

L'effet des  
valeurs R de  
conception  
de service

# Absorption d'humidité dans l'isolant de polystyrène

JOHN WOESTMAN

John Woestman est directeur des codes et des normes pour l'Extruded Polystyrene Foam Association (XPSA). Il possède plus de 30 ans d'expérience dans l'industrie de la construction et des produits de construction avec diverses responsabilités dans les domaines de la construction, de la fabrication, des ressources humaines et du marketing, ainsi que des codes, des normes et de la réglementation. Il détient un diplôme dans les métiers du bâtiment, un diplôme en génie mécanique ainsi qu'un MBA. Il est membre de l'International Code Council (ICC), de la National Fire Prevention Association (NFPA) et de l'ASTM International.



## Les données évaluées par des pairs suggèrent que le PSX et le PSE se comportent différemment dans les applications humides au-dessous du niveau du sol.

L'absorption d'humidité est un concept familier. Il est donc facile de comprendre les mécanismes d'absorption d'humidité dans les isolants de polystyrène. Malheureusement, certaines affirmations quant à la performance des isolants peuvent être trompeuses lorsqu'elles se basent sur des résultats d'essais obtenus avec un petit nombre d'échantillons prélevés *in situ* ou sur des extrapolations de performance à long terme à partir d'essais en laboratoire à petite échelle dont la durée et l'exposition sont limitées.

Idéalement, les ingénieurs et les rédacteurs de spécifications devraient avoir accès à des données évaluées par des pairs œuvrant au sein d'institutions scientifiques reconnues afin de départager les allégations marketing. On travaille actuellement à la mise au point d'une modélisation mathématique poussée qui aidera à prédire les performances des isolants de polystyrène dans un éventail de conditions climatiques, mais d'ici à ce qu'elle soit terminée, les études à long terme sur le terrain constituent la meilleure source d'informations fiables.

Tous les produits isolants en polystyrène permettent la diffusion de la vapeur d'eau. Toutefois, dans le cas du polystyrène expansé (PSE), l'eau liquide et la vapeur d'eau traversent le réseau de canaux entre les billes de PSE fusionnées. Ces canaux sont si petits qu'ils peuvent être considérés comme des capillaires. Ce processus de transport capillaire de l'eau liquide est beaucoup plus rapide que celui de la diffusion de la vapeur à travers la structure de mousse à alvéoles fermées. L'eau liquide peut être transportée à travers le réseau de canaux interstitiels en quelques minutes, sans trop de restrictions.

L'isolant de polystyrène extrudé (PSX) et l'isolant de PSE sont tous deux utilisés dans des applications présentant un potentiel élevé d'exposition à l'humidité, telle que les fondations, les dalles et les blocs de remblai Géofoam au-dessous du niveau du sol, ainsi que les assemblages de toiture à membrane protégée (TMP). Un drainage approprié est recommandé dans toutes les applications, mais il reste que les isolants utilisés au-dessous du niveau du sous-sol peuvent être exposés à l'eau liquide et à la vapeur d'eau pendant de nombreuses années. De façon similaire, les TMP peuvent être exposées à l'eau par intermittence pendant les saisons humides. Les isolants de PSX et de PSE absorbent tous deux une partie de l'humidité due à l'exposition à l'eau pendant de longues périodes; cependant, la recherche – réalisée depuis les années 1970 jusqu'à aujourd'hui – montre que le PSX absorbe généralement beaucoup moins d'humidité que le PSE, les différences devenant plus apparentes après environ six ans.<sup>1-2</sup>

## Comprendre la migration de l'humidité

Shanshan, Boxiong Zhang Cai et al. ont systématiquement recueilli et analysé les données de terrain et de laboratoire publiées sur l'absorption d'humidité du PSX et du PSE.<sup>1</sup> L'absorption d'humidité affecte considérablement la performance thermique de ces deux isolants similaires, mais différemment. Il est important de comprendre et de tenter de prédire l'absorption d'humidité du PSX et du PSE dans les applications humides ou mouillées, car une exposition à long terme à l'humidité entraîne généralement une réduction de la valeur R en service. Cette réduction de la valeur R est en corrélation directe avec la quantité d'humidité absorbée.<sup>2-5</sup>

L'absorption d'humidité est l'augmentation de la teneur en eau d'un matériau, généralement exprimée en pourcentage volumique ou en pourcentage massique. L'absorption d'humidité dans l'isolant de polystyrène peut se produire par capillarité de l'eau liquide, par diffusion de la vapeur d'eau et par diffusion de l'eau liquide. Le présent article décrit les différences physiques entre le PSX et le PSE, et démontre comment ces différences inhérentes affectent l'absorption d'humidité et ses mécanismes. On abordera également les défis que présente l'évaluation de l'absorption d'humidité dans le PSX et le PSE. La conclusion du présent article comporte des suggestions pour obtenir des prédictions plus précises de l'absorption d'humidité dans les applications humides des isolants de PSX et de PSE. Une plus grande précision dans les prédictions de l'absorption d'humidité en service facilitera les décisions concernant les valeurs R de conception pour l'isolant de polystyrène dans les applications humides ou mouillées au-dessous du niveau du sol.

