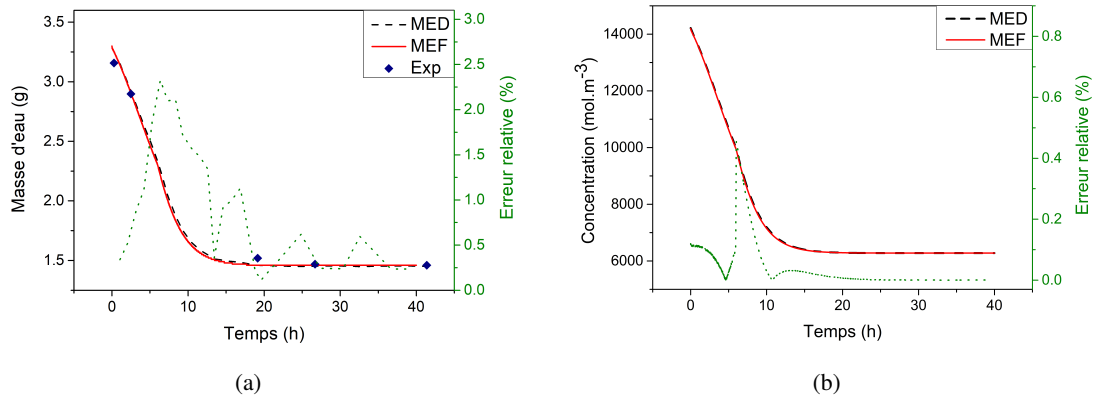


FIGURE 2 – Variation de (a) la masse d'eau dans l'échantillon et (b) la concentration d'eau au centre de l'échantillon en fonction du temps de séchage

structuré constitué de 32593 éléments tétraédrique. La Figure 2(a) montre que la masse d'eau diminue dans les 10 premières heures puis se stabilise à 1,46 g pour le reste de l'essai. Les prédictions données par la MED sont très proches de celles obtenues par la MEF avec des erreurs relatives inférieures à 2,5%, ce qui prouve que le modèle par éléments discrets mis au point est capable de décrire le transfert de masse dans un milieu continu tout aussi bien qu'une modélisation éléments finis. Ces résultats montrent aussi une bonne concordance entre les prédictions données par la MED et les résultats expérimentaux, ce qui valide le modèle discret de couplage. De plus, la Figure 2(b) illustre l'évolution de la concentration d'eau au centre de l'échantillon par la MED et la MEF. Nous constatons une bonne concordance entre les deux méthodes numériques avec des erreurs relatives inférieures à 0,5%. En effet, la concentration d'eau obtenue avec les deux approches diminue significativement en passant du 14200 mol.m^{-3} à 6277 mol.m^{-3} ce qui confirme le mécanisme de diffusion de l'eau à l'extérieur de l'échantillon lors d'un processus de séchage. La Figure 3 illustre les champs de concentration d'eau obtenus par la MED et la MEF à des instants différents (3h, 6h et 9h). À noter que les résultats présentés dans cette section sont pris dans le plan de coupe YZ avec $X = 0,5L$. Ces résultats obtenus par la MED sont en bon accord avec ceux donnés par la MEF ce qui confirme le potentiel de la MED à estimer le champ de concentration dans un milieu homogène continu. Dans un second temps, nous nous sommes intéressés à l'étude de l'évolution

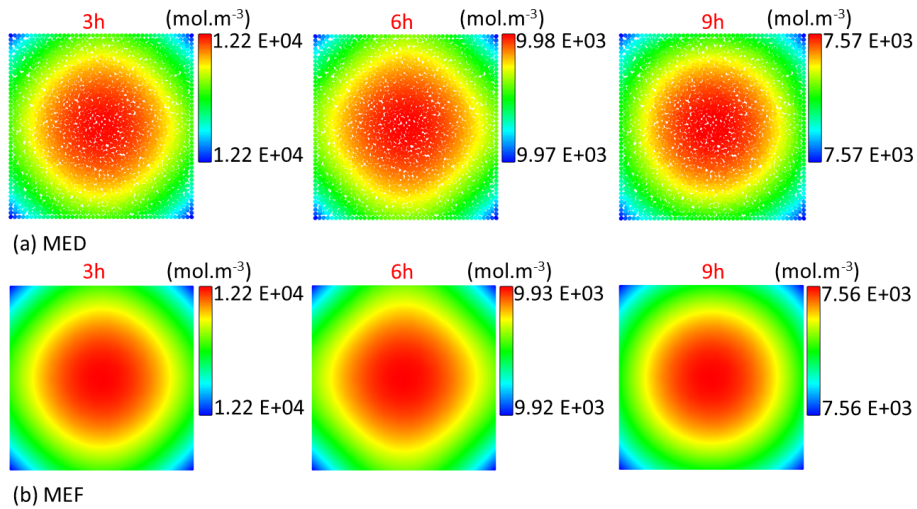


FIGURE 3 – Champs de concentration dans l'échantillon à différents instants par (a) la MED et (b) la MEF

