

# Modélisation à partir d'essais sur éprouvettes de la teneur en eau résiduelle d'une structure béton exposée à plusieurs ambiances environnementales

J. SANAHUJA<sup>a</sup>, M. LION<sup>b</sup>

a. EDF lab Les Renardières, Moret sur Loing ; julien.sanahuja@edf.fr

b. EDF CEIDRE/TEGG, Aix en Provence ; maxime.lion@edf.fr

## Résumé

*Le degré de saturation étant un paramètre déterminant du comportement du béton, il est important d'évaluer la teneur en eau résiduelle au cours de la vie de l'ouvrage, en complément de techniques de mesure non destructrice donnant des informations locales. La teneur en eau dépend des caractéristiques du béton, de la géométrie de la structure, et des conditions environnementales, majoritairement température et humidité. Cette contribution propose une démarche combinant expérimental et simulation simplifiée, visant à estimer, à partir d'essais courants, la teneur en eau dans les structures béton. Les perspectives d'amélioration portent d'une part sur la loi de comportement en transport, une modélisation plus physique permettrait de ne pas se limiter aux seuls couples température, humidité considérés expérimentalement ; et d'autre part sur une estimation plus fine du champ de teneur en eau et non de sa moyenne spatiale.*

## Abstract

*Saturation degree is a determinant parameter of concrete behaviour. It is thus important to estimate the water content during the lifetime of civil engineering structures, along with local measurements provided by non destructive techniques. Water content depends on concrete properties, on structure geometry, and on environmental conditions, mainly temperature and humidity. This contribution proposes an approach combining experiments and simplified simulation, to estimate, from common tests, water content in concrete structures. Possible improvements include adopting a more physical transport behaviour law for concrete, which would allow to explore more temperature - humidity conditions than experimentally tested, and estimating the water content field instead of its spatial average.*

**Mots clefs : béton, transport, séchage, perméabilité, teneur en eau, structure**

## 1 Introduction

En tant que maître d'ouvrage d'un parc étendu d'installations nucléaires, thermiques et hydrauliques, EDF est tenu de garantir la sûreté et la disponibilité de ses sites de production. En particulier, les ouvrages de génie civil sont, comme toute structure en béton, soumis à des phénomènes de vieillissement associés aux conditions environnementales, aux conditions d'exploitation et à de potentielles pathologies internes. De plus, les évaluations de sûreté font appel à des simulations d'accident grave (conditions de haute température en particulier). Ces calculs nécessitent des lois de comportement adaptées. Le comportement du béton à haute température étant très dépendant de sa teneur en eau, il est important d'évaluer la teneur en eau résiduelle au cours de la vie de la structure, en complément de techniques de mesure non destructrice donnant des informations locales (voir par exemple [1] dans cette même conférence).

La teneur en eau dépend des caractéristiques du béton, de la géométrie de la structure et des conditions environnementales (majoritairement température et humidité). La R&D et l'ingénierie d'EDF ont donc mis en place une démarche combinant expérimental et simulation simplifiée visant à évaluer rapidement, à partir d'essais courants, l'évolution de la teneur en eau dans les structures béton.

Des essais de séchage ont été réalisés sur des éprouvettes, initialement saturées, exposées à différentes ambiances environnementales : température et humidité maintenues constantes. La perte de masse de chaque éprouvette est périodiquement mesurée. Pour évaluer les caractéristiques de transport du béton, chaque essai est simulé. Afin de permettre une identification très rapide, un modèle de comportement en transport simplifié [2] a été retenu. Ce dernier suppose la prépondérance du mécanisme de transport darccéen de l'eau, et néglige les termes de second ordre. Les linéarisations effectuées le rendent pertinent pour des sauts modérés d'humidité relative. Même si les conditions de séchage considérées ici vont au delà, retenir ce modèle permet d'établir des expressions analytiques (sous forme de séries infinies) de la perte de masse dans le cas de géométries et conditions de séchage simples, parfaitement adaptées à l'implémentation dans un outil d'ingénieur.

L'exemple d'application proposé concerne le récupérateur de corium de l'EPR Flamanville 3, qui comprend une structure en béton sacrificiel située sous la cuve du réacteur. Les essais de séchage ont été réalisés sur trois formules de béton pour quatre conditions thermo-hydriques différentes, et sur trois éprouvettes pour chaque essai. L'ajustement sur les pertes de masse mesurées sur 60 jours est très satisfaisant dans tous les cas.

À partir des caractéristiques de transport ainsi obtenues, de la géométrie de l'ouvrage et des conditions environnementales d'exploitation, il est possible d'estimer l'évolution de la teneur en eau dans la structure. Le comportement en transport du béton est le même que celui utilisé pour simuler les essais, ce qui a permis d'enrichir l'outil métier d'un mode de calcul dédié à la structure.

## 2 Modèle simplifié de transport

L'objectif est de modéliser le séchage d'une structure constituée d'un milieu poreux isotrope non saturé. Afin de permettre l'implémentation dans un outil d'ingénieur, le modèle de transport est volontairement simplifié. Cela permet, dans le cas de géométries élémentaires, une résolution analytique.

La modélisation proposée par [2] est reprise. Par souci de concision, seules les hypothèses simplificatrices et les principales équations du modèle sont indiquées ici. Pour plus de détails, se reporter à [2].

## 2.1 Hypothèses

Un certain nombre d'hypothèses simplificatrices sont adoptées par [2] :

- transport darcién du gaz et diffusion de la vapeur dans le gaz négligés par rapport au transport darcién du liquide,
- pression de gaz toujours à l'équilibre et prise comme référence :  $p_g = 0$ ,
- incompressibilité de la phase solide du milieu poreux,
- domaine mécaniquement libre de contraintes et champ de contrainte nul dans tout le domaine,
- linéarisation de la courbe de pression capillaire - degré de saturation,
- termes du second ordre négligés.

