

NRTW 2026

National Reliability Technology Workshop

Mercredi 1^{er} & jeudi 2 avril 2026 | Grenoble

Caractérisation de la diffusion d'humidité dans les résines de potting pour modules de puissance

Ariane Tomas¹, Loïc Théolier¹, Alexandrine Guédon-Gracia¹, Hélène Frémont¹, Pierre-Yves Pichon²

¹Univ, Bordeaux, Laboratoire IMS, Talence, France

²Mitsubishi Electric R&D Centre Europe, Rennes, France

Article publié dans Microelectronics Reliability : <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2026.116057>

Organisé par :

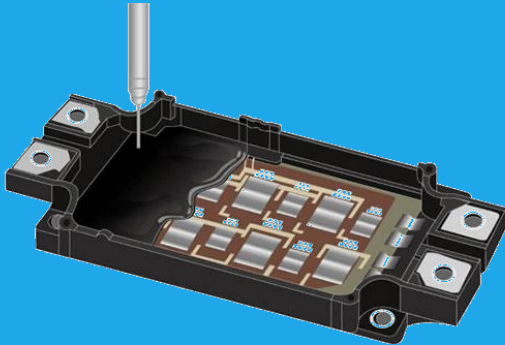


Financé par :

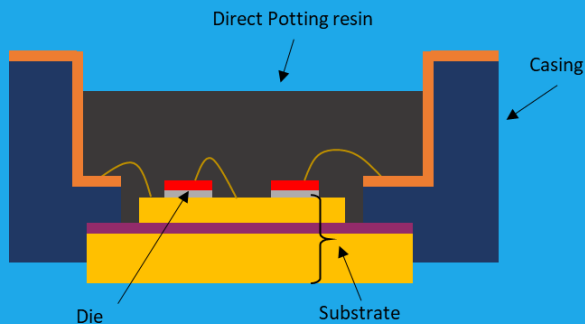


Objet d'étude:

Module de puissance avec résine de potting



Exemple de module de puissance avec résine de potting [1]





Approche de recherche sur l'étude de l'humidité

Risques de pénétration d'humidité dans les modules de puissance

Ex : éoliennes offshore [5], trains [4] et voitures électriques en arrêt la nuit et installations photovoltaïques [6-7]

De plus en plus de recherches sur l'impact de l'humidité sur les modules IGBT [2-7]

- Études de fiabilité sur des modules de puissance avec **gel silicone** soumis à des **contraintes thermiques** et **humidité** [2-7] 
- Études de fiabilité sur des modules de puissance avec **résine de potting** soumis à des **contraintes humides** (seulement thermiques [8]) 

Questions d'études :

- Est-ce que les tests standards sont toujours pertinents sur les composants avec résine ?
- Est-ce que la cinétique de diffusion d'humidité est similaire entre gel silicone et la résine de potting ?

Objectif : Caractérisation des paramètres de diffusion de l'humidité pour résines de potting

→ Première brique dans la construction d'un modèle numérique multiphysique de module de puissance

Characterization of the bulk moisture diffusion in epoxy-based potting compounds for IGBT semiconductor power modules

1. **Modèle de diffusion de l'humidité**
2. **Méthodes et matériaux**
 - Techniques de caractérisation
 - Echantillons de résine de potting
3. **Résultats – Résine A**
 - Concentration de l'humidité
 - Coefficient de diffusion de l'humidité
4. **Résultats – Résine B**
5. **Conclusion et discussion**



Caractérisation de la diffusion fickienne

Diffusion de l'humidité

La diffusion de l'humidité suit la loi de Fick et peut être décrite par (1)

$$M(t) = M_0 + M_{sat} \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D t}{4l^2} \right] \right] \quad (1)$$

$M(t)$: Masse de l'humidité absorbée (mg)

M_0 : Masse initiale (mg)

M_{sat} : Masse de l'humidité à saturation (mg)

$C_{sat} = \frac{M_{sat}}{V}$: Concentration de l'humidité à saturation (mg/cm³)

D : Coefficient de diffusion (mm²/s)

l : Demi épaisseur de l'échantillon (mm)



Analyse gravimétrique avec pesée manuelle



Dépendance à la température, l'humidité de l'environnement et quantité interne d'humidité

- Coefficient de diffusion D
 - Augmente avec la température : modélisé par Arrhenius
 - Supposé indépendant de l'humidité selon la loi de Fick
 - Des articles ont montré une diminution de la diffusivité avec l'augmentation de l'humidité relative de l'environnement [9-10] et avec l'augmentation de la concentration d'humidité des échantillons [12]
- Concentration d'humidité saturée C_{sat} dans la résine
 - Augmentation avec l'humidité relative appliquée [9,10,12]
 - La dépendance à la température diffère selon le composé étudié [13-14]

La littérature montre différents comportements de diffusion de l'humidité selon les composés

Nécessité de caractériser chaque matériau au cas par cas

Characterization of the bulk moisture diffusion in epoxy-based potting compounds for IGBT semiconductor power modules