du gradient de concentration d'eau au sein de l'échantillon au cours du temps. Ce paramètre permet de mieux localiser les endroits les plus sollicités sous l'effet des concentrations de contraintes. Il est par conséquent primordial d'éviter ces gradients afin de réduire les risques d'endommagement du matériau. L'évaluation de ces gradients s'effectue à l'échelle de la particule dans la direction i via l'expression suivante :

$$\nabla C_m^i = \frac{\phi}{2V_m} \sum_{n \in Z_m} \underbrace{\left[\frac{C_n - C_m}{d_{m,n}} \right]}_{\nabla C_{m,n}} S_{m,n}^t d_{m,n} e_{m,n}^i \quad (27)$$

où V_m est le volume de la particule m , Z_m est l'ensemble des particules liées à la particule m et $e_{m,n}^i$ est la composante du vecteur normal inter-particulaire correspondant à la direction i . La modélisation par la MED induit une certaine dispersité du gradient de concentration d'eau due au caractère aléatoire des contacts inter-particulaires associés à chaque ED. Comme solution, nous avons opté pour une méthode, nommée Halo, récemment développée par Moukadiri et al. [5] pour contrôler ces fluctuations locales. Dans cette approche, une échelle mésoscopique est introduite de sorte qu'un Halo de forme sphérique soit associé à chaque ED avec un rayon R_H de taille contrôlée et un centre identique à celui de l'ED considéré (Figure 4(a)). Par conséquent, le gradient de concentration d'eau d'une particule m est évalué à l'échelle du volume du Halo Γ_H en tenant compte des contributions des particules au voisinage de m . L'expression du gradient de concentration d'eau appliqué à m est alors donnée par :

$$\nabla C_m^i = \frac{1}{\Gamma_H} \sum_{r \in \Gamma_H} V_r \nabla C_r \quad (28)$$

où r représente l'ensemble des particules au voisinage de m et V_r représente le volume de chaque ED au voisinage de m . Une étude de sensibilité par rapport à la taille optimale du Halo en fonction de la densité de particules est présentée dans les travaux de thèse d'Alhajj Hassan [4]. Pour information, la taille du Halo, décrite par le rapport R_H/R_{ED} avec R_{ED} le rayon de la particule auquel le Halo est associé, est fixée à 10 dans nos simulations par la MED. La Figure 4(b) illustre l'évolution de la contribution

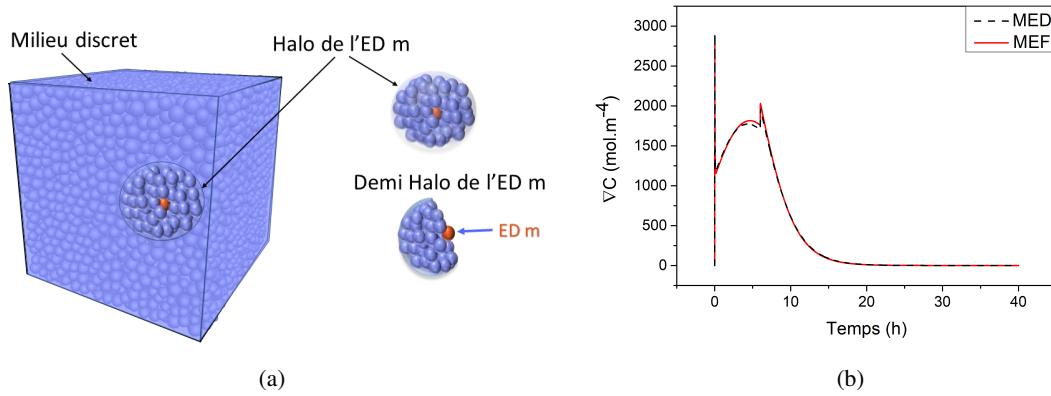


FIGURE 4 – (a) Introduction d'une échelle mésoscopique par l'approche Halo [5] (b) Évolution de la moyenne du gradient de concentration d'eau dans les 8 extrémités de l'échantillon cubique en fonction du temps de séchage

en moyenne du gradient de concentration d'eau dans les 8 extrémités de l'échantillon cubique par la MED et la MEF. Qualitativement, le profil de gradient présente un saut remarquable après 6h de séchage avant de diminuer jusqu'à zéro à la fin du séchage. Quantitativement, nous constatons que le gradient de concentration augmente et tend vers une valeur maximale de 2000 mol.m^{-4} dans les premières heures du séchage où l'eau migre principalement vers les extrémités de l'échantillon lors du processus de séchage. Nous remarquons aussi une bonne concordance entre les résultats MED et MEF. Les champs de gradient de concentration sont représentés sur la Figure 5 aux mêmes instants que pour les champs de concentration (3h, 6h et 9h) dans le plan de coupe YZ avec $X = 0,5L$. Qualitativement, il y a une bonne concordance entre les résultats donnés par la MED et ceux obtenus avec la MEF avec l'apparition de gradients importants aux extrémités de l'échantillon. Quantitativement, les résultats montrent que l'intensité