## 2.2 Principales équations

À l'échelle du point matériel, pression et concentration en eau sont reliées par [2] :

$$c - c_0 = \rho \frac{p - p_0}{p_\infty - p_0} [\phi_0 S_\infty^r - (\phi_0 - \epsilon_\infty) S_0^r] \quad (1)$$

avec  $c$  la concentration massique en eau dans le milieu poreux,  $p$  la pression (de signe négatif) dans l'eau,  $\phi$  la porosité,  $S^r$  le degré de saturation,  $\epsilon = \text{tr } \epsilon$  la déformation volumique,  $\rho$  la masse volumique de l'eau. Les indices 0 et  $\infty$  se rapportent à l'état initial et asymptotique. La pression respecte l'équation de champ suivante :

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D \Delta p \quad (2)$$

équation de diffusion linéaire, avec le coefficient de diffusion  $D$ , relié à la perméabilité à l'eau  $K$  caractérisant le matériau pour le trajet hydrique considéré, selon :

$$D = K \frac{p_\infty - p_0}{\phi_0 S_\infty^r - (\phi_0 - \epsilon_\infty) S_0^r} \quad (3)$$

La perméabilité  $K$  intervient dans la loi de Darcy :

$$\underline{w} = -\rho K \underline{\text{grad}}(p) \quad (4)$$

avec  $\underline{w}$  le flux apparent de masse d'eau liquide au travers du milieu poreux.

On quitte à présent le point de vue du point matériel pour s'intéresser à une structure occupant le domaine  $\Omega$ . On suppose qu'aux instants initial comme final, la structure est dans un état homogène (pression, degré de saturation et déformation uniformes), de sorte que le rapport  $D/K$  issu de (3) soit uniforme sur  $\Omega$ .

Une fois le champ de pression connu à un instant  $t$  donné, il est possible de déterminer l'écart entre la masse courante  $m(t)$  et la masse initiale  $m_0$  du domaine  $\Omega$  (éprouvette le plus souvent). En effet, comme la masse se décompose additivement entre masse de solide et masse d'eau :

$$m(t) - m_0 = \int_{\Omega} [c(\underline{x}, t) - c_0] \, d\Omega \quad (5)$$

En exploitant (1), il est possible de relier au champ de pression l'écart de masse relatif à l'écart final :

$$\frac{m(t) - m_0}{m_\infty - m_0} = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega} \frac{p(\underline{x}, t) - p_0}{p_\infty - p_0} \, d\Omega \quad (6)$$

Il est également intéressant d'établir un lien plus opérationnel entre coefficients de diffusion  $D$  et de perméabilité  $K$ , dans la mesure où (3) fait intervenir des grandeurs nécessitant des mesures complémentaires (porosité, déformation, degré de saturation).

D'après (5) et (1), en introduisant la perte de masse finale :

$$m_\infty - m_0 = \int_{\Omega} (c_\infty - c_0) d\Omega = |\Omega| \rho [\phi_0 S_\infty^r - (\phi_0 - \epsilon_\infty) S_0^r] \quad (7)$$

on établit à partir de (3) une relation entre  $D$  et  $K$  ne dépendant plus de  $\phi_0$ ,  $S_\infty^r$  et  $\epsilon_\infty$  :

$$D = K |\Omega| \rho \frac{p_\infty - p_0}{m_\infty - m_0} \quad (8)$$

À la différence de (3), cette relation n'est pas locale (propre à un point matériel) mais intéresse le domaine  $\Omega$  dans sa globalité. Elle permet de passer aisément du coefficient de diffusion  $D$  (2) ajusté sur des résultats expérimentaux, à la perméabilité à l'eau  $K$  (4).

Les conditions initiales et aux limites du problème (2) sur la pression sont en pratique exprimées en fonction de la température  $T$  et de l'humidité relative  $h$  à l'aide de la loi de Kelvin :

$$p = \frac{\rho R T}{M} \ln h \quad (9)$$

avec  $R$  avec la constante des gaz parfaits et  $M$  la masse molaire de l'eau.

### 3 Exploitation des essais de séchage sur corps d'épreuve

#### 3.1 Présentation des essais

Les essais de séchage ont été réalisés sur le béton sacrificiel du puits de cuve de l'EPR Flamanville 3. Il s'agit d'un béton dont la spécificité est de devoir respecter une composition chimique très précise (teneur en silice, en hématite, en eau, ...) en plus de certains critères physiques et mécaniques (résistance, densité). Ce béton contient en particulier une grande proportion de granulats d'hématite pour répondre à la composition chimique fixée ainsi que des fibres en polypropylène pour réduire les risques d'éclatement thermique en cas d'accident grave.

Les formules 4420, 4421 et 4422 se distinguent par leur dosage en eau et la présence éventuelle d'entraîneur d'air, dans le but d'évaluer le meilleur compromis vis-à-vis des requis de teneur en eau et de densité. Les caractéristiques des trois formules étudiées sont fournies dans la table 1.

Formule	4420	4421	4422
Eau totale théorique (%wt)	6.5	6.5	5.9
Entraîneur d'air	oui	non	oui
Masse volumique du béton durci (kg/m <sup>3</sup> )	2610	2760	2720
Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	54.0	75.0	73.5
Porosité accessible à l'eau (%)	11.8	12.3	11.1

TABLE 1 – Caractéristiques des trois formules de béton étudiées.