1. Modèle de diffusion de l'humidité

2. Méthodes et matériaux

- Techniques de caractérisation
- Echantillons de résine de potting

3. Résultats – Résine A

- Concentration de l'humidité
- Coefficient de diffusion de l'humidité

4. Résultats – Résine B

5. Conclusion et discussion



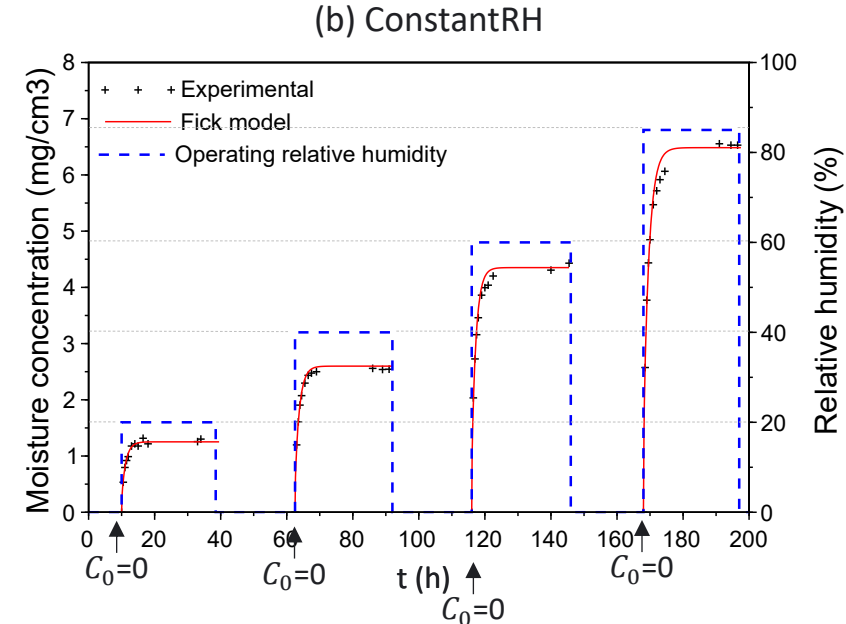
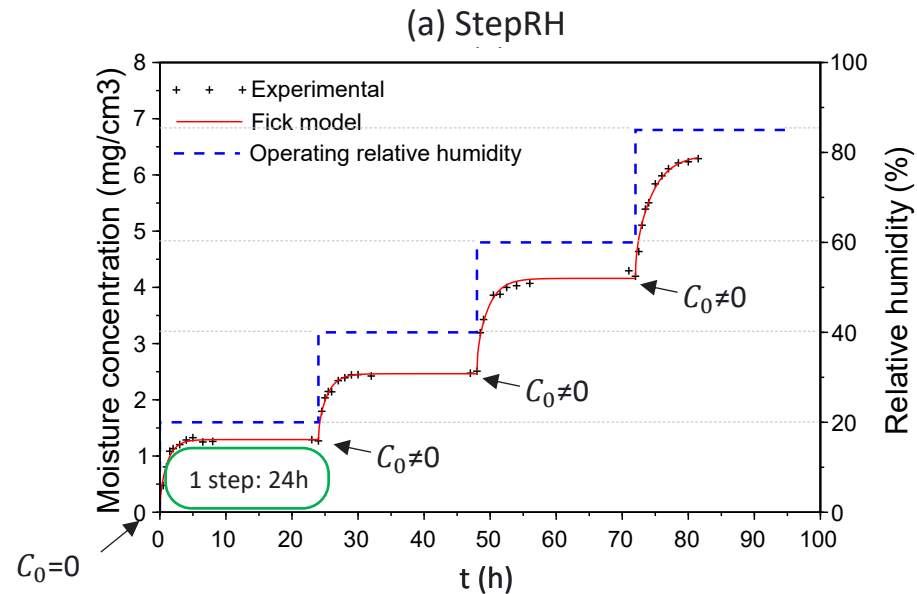
Chaque step est modélisé par :

$$M(t) = M_0 + M_{sat} \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D t}{4l^2} \right] \right] \quad (1)$$

\downarrow
 $C_0 = \frac{M_0}{V}$

Caractérisation des paramètres de diffusion à l'aide de deux méthodes différentes

- 4 conditions d'humidité relative (RH): 20 %, 40 %, 60 %, 85 % RH
- x3 campagnes de température pour chaque méthode: 40°C, 60°C, **85°C**



1. L'analyse gravimétrique caractérise le comportement hygroscopique des résines : $C_{sat}(T, RH)$ et $D(T, RH)$
2. La confrontation des résultats des deux méthodes permet de mettre en évidence l'influence de l'humidité initiale des échantillons C_0 sur la diffusion de l'humidité

Echantillons de résine de potting

Deux résines époxy de potting du commerce :

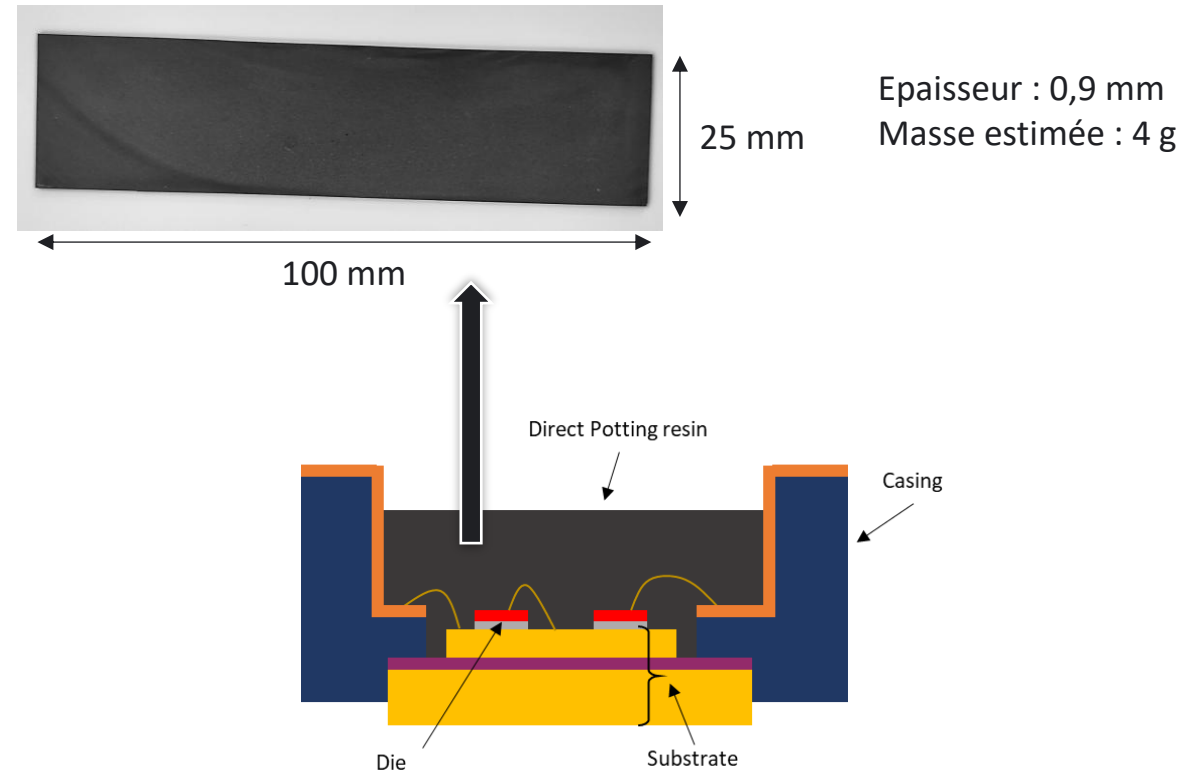
Résine A:

- Résine époxy de potting et durcisseur anhydride
- 70% charges (SiO_2 et $\text{Al}(\text{OH})_3$)
- T_g : 180°C
- Température de décomposition : 300°C

Résine B:

- Résine époxy de potting et durcisseur anhydride
- 70% charges (SiO_2)
- T_g : 160°C
- Température de décomposition : 380°C

Echantillons de résine bulk par lot de 3



Characterization of the bulk moisture diffusion in epoxy-based potting compounds for IGBT semiconductor power modules

1. Modèle de diffusion de l'humidité

2. Méthodes et matériaux

- Techniques de caractérisation
- Echantillons de résine de potting

3. Résultats – Résine A

- Concentration de l'humidité
- Coefficient de diffusion de l'humidité

4. Résultats – Résine B

5. Conclusion et discussion



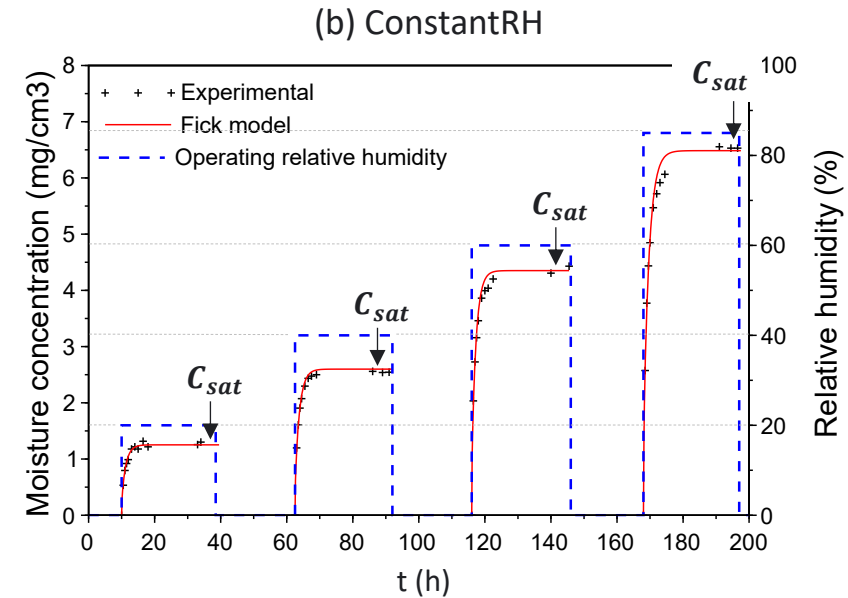
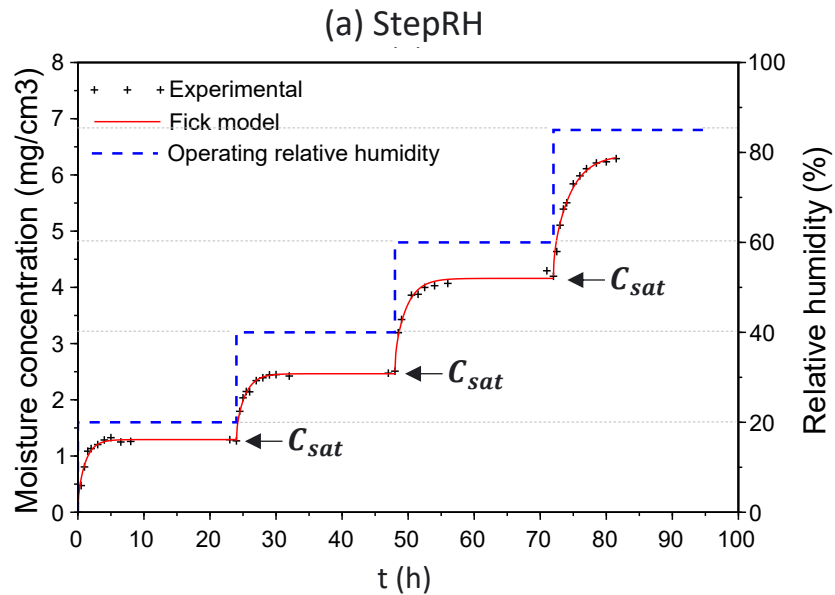
Chaque step est modélisé par :

$$M(t) = M_0 + M_{sat} \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D t}{4l^2} \right] \right] \quad (1)$$

$$C_{sat} = \frac{M_{sat}}{V}$$

Caractérisation des paramètres de diffusion à l'aide de deux méthodes différentes