Pour que l'humidité pénètre dans l'isolant de polystyrène et le traverse, il faut une force motrice et une voie de passage. La force motrice peut être une plus grande pression de l'eau liquide ou de la vapeur d'eau d'un côté de l'isolant par rapport à l'autre. Plus la différence de pression est grande, plus la force motrice permettant à l'humidité de traverser l'isolant est grande.

L'absorption d'humidité est dictée par les propriétés des matériaux. Tout comme la microstructure de l'isolant de polystyrène influence le transfert de chaleur, elle influence également le transport de l'humidité. Cette relation entre la microstructure et l'absorption d'humidité est particulièrement vraie pour les matériaux isolants qui peuvent absorber l'humidité grâce à divers mécanismes. Le potentiel d'absorption d'humidité d'un matériau isolant est donc une propriété importante à prendre en compte dans une conception utilisant un isolant de PSX ou de PSE (figure 1).

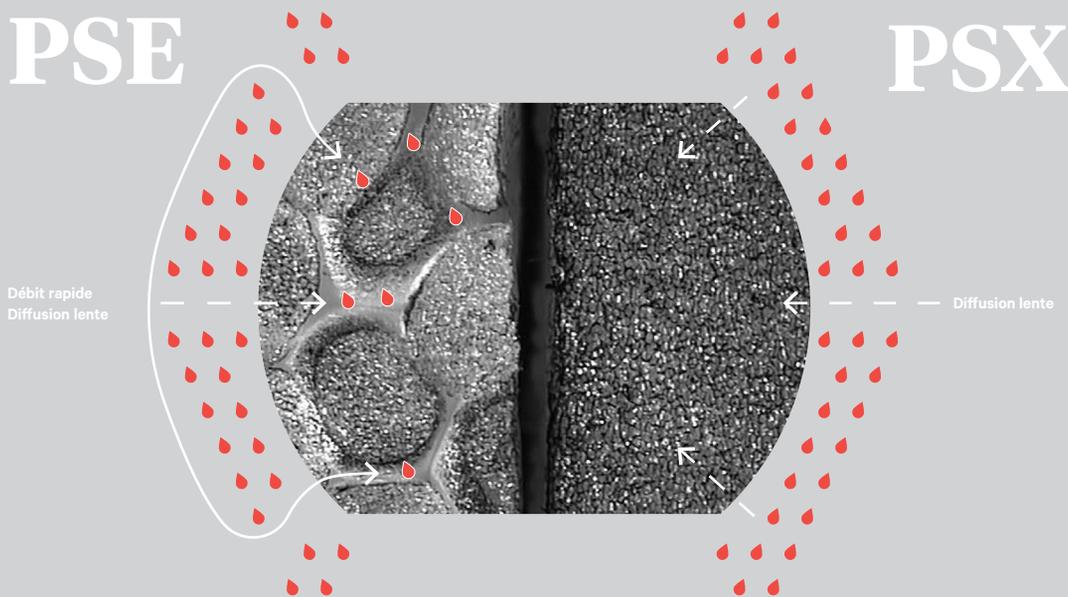
Les sources d'humidité comprennent la vapeur d'eau dans l'air ou le sol entourant l'isolant, ainsi que l'eau liquide en contact direct avec les surfaces de l'isolant. Une exposition constante à l'eau entraîne une absorption d'eau dans l'isolant de polystyrène, avec comme résultat une réduction proportionnelle de la résistivité thermique (valeur R), selon des mesures sur des échantillons extraits d'applications au-dessous du niveau du sol.<sup>2,3,6-8</sup> Dans le cas d'une exposition continue à l'humidité liquide au-dessous du niveau du sol, l'isolant risque d'être davantage compromis par des contaminants dans le sol et les cycles répétés de gel et de dégel.<sup>9-12</sup> Des ajustements aux valeurs R de conception sont nécessaires pour tenir compte de l'absorption d'humidité à long terme en contexte réel.<sup>4</sup> Il est essentiel de comprendre les effets d'une exposition continue à l'eau sur la performance thermique des isolants de polystyrène dans diverses applications au-dessous du niveau du sol.<sup>6-8</sup>

La compréhension des mécanismes de transport de l'humidité dans les mousses de polystyrène permet aux rédacteurs de spécifications de sélectionner judicieusement les matériaux pour une utilisation dans des applications humides.

## Utiliser les essais à court terme pour caractériser la performance à long terme

Prédire l'absorption d'humidité en service de l'isolant de polystyrène et son effet sur la résistance thermique est un exercice complexe, car la norme de matériaux, CAN/ULC S701.1 Norme sur l'isolant thermique en polystyrène<sup>5</sup> ne traite pas de l'absorption d'humidité en service. Les fabricants d'isolants de polystyrène s'entendent pour dire que des essais à petite échelle et à court terme – par exemple comme le prescrit la norme ASTM D2842, Standard Test Method for Water Absorption of Rigid Cellular Plastics (Méthode d'essai standard pour l'absorption d'eau des plastiques cellulaires

rigides)<sup>13</sup> ou comme l'exige la norme CAN/ULC S701.1 – ne permettent pas de prédire l'absorption d'humidité en service à long terme, ni par conséquent les effets en service à long terme sur la valeur R dans les environnements humides. Un bref examen des mécanismes d'absorption d'humidité mettra en lumière la physique derrière la migration de l'humidité pour étayer les allégations fondées sur les données.