Pour réaliser ces essais, le choix des corps d'épreuve s'est porté sur des disques 110x60 mm. Ces dimensions permettent de suivre les processus de séchage dans des temps raisonnables tout en restant

compatibles avec le modèle développé. Les disques sont sciés au milieu d'éprouvettes 11x22 cm, stockés au moins 28 jours selon la norme NF EN 12390-2, enrubannés de deux couches d'aluminium de manière à induire un séchage purement unidirectionnel par les deux sections circulaires, comme illustré sur la figure 1 gauche, puis exposés à des conditions de séchage pour suivi de leur perte de masse.

Quatre conditions de séchage ont été choisies :

- $T = 68^\circ\text{C}$  et  $h = 4\%$ ,
- $T = 40^\circ\text{C}$  et  $h = 15\%$ ,
- $T = 20^\circ\text{C}$  et  $h = 50\%$ ,
- $T = 20^\circ\text{C}$  et  $h = 85\%$ .

Ces conditions se rapprochent de celles qui peuvent être rencontrées par des structures internes de bâtiments réacteurs à différents stades de leur vie (en service ou en arrêt en phase d'exploitation, hors d'eau ou non en phase de construction). Trois corps d'épreuve (disques) ont été testés par formule de béton et par condition de séchage, soit 36 au total. L'ensemble des pertes de masse est repris en annexe A.

### 3.2 Modélisation de l'essai

L'éprouvette occupe le domaine  $-l \leq x \leq l$  (figure 1 droite), sa demi épaisseur est donc notée  $l$ . La symétrie du problème permet de ne résoudre que pour  $0 \leq x \leq l$ .

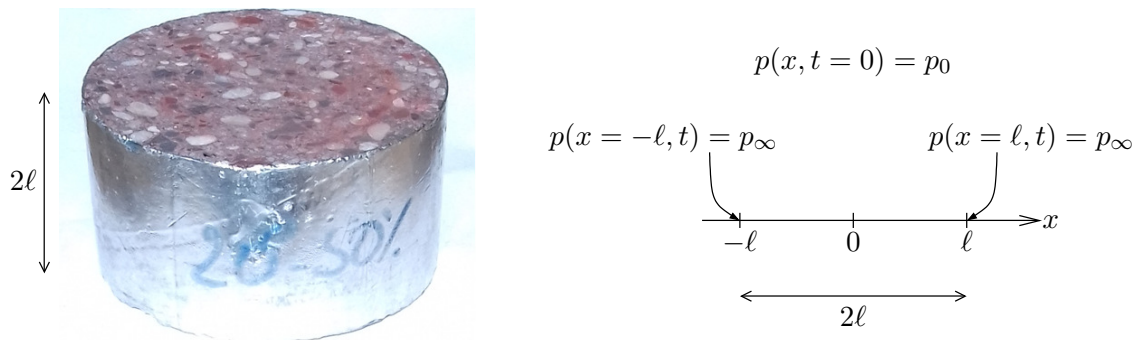


FIGURE 1 – Photographie d'un corps d'épreuve pour essai de séchage, et modélisation axiale avec conditions initiale et aux limites.

En exploitant la technique de séparation des variables et une décomposition en série de Fourier vis à vis de la variable d'espace, le champ de pression est obtenu sous la forme :

$$\frac{p(x, t) - p_0}{p_\infty - p_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{n+1}}{\omega_n} e^{-\omega_n^2 t / \tau} \cos\left(\omega_n \frac{x}{l}\right) \quad \text{avec} \quad \omega_n = \left(n - \frac{1}{2}\right) \pi \quad (10)$$

avec le temps caractéristique de diffusion  $\tau = \ell^2 / D$ . On déduit de (6) l'évolution de la perte de masse :

$$\frac{m(t) - m_0}{m_\infty - m_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\omega_n^2} e^{-\omega_n^2 t / \tau} \quad (11)$$

Des profils et évolutions de pression dans l'éprouvette sont représentés sur la figure 2. Comme attendu, le cœur ( $x \rightarrow 0$ ) met plus de temps que les bords ( $x \rightarrow \ell$ ) à s'équilibrer. L'évolution de la perte de masse relative de l'éprouvette est représentée sur la figure 3. Le graphe de droite montre que l'approximation d'évolution de la perte de masse en « racine du temps » (courbe en pointillés) est valide pour  $t \leq \tau / 4$ .

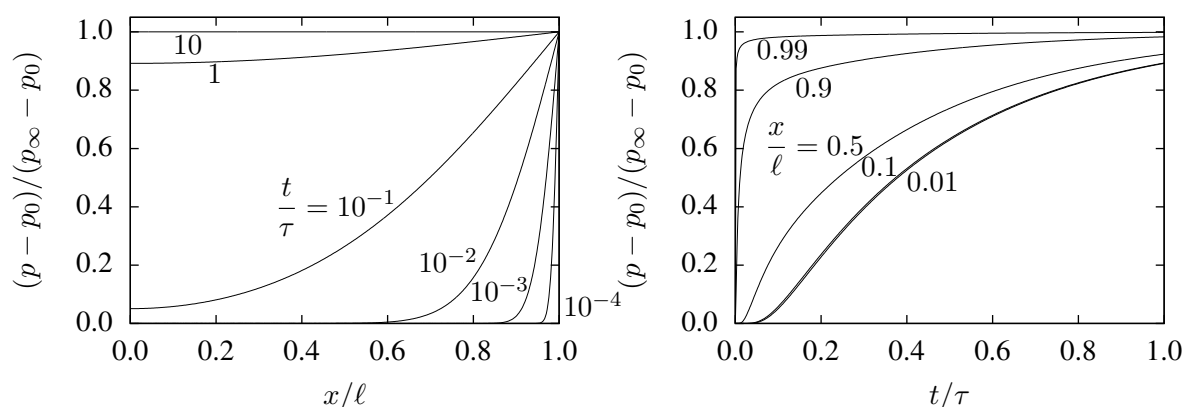


FIGURE 2 – Profils et évolutions du champ de pression au sein de l'éprouvette en séchage axial.