- 4 conditions d'humidité relative (RH): 20 %, 40 %, 60 %, 85 % RH
- x3 campagnes de température pour chaque méthode: 40°C, 60°C, 85°C



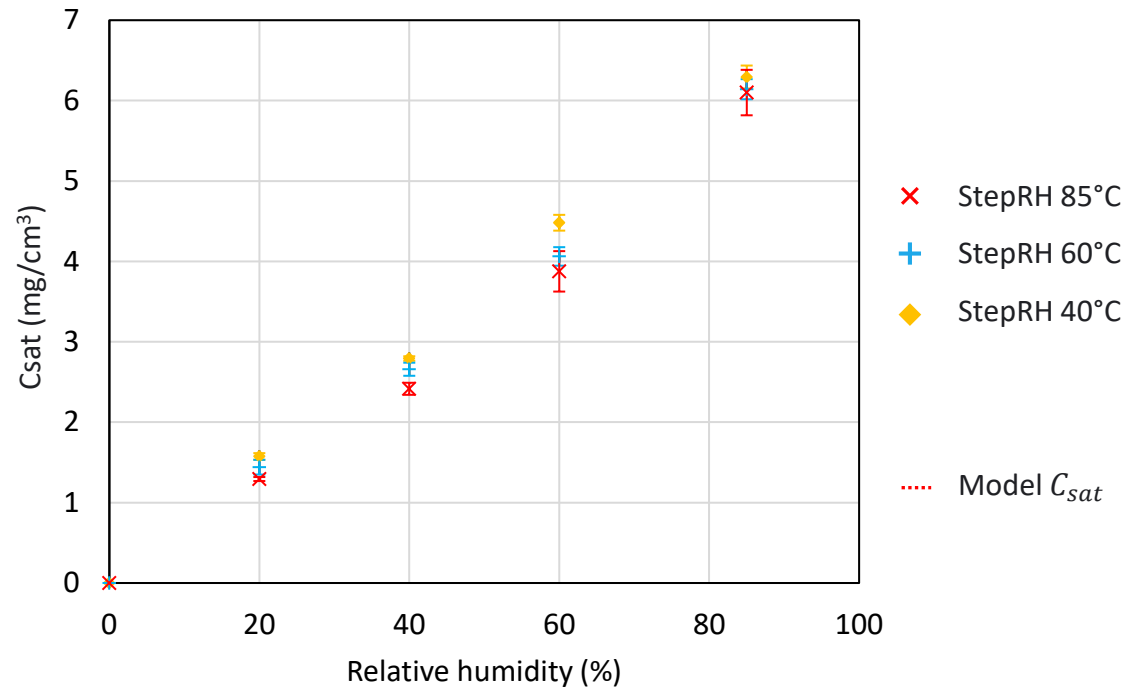
Chaque step est modélisé par :

$$M(t) = M_0 + M_{sat} \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D t}{4l^2} \right] \right] \quad (1)$$

$$C_{sat} = \frac{M_{sat}}{V}$$

Caractérisation des paramètres de diffusion à l'aide de deux méthodes différentes

- 4 conditions d'humidité relative (RH): 20 %, 40 %, 60 %, 85 % RH
- x3 campagnes de température pour chaque méthode: 40°C, 60°C, 85°C



Concentration d'humidité à saturation C_{sat} :

- Dépend de l'humidité :
 - Augmente avec l'humidité relative ambiante
 - Aucune différence entre les méthodes d'essai

→ Indépendante de la teneur en humidité de l'échantillon
- Dépend de la température (comprise dans l'humidité relative)