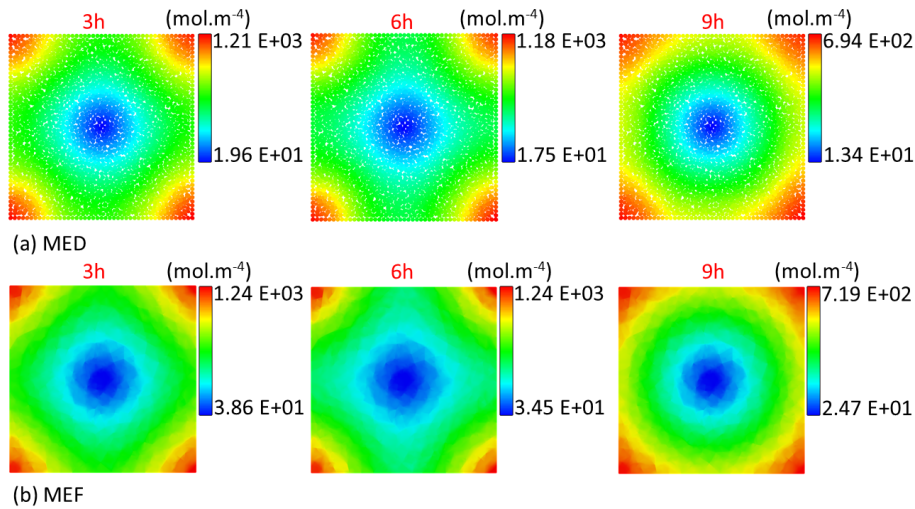


FIGURE 5 – Champs de gradient de concentration d’eau dans l’échantillon à différents instants par (a) la MED et (b) la MEF

du gradient de concentration d’eau diminue au cours du temps, ce qui confirme la cinétique de séchage et par conséquent la diffusion de l’eau de l’intérieur de l’échantillon vers l’extérieur.

6.3 Conclusion

Les travaux réalisés montrent le potentiel d’une approche discrète à modéliser les phénomènes hygrothermiques lors d’un processus de séchage. Nous travaillons actuellement sur la mise en place d’un modèle de couplage hygro-thermo-mécanique pour prendre en compte l’endommagement d’origine hygrothermique des matériaux poreux.

Références

- [1] A. Aldaood, M. Bouasker, M. Al-Mukhtar. Impact of wetting–drying cycles on the microstructure and mechanical properties of lime-stabilized gypseous soils. *Engineering Geology*, 174 :11–21, 2014.
- [2] O. Siham. *Drying behaviour of ceramic green bodies : experimental characterization and numerical modeling*. Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2019.
- [3] G. Patrick, P. Chauvelon, T. Colinart, P. Le Bideau, A. Zaknounge, N. Jameladine. Experimental and numerical studies of the drying of hemp concrete. In *17th International Drying Symposium*, 2010.
- [4] A. Alhajj Hassan. *Modélisation par la MED des couplages thermo-élastique et thermo-hydrrique, et de l’endommagement induit par effet thermique dans les milieux continus*. Thèse de doctorat, Amiens, 2020.
- [5] D. Moukadiri, W. Leclerc, K. Khellil, Z. Aboura, M. Guessasma, E. Bellenger, F. Druessne. Halo approach to evaluate the stress distribution in 3D discrete element method simulation : Validation and application to flax/bio based epoxy composite. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 27(6) :065005, 2019.
- [6] W. Leclerc. Discrete element method to simulate the elastic behavior of 3D heterogeneous continuous media. *International Journal of Solids and Structures*, 121 :86–102, 2017.
- [7] M.A. Haro Rodriguez. *Modélisation des phénomènes thermiques dans les procédés de fabrication par addition de matière de type SLM*. Thèse de doctorat, Université de Liège, Liège, Belgique, 2016.
- [8] H. Haddad, W. Leclerc, G.A. Hassan, A. Ammar, C. Pélegris, M. Guessasma, E. Bellenger. Numerical investigation of heat conduction in heterogeneous media with a discrete element method approach. *International Journal of Thermal Sciences*, 164 :106799, 2021.
- [9] T. Kermezli. *Etude et modélisation de la diffusivité massique dans un milieu anisotrope*. Thèse de doctorat, Université Des Sciences Et De La Technologie Houari-Boumediène - Alger, 2010.
- [10] L. Lallemand, J. Petit, S. Lalanne, S. Landais, S. Trombert, L. Vernhet, R. Viroulaud. Modeling of the green body drying step to obtain large size transparent magnesium-aluminate spinel samples. *Journal of the European Ceramic Society*, 34(3) :791–799, 2014.
- [11] C.R. Oswin. The kinetics of package life. III. the isotherm. *Journal of the Society of Chemical Industry*, 65(12) :419–421, 1946.