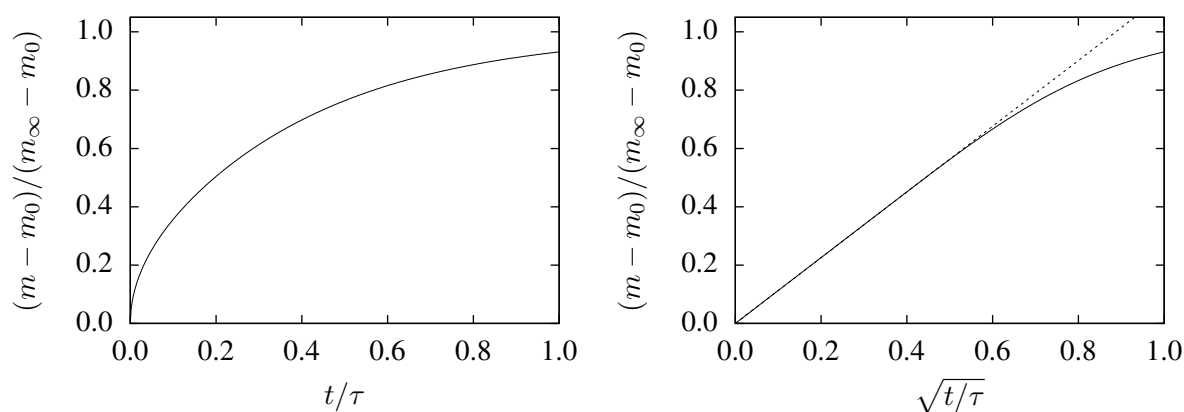


FIGURE 3 – Évolution de la perte de masse de l'éprouvette en séchage axial, en fonction du temps ou de la racine carrée du temps.

Ce modèle d'essai de séchage a été utilisé avec succès par [2] pour une série de multiples petits sauts d'humidité relative entre  $97.9 \rightarrow 93.2$  % et  $11.1 \rightarrow 6.6$  %. Ici, il s'agit d'évaluer si le même modèle reste acceptable pour des sauts de  $100 \rightarrow 85$  %,  $100 \rightarrow 50$  %,  $100 \rightarrow 15$  % et  $100 \rightarrow 4$  %.

### 3.3 Identification de la perméabilité

L'ajustement de l'évolution théorique (11) de la perte de masse sur l'évolution expérimentale permet de déterminer la perte de masse asymptotique  $m_0 - m_\infty$  et le temps caractéristique  $\tau = \ell^2/D$ . Le coefficient de diffusion  $D$  s'en déduit, puis la perméabilité à l'eau  $K$  par (8).

L'ajustement est très bon pour l'ensemble des résultats expérimentaux (annexe A). Les deux premiers tableaux de la table 2 synthétisent les coefficients de diffusion et de perméabilité moyens sur les 3 corps d'épreuve pour chaque formule et chaque condition thermo-hydrrique de séchage.

Les perméabilités à l'eau sont d'un ordre de grandeur comparable à celles obtenues par [2] sur l'argile. Les valeurs obtenues sont, pour chaque formulation, relativement similaires pour les trois premières conditions thermo-hydrriques. La dernière condition ( $20^\circ\text{C}$ , 85 %) donne des valeurs un peu plus élevées. Cela dit, pour interpréter l'influence des conditions hydrriques (et donc de la saturation « moyenne » sur le trajet hydrrique) sur la perméabilité à l'eau, il convient de décorrélérer l'effet de la température. Une

$D$ ( $10^{-10}$ m <sup>2</sup> /s)					$K$ ( $10^{-20}$ m <sup>2</sup> /s/Pa)					$K_{\approx 20^{\circ}\text{C}}$ ( $10^{-20}$ m <sup>2</sup> /s/Pa)				
$T$ (°C)	68	40	20	20	$T$ (°C)	68	40	20	20	$h$ (%)	4	15	50	85
$h$ (%)	4	15	50	85	$h$ (%)	4	15	50	85	$h$ (%)	4	15	50	85
4420	3.0	1.7	2.4	4.8	4420	6.2	3.2	4.0	12.4	4420	2.6	2.1	4.0	12.4
4421	1.8	1.4	2.0	4.3	4421	3.8	2.2	3.2	9.1	4421	1.6	1.4	3.2	9.1
4422	1.9	1.5	2.2	4.5	4422	3.4	2.0	2.8	8.5	4422	1.4	1.3	2.8	8.5

TABLE 2 – Moyenne des coefficients de diffusion  $D$  et de perméabilité à l'eau  $K$  identifiés sur les résultats expérimentaux, et perméabilités ramenées à  $20^{\circ}\text{C}$ .

première approche consiste à considérer que la température n'a une influence que par le biais de la viscosité  $\eta$  de l'eau. Autrement dit, la perméabilité intrinsèque  $k = \eta K$ , est considérée indépendante de la température. La donnée de la viscosité de l'eau en fonction de la température [3] permet alors de ramener toutes les perméabilités à  $T = 20^{\circ}\text{C}$  (troisième tableau de la table 2).