$$C_{sat} (mg/cm^3) = 0,071 \times RH(\%)$$

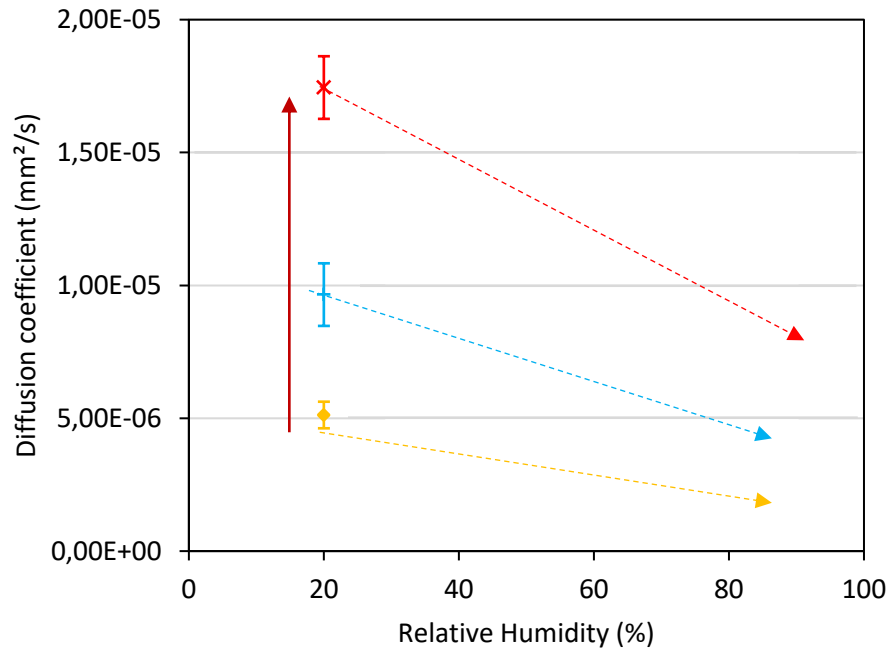
Correlation coefficient = **0,9948 %**

Coefficient de diffusion - StepRH

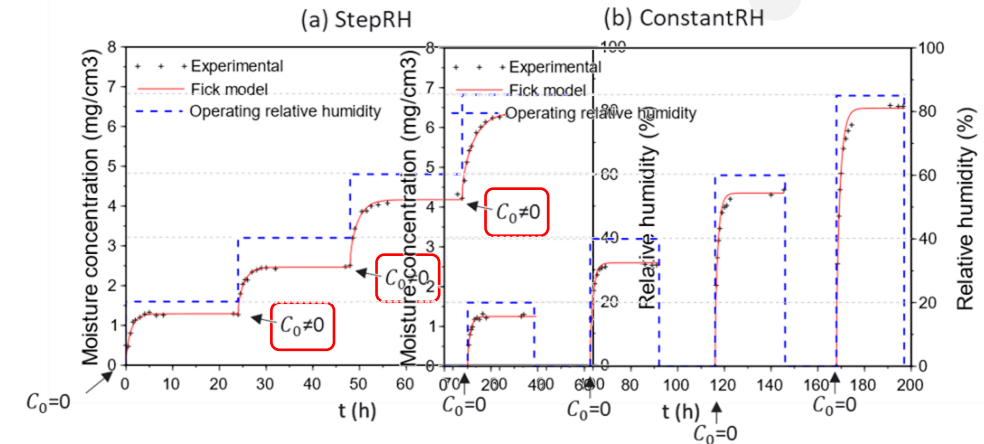
Chaque step est modélisé par :

$$M(t) = M_0 + M_{sat} \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D t}{4l^2} \right] \right] \quad (1)$$

\downarrow
 $C_0 = \frac{M_0}{V}$



- × StepRH 85°C
- + StepRH 60°C
- ♦ StepRH 40°C



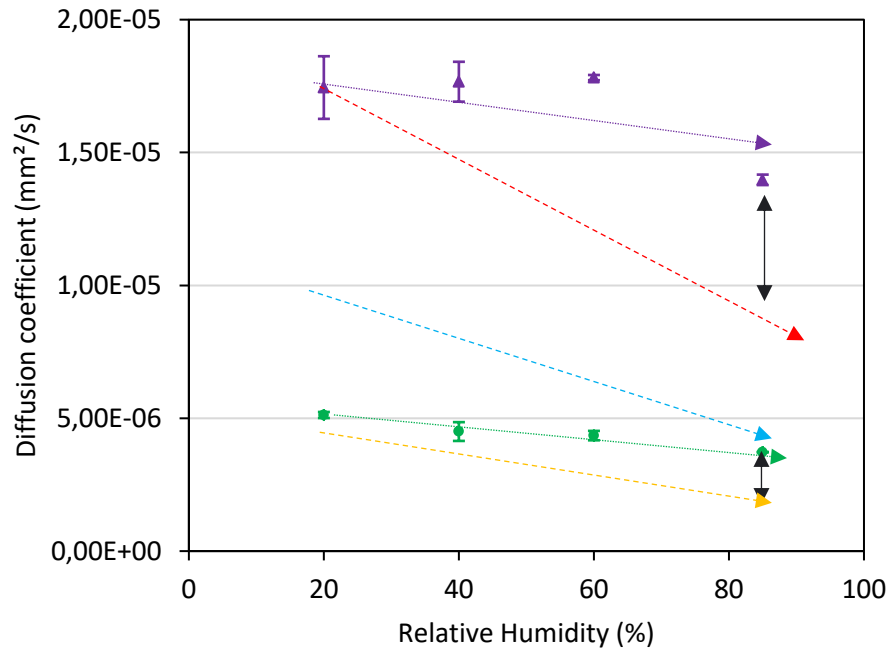
Coefficient de diffusion de l'humidité :

1. Dépendant de la température : augmente avec la température
2. Dépendant de l'humidité : diminue avec l'humidité
 - Deux facteurs d'humidité dans stepRH :
 - Humidité relative de l'environnement
 - Concentration initiale d'humidité C_0 dans les échantillons

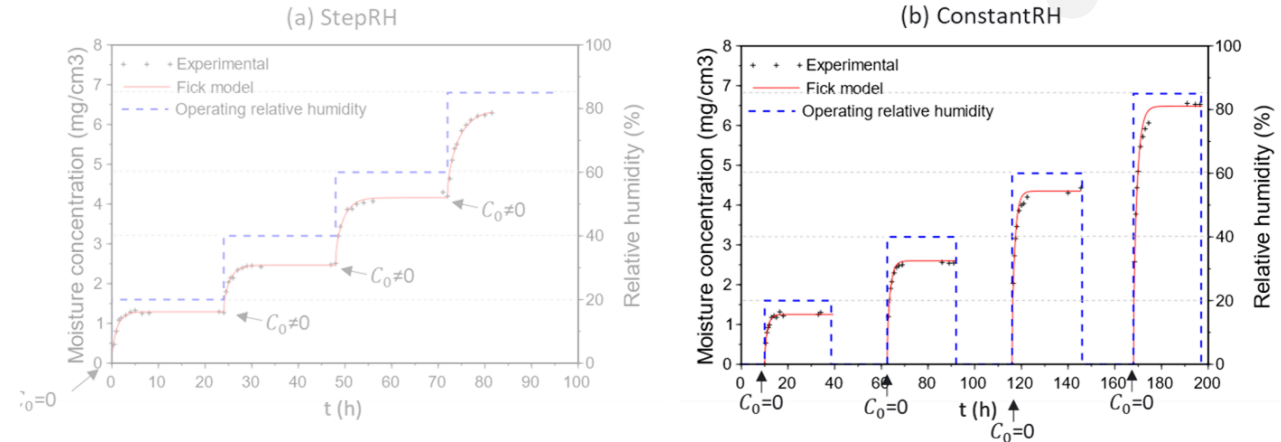
Coefficient de diffusion - ConstantRH

Chaque step est modélisé par :

$$M(t) = M_0 + M_{sat} \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D t}{4l^2} \right] \right] \quad (1)$$