Ces résultats montrent que, par ordre de perméabilité croissante, les formules sont 4422, 4421 puis 4420. Les perméabilités ramenées à  $20^{\circ}\text{C}$  en fonction de l'humidité relative cible suivent une progression conforme à l'intuition : la perméabilité à l'eau est attendue croissante du degré de saturation. Seul le cas 4 % ne vérifie pas cette progression, mais les valeurs restent très proches de celles à 15 %. Ces remarques sont de plus à nuancer compte-tenu des linéarisations effectuées sur le comportement en transport (en principe valables uniquement pour des sauts d'humidité relative modérés).

## 4 Simulation à l'échelle de la structure

Le cas d'application concerne le récupérateur de corium de l'EPR Flamanville 3, qui comprend une structure située sous la cuve du réacteur constituée du béton sacrificiel à base d'hématite (l'aire d'étalement est composée quant à elle d'un béton sacrificiel purement siliceux). Cette structure a une épaisseur de 50 cm et est exposée à l'environnement interne au bâtiment depuis une seule face comme l'illustre la figure 4 (l'autre face est en contact du puits de cuve par l'intermédiaire de briques de zircon).

La représentation de cette structure sous forme unidimensionnelle avec un séchage par une face est donc possible et réaliste. Le scénario thermo-hydrigue retenu est une version simplifiée des conditions d'exploitation :

- la première année :  $T = 20^{\circ}\text{C}$  et  $h = 85\%$  ;
- les 10 années suivantes :  $T = 68^{\circ}\text{C}$  et  $h = 4\%$ .

Le modèle est similaire à celui présenté en sections 2-3, avec des conditions aux limites différentes avant et après 1 an. Ne disposant de mesures que pour un certain nombre de conditions thermo-hydrigues précises, on supposera que le coefficient de diffusion est constant sur les deux plages de temps et y prend la valeur déduite des essais dans les mêmes conditions. Il s'agit évidemment d'une approximation visant à exploiter directement les résultats expérimentaux et à rendre le calcul plus efficace. En particulier, le second jeu de conditions thermo-hydrigues s'applique à partir d'un an sur une structure déjà partiellement désaturée, et non complètement saturée comme supposé par la modélisation présentée en section 3. Cela dit, les résultats (figure 5) montrent que cette désaturation au bout d'un an est très faible comparativement à la suite.

La teneur en eau moyenne estimée sur la structure est représentée en fonction du temps sur la figure 5, pour les trois formules étudiées. La cinétique de séchage accélère sensiblement dès le passage en exploi-

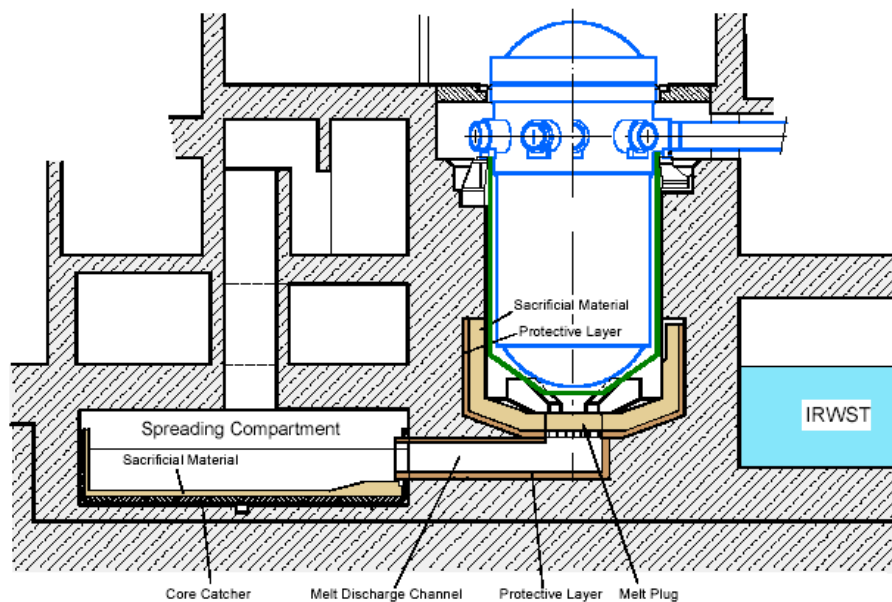


FIGURE 4 – Illustration du récupérateur de corium de l'EPR.

tation (68°C et 4 %), ce qui pouvait s'anticiper au vu des résultats expérimentaux (comparer en annexe A les résultats à 20°C, 85 % et à 68°C, 4 %, en particulier l'échelle de l'axe des ordonnées).

La perméabilité influe évidemment directement sur la cinétique de séchage : le matériau le plus perméable présente le taux d'évolution de la teneur en eau le plus élevé. En revanche, la valeur à un instant donné de la teneur en eau dépend aussi de la teneur en eau initiale : un béton contenant initialement peu d'eau mais peu perméable (4422) pourra à long terme voir sa teneur en eau plus élevée qu'un béton contenant initialement davantage d'eau mais très perméable (4420).

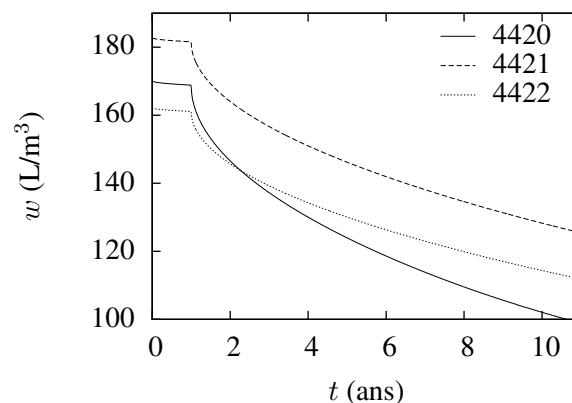


FIGURE 5 – Évolution de la teneur en eau moyenne sur l'épaisseur de la structure, pour les trois formules de béton, et sous un chargement à 20°C, 85 % la première année puis 68°C, 4 % les 10 années suivantes.