- ▲ ConstantRH 85°C
- ConstantRH 40°C



Coefficient de diffusion de l'humidité :

1. Dépendant de la température : augmente avec la température
2. Dépendant de l'humidité : diminue avec l'humidité

- Deux facteurs d'humidité dans stepRH :

- Humidité relative de l'environnement
- Concentration initiale d'humidité C_0 dans les échantillons



Paramètre le plus important

Modélisation coefficient de diffusion $D(T, C_0)$

Coefficient de diffusion de l'humidité D :

1. Influence de la température : augmente avec la température

→ Modélisé par Arrhenius : $D(T) = D_0 \exp\left(-\frac{E_{a_D}}{kT}\right)$

E_{a_D} : Activation energy for the diffusion coefficient (eV)

D_i : Pre-exponential factor (mm²/s)

k : Boltzmann constant (eV/K)

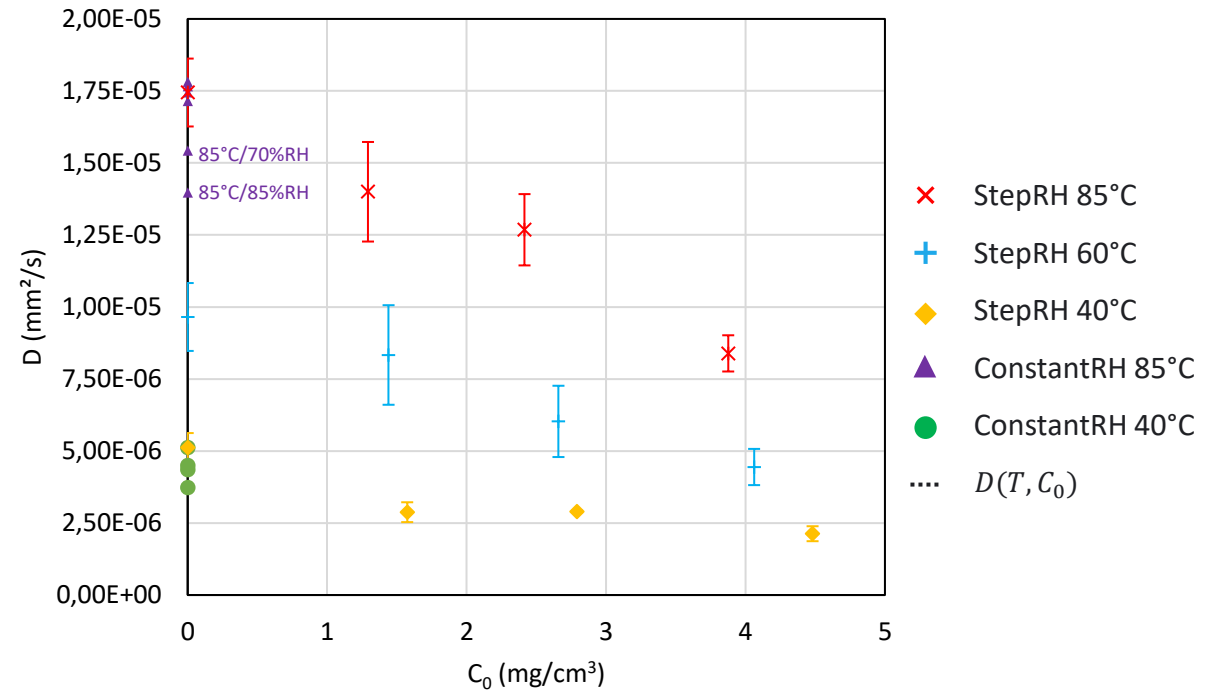
2. Influence de l'humidité : diminue avec la quantité initiale d'humidité C_0 dans la résine

→ Loi d'Arrhenius modifiée [11]:

$$D(T, C_0) = D_0(C_0) \exp\left(-\frac{E_{a_D}}{kT}\right)$$

$$D(T, C_0) = (-0,039C_0 + 0,334) \exp\left(-\frac{0,304}{kT}\right)$$

$E_{a_D} = 0,304 \text{ eV}$ ← Valeur typique pour une diffusion d'humidité dans des époxy [13]



Correlation coefficient = **0,9879 %**

Modélise avec succès les coefficients de diffusion à partir des deux tests : StepRH and ConstantRH

A l'exception de D pour ConstantRH 85°C RH>60%RH

Characterization of the bulk moisture diffusion in epoxy-based potting compounds for IGBT semiconductor power modules