## 5 Conclusion et perspectives

Une approche d'ingénieur combinant expérimental et modélisation a permis d'évaluer l'évolution de la teneur en eau dans une structure. Le modèle retenu est suffisamment simple pour être implémenté dans



un outil métier d'identification sur données expérimentales et de simulation sur structure, donnant des résultats quasi instantanément. Même si les sauts d'hygrométrie imposés sont élevés, faisant a priori sortir du cadre linéaire du modèle, l'ajustement sur les données expérimentales est très satisfaisant.

Pour aller plus loin, il serait utile de lever certaines hypothèses simplificatrices (en adoptant des modèles de transport plus élaborés, comme [4, 5]), au prix de calculs certainement plus lourds. Cela ouvrirait la possibilité de simulations pour des conditions thermo-hydriques autres que précisément celles des essais. Cela permettrait de plus de ne pas se limiter à un unique changement de conditions thermo-hydriques : possibilité de cycles, etc... Les approches proposées ici sont de plus limitées au séchage uniaxial d'une structure dont la géométrie est monodimensionnelle (cas particulier de la structure étudiée ici). Il serait également intéressant de ne pas se limiter à l'évolution de la teneur en eau moyenne, en simulant l'évolution du champ de teneur en eau. Pour représenter des géométries et des conditions de séchage plus courantes dans le génie civil, il sera nécessaire de recourir à une modélisation numérique de la structure. Enfin, les calculs proposés ici sont tous déterministes. Or les mesures expérimentales sont inévitablement entachées d'une certaine variabilité, qui se répercute sur les propriétés de transfert identifiées, et donc sur les courbes de teneur en eau simulées. Les simulations à l'échelle de la structure devraient donc intégrer cette part de variabilité.

## A Courbes modèles ajustées sur les données expérimentales

Les courbes ajustées sur l'ensemble des données expérimentales sont reprises sur les figures 6, 7 et 8. Chaque figure correspond à une formule de béton. Chaque ligne correspond à un jeu de conditions thermo-hydriques. Chaque colonne correspond à un corps d'épreuve (3 corps d'épreuve par condition). L'ajustement est excellent, sauf pour 85 % d'humidité (correspondant pourtant au saut d'humidité le plus faible), condition pour laquelle la concordance reste néanmoins très acceptable. Cet écart montre les limites du modèle proposé ici, qui ne prend probablement pas en compte un ou plusieurs mécanismes qui deviennent non négligeables dans ces dernières conditions thermo-hydriques (poursuite de l'hydratation, ...).

## Références

- [1] V. Guihard, F. Taillade, B. Steck, and J. Sanahuja. Prédiction de la teneur en eau de matériaux cimentaires par application d'un processus d'homogénéisation aux propriétés électromagnétiques du milieu. In *23<sup>e</sup> congrès français de mécanique*, Lille, France, 2017.
- [2] E. Olchitzky. *Couplage hydromécanique et perméabilité d'une argile gonflante non saturée sous sollicitations hydriques et thermiques ; courbe de sorption et perméabilité à l'eau*. PhD thesis, ENPC, Champs-sur-Marne, France, 2002.
- [3] J. Kestin, M. Sokolov, and W.A. Wakeham. Viscosity of liquid water in the range  $-8^{\circ}\text{C}$  to  $150^{\circ}\text{C}$ . *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 7(3) :941–948, 1978.
- [4] O. Coussy, V. Baroghel-Bouny, P. Dangla, and M. Mainguy. Evaluation de la perméabilité à l'eau liquide des bétons à partir de leur perte de masse durant le séchage. *Revue Française de Génie Civil*, 5(2-3) :269–284, 2001.
- [5] A. Giraud, R. Giot, F. Homand, and A. Koriche. Permeability identification of a weakly permeable partially saturated porous rock. *Transport in Porous Media*, 69(2) :259–280, 2007.