1. Modèle de diffusion de l'humidité

2. Méthodes et matériaux

- Techniques de caractérisation
- Echantillons de résine de potting

3. Résultats – Résine A

- Concentration de l'humidité
- Coefficient de diffusion de l'humidité

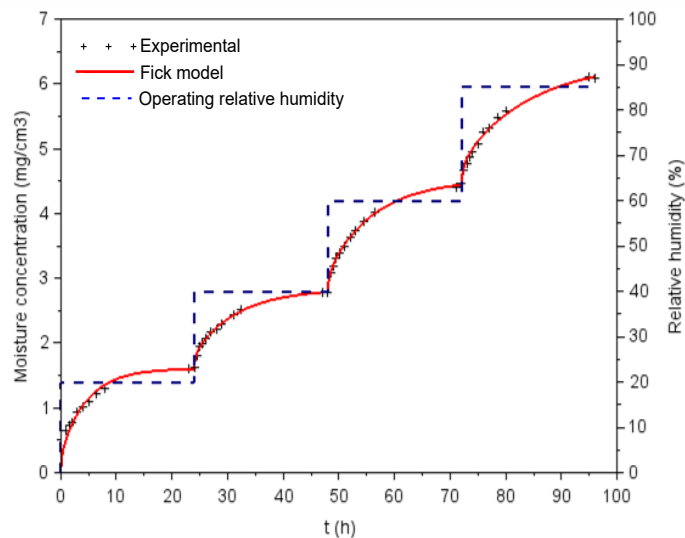
4. Résultats – Résine B

5. Conclusion et discussion



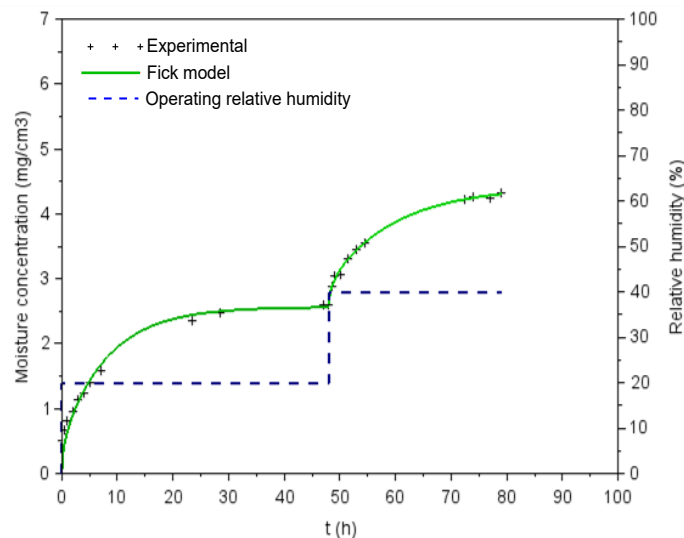
Résultats pour Résine B

StepRH 40°C – 100h – Résine A



- Saturation atteinte après 24h
- 4 conditions en RH effectuée en une semaine

StepRH 40°C – 100h – Résine B



- Saturation atteinte après 48h
- 2 conditions en RH effectuée en une semaine

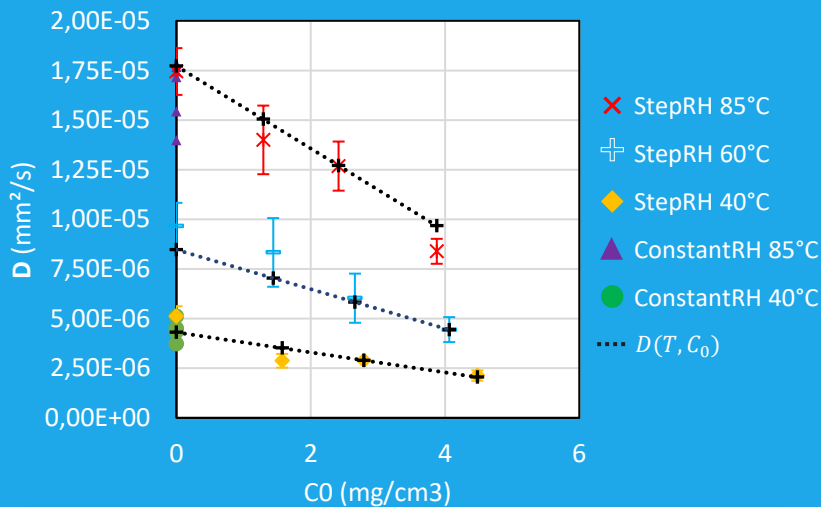
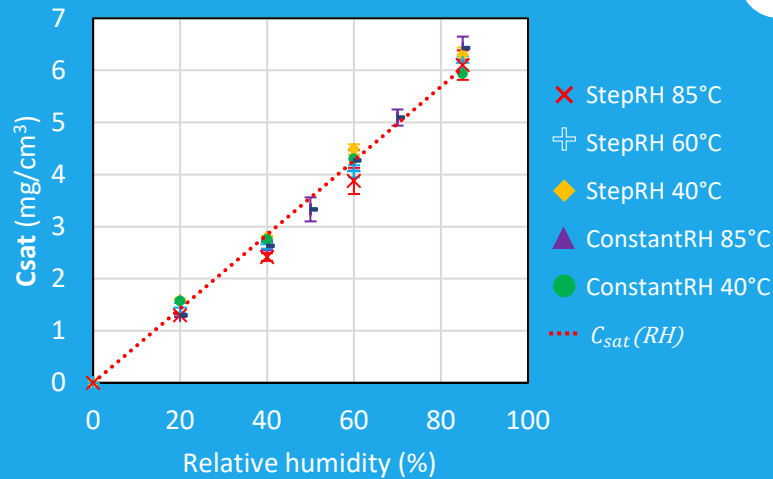
- Différence significative pour une résine similaire : diffusion plus lente et plus grande quantité d'eau absorbée

Nécessité de caractériser chaque matériau au cas par cas

		Résine A		Résine B
D (mm ² /s)	20%RH	5,12.10 ⁻⁶	-53%	2,43.10 ⁻⁶
	40%RH	2,88.10 ⁻⁶	-42%	1,67.10 ⁻⁶
Csat (mg/cm ³)	20%RH	1,57	+64%	2,57
	40%RH	2,79	+57%	4,38

$$C_{sat}(mg/cm^3) = 0,071 \times RH(\%)$$

Correlation coefficient = **0,9948 %**



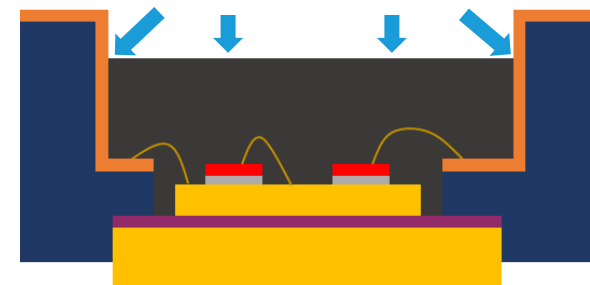
$$D(T, C_0) = (-0,039C_0 + 0,334) \exp(-0,304/kT)$$