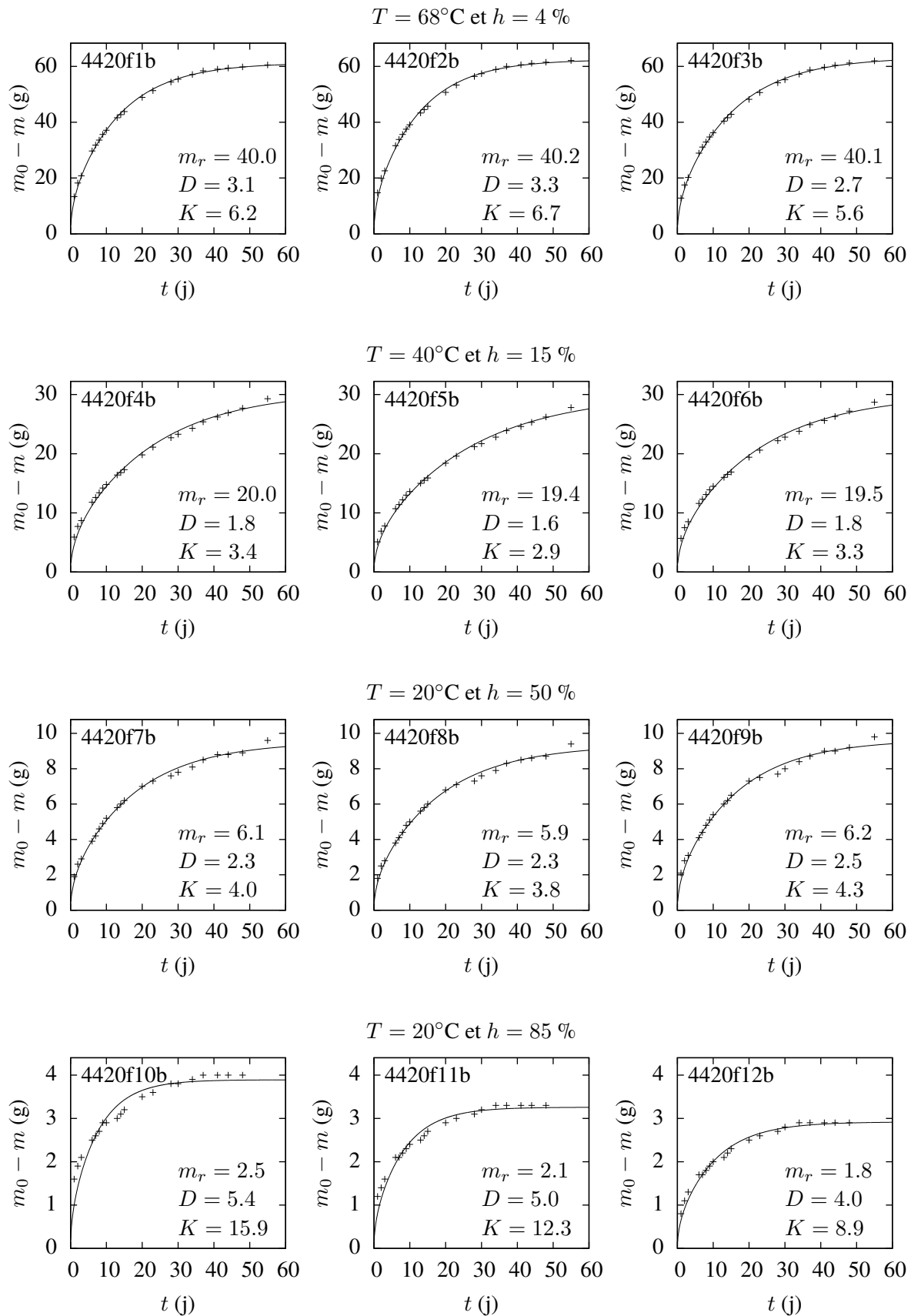


FIGURE 6 – Ajustement sur les essais sur la formule 4420 (perte de masse finale relative à la masse initiale  $m_r = (m_0 - m_\infty)/m_0$  en  $10^{-3}$ , coefficient de diffusion  $D$  en  $10^{-10}$   $\text{m}^2/\text{s}$ , perméabilité  $K$  en  $10^{-20}$   $\text{m}^2/\text{s}/\text{Pa}$ ).