Correlation coefficient = **0,9879 %**

$E_{a,D} = 0,304 \text{ eV}$ ← Typical moisture diffusion in epoxy [13]

Conclusion

- Utilisation de deux approches de caractérisation :
 - Permet de confirmer les tendances trouvées dans la littérature
 - ✓ Concentration de saturation en humidité dépend de l'humidité ambiante
 - ✓ La diffusion est accélérée par la température
 - Démontre une limite de la loi de diffusion de l'humidité de Fick : la diffusion d'humidité est dépendante de l'humidité déjà présente dans le matériau
 - ✓ La diffusion est ralentie par la concentration interne en humidité
- Méthodologie de caractérisation établie : StepRH (4 conditions d'humidité relative) et 3 campagnes de température → Modèles de C_{sat} et D disponibles
- Perspectives :
 1. Développement d'un coefficient de diffusion en fonction de la concentration d'humidité interne par modélisation FEM.
 2. Modélisation numérique hygrothermique du module de puissance entier dans des conditions de fonctionnement et dans différentes conditions environnementales.



- [1] <https://group.nagase.com/nagasechemtex/en/products/product-information/epoxy-material-encapsulant-power-module/>
- [2] S. Arumugam, Influence of moisture on dielectric condition of high power Insulated Gate Bipolar Transistor modules, *IEEE Trans, Dielectr, Electr, Insul*, 23 (2016) 1364–1374, <https://doi.org/10.1109/TDEI.2015.005571>.
- [3] J.-H. Peters, M. Hanf, S. Clausner, C. Zorn, N. Kaminski, Improved HV-H3TRB robustness of a 1700 V IGBT chip set in standard power modules, *Microelectron, Reliab*, 126 (2021) 114211, <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2021.114211>.
- [4] C. Zorn, N. Kaminski, Acceleration of temperature humidity bias (THB) testing on IGBT modules by high bias levels, in: 2015 IEEE 27th Int. Symp. Power Semicond. Devices ICs ISPSD, 2015: pp. 385–388, <https://doi.org/10.1109/ISPSD.2015.7123470>.
- [5] E. Kolbinger, F. Wuest, M. van Dijk, S. Trampert, K.-D. Lang, An approach for failure prediction in H3 TRB-tests, in: 2019 22nd Eur, Microelectron, Packag, Conf, Exhib, EMPC, 2019: pp. 1–5, <https://doi.org/10.23919/EMPC44848.2019.8951836>.
- [6] V. Titova, M. Lapke, Investigating Humidity Transfer in IGBT Modules: An Integrated Experimental and Simulation Approach, *IEEE Open J. Power Electron*. 5 (2024) 575–582. <https://doi.org/10.1109/OJPEL.2024.3389105>.
- [7] Q. He, Y. Yan, E. Deng, L. Xie, M. Pan, H. Liu, Y. Huang, Influence of Moisture Absorption on Power Cycling Capability of IGBT Modules, *IEEE Trans. Power Electron.* (2025) 1–10. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2025.3600245>.
- [8] Y. Kaji, K. Yamada, H. Harada, H. Rokubuichi, Y. Hanawa, J. Fujino, Encapsulation Technology of Epoxy Resin for High Temperature Operating Power Modules, in: PCIM Europe Digital Days 2021; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, 2021: pp. 1–5,
- [9] T. Glaskova-Kuzmina, R. Guedes, J. Morais, A. Aniskevich, A comparative analysis of moisture transport models as applied to an epoxy binder, *Mech, Compos, Mater*, 43 4 377-388 43 (2007) 377–388, <https://doi.org/10.1007/s11029-007-0034-y>.
- [10] X. Chen, S. Zhao, L. Zhai, Moisture Absorption and Diffusion Characterization of Molding Compound, *J, Electron, Packag*, 127 (2005) 460–465, <https://doi.org/10.1115/1.2065707>.
- [11] Z. Qiu, J. Zhang, P. Ning, X. Wen, Study on Moisture Absorption Characteristics of Power Plastic Packaging Devices, in: 2018 21st Int, Conf, Electr, Mach, Syst, ICEMS, 2018: pp. 788–791, <https://doi.org/10.23919/ICEMS.2018.8549152>.
- [12] K,M,B, Jansen, M,F, Zhang, L,J, Ernst, D,-K, Vu, L, Weiss, Effect of temperature and humidity on moisture diffusion in an epoxy moulding compound material, *Microelectron, Reliab*, 107 (2020) 113596, <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2020.113596>.
- [13] C, Jang, B, Han, S, Yoon, Comprehensive Moisture Diffusion Characteristics of Epoxy Molding Compounds Over Solder Reflow Process Temperature, *IEEE Trans, Compon, Packag, Technol*, 33 (2010) 809–818, <https://doi.org/10.1109/TCAPT.2010.2063430>.
- [14] P, Siedlaczek, G, Sinn, P, Peter, R, Wan-Wendner, H,C, Lichtenegger, Characterization of moisture uptake and diffusion mechanisms in particle-filled composites, *Polymer* 249 (2022) 124799, <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2022.124799>.

NRTW 2026

National Reliability Technology Workshop

Mercredi 1^{er} & jeudi 2 avril 2026 | Grenoble

Merci pour votre écoute !

Organisé par :

NAE
NORMANDIE
AEROSPACE - DEFENCE - SECURITY

ASTech
Paris Region

**next
move**
collaboration is the driver

Financé par :

**GRENOBLE-ALPES
MÉTROPOLE**

DGA
DIRECTION GÉNÉRALE
DE L'ARMÉE

NORMANDIE

NORMANDIE

**Paris
Ile-de-France**

**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**
Zéro
Défaut
Détour