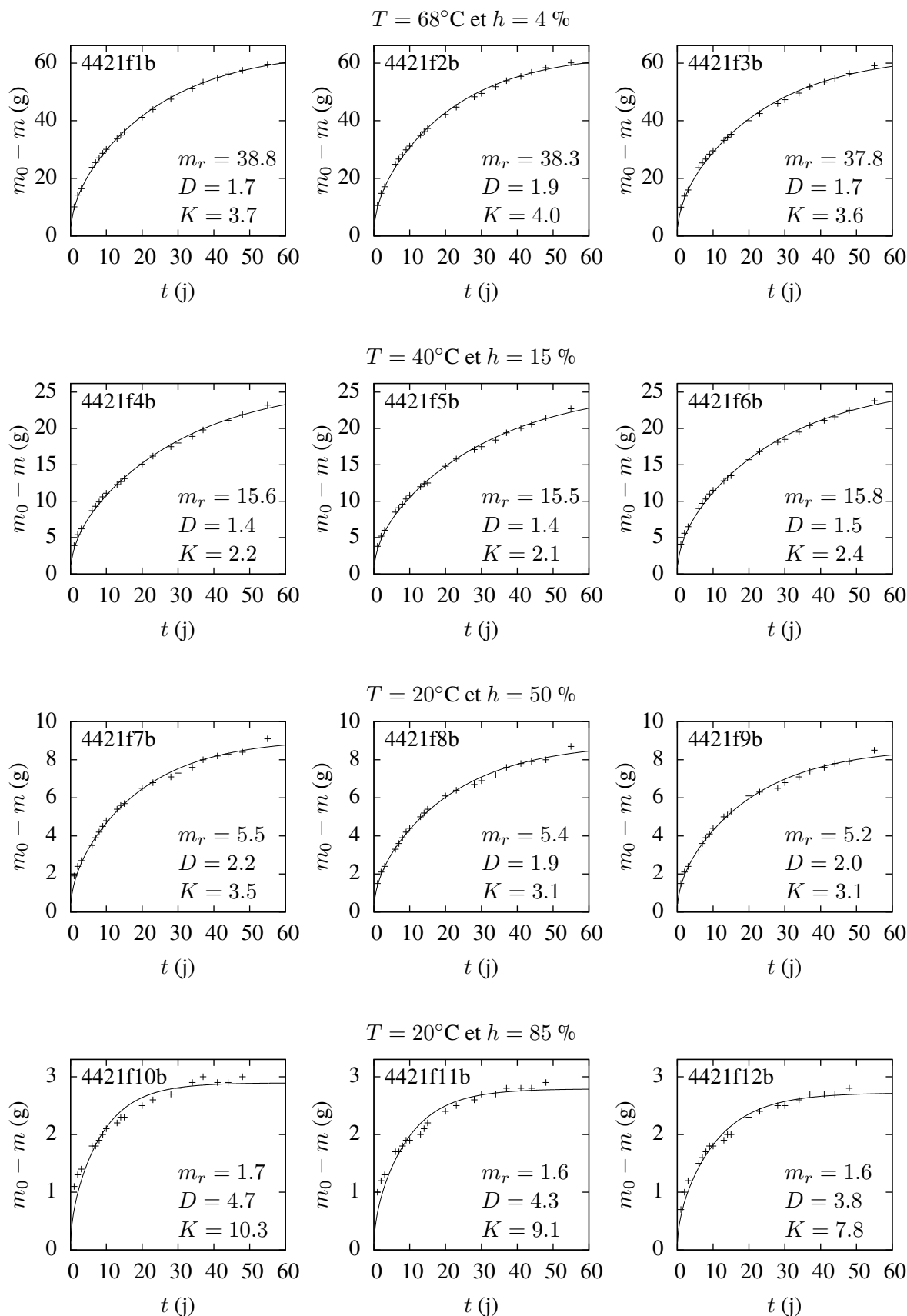


FIGURE 7 – Ajustement sur les essais sur la formule 4421 (perte de masse finale relative à la masse initiale  $m_r = (m_0 - m_\infty)/m_0$  en  $10^{-3}$ , coefficient de diffusion  $D$  en  $10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s, perméabilité  $K$  en  $10^{-20}$  m<sup>2</sup>/s/Pa).

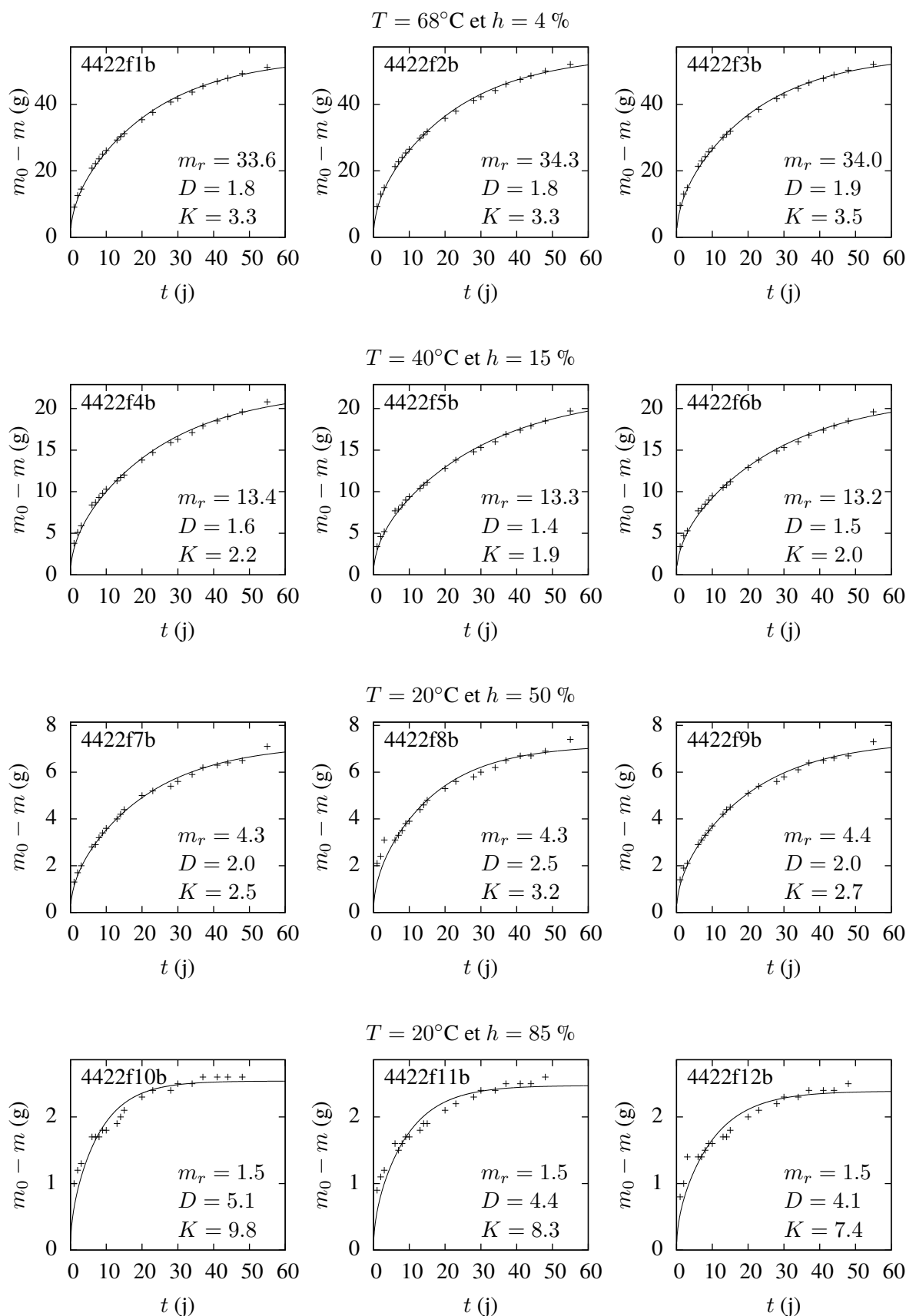


FIGURE 8 – Ajustement sur les essais sur la formule 4422 (perte de masse finale relative à la masse initiale  $m_r = (m_0 - m_\infty)/m_0$  en  $10^{-3}$ , coefficient de diffusion  $D$  en  $10^{-10}$   $\text{m}^2/\text{s}$ , perméabilité  $K$  en  $10^{-20}$   $\text{m}^2/\text{s}/\text{Pa}$ ).