**Figure 1**

Micrographie d'échantillons de mousse de PSE (Type XIV à gauche) et de PSX (Type IV à droite).

À droite, on peut voir une masse continue d'alvéoles de mousse fermées. À gauche, on distingue des canaux interstitiels. La surface coupée des deux échantillons de mousse est mise en évidence à l'aide d'encre noire pour améliorer le contraste de l'image. Les zones non enduites d'encre sont hors du plan de la surface coupée. Les voies auxiliaires de transport d'humidité sont représentées par des gouttelettes et des flèches.

Source : DuPont de Nemours.

## Principaux mécanismes d'absorption de l'humidité

### Action capillaire

La principale différence structurelle entre le PSX et le PSE est la présence d'un réseau de vides interstitiels entre les billes de mousse à alvéoles fermées du PSE. Malgré l'hydrophobie du polystyrène, l'eau liquide peut se déplacer à travers ces vides par une action capillaire. Étant donné que la microstructure du PSX n'a pas de vides interconnectés, peu ou pas de transport d'eau liquide se produit par action capillaire au sein du PSX.

### Diffusion de vapeur

La diffusion de la vapeur d'eau à l'intérieur et à l'extérieur de la structure alvéolaire dans l'isolant de polystyrène se produit beaucoup plus lentement que l'action capillaire.

Dans la mousse à alvéoles fermées (c'est-à-dire les billes d'isolation individuelles de PSE ou l'ensemble du panneau isolant dans le cas du PSX), les molécules d'eau peuvent se diffuser à travers les parois alvéolaires de la mousse de polystyrène et à travers le gaz à l'intérieur des alvéoles de la mousse. Dans des conditions ambiantes, le processus de diffusion est lent ; l'infiltration d'une structure de mousse à alvéoles fermées avec ne serait-ce qu'un pour cent d'eau (en volume) peut prendre des années, et autant de temps pour en extraire l'humidité.

La vitesse de mouillage ou de séchage par diffusion dépend de la teneur en humidité du milieu environnant.

En ce qui concerne le transport de l'eau liquide, aucune eau à l'état liquide ne peut s'écouler à travers la structure à alvéoles fermées de l'isolant en polystyrène. L'intrusion d'humidité dans le PSX se produit seulement par le lent processus de diffusion de la vapeur d'eau à travers la matrice d'alvéoles fermées. Aucune action capillaire ne se produit dans le PSX, à l'exception d'un effet mineur de l'accumulation d'eau liquide sur les bords coupés introduite lors de la fabrication, sans toutefois entraîner de mouvement à travers l'isolant (figure 2).

### Le problème avec le présumé séchage

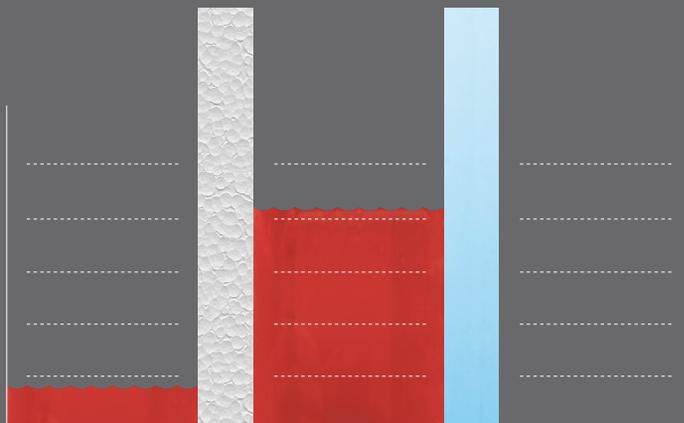
Si l'isolant de polystyrène se trouve principalement dans un environnement humide ou mouillé, un séchage efficace est hautement improbable. De nombreuses preuves compilées par Cai et al. soutiennent cette affirmation.<sup>14</sup> Le séchage de l'isolant de polystyrène dans la plupart des applications au-dessous du niveau du sol est rare; au contraire, la teneur en humidité de l'isolant augmente avec les années de service.

Figure 2

#### Expérience de l'action capillaire

Pour cette expérience, on sépare un aquarium en trois sections en insérant des panneaux de polystyrène PSE et PSX d'un pouce d'épaisseur solidement fixés aux parois à l'aide d'un scellant. De l'eau colorée est versée dans la section centrale. On constate que l'eau s'infiltré rapidement à gauche à travers le panneau PSE, mais pas à travers le panneau PSX à droite (même plusieurs jours après le début de l'expérience). Cette expérience démontre ainsi que l'eau circule plus librement à travers le panneau PSE que le panneau PSX.

Pour plus d'information technique, consultez <https://xpsa.com/technical-information/>, ainsi que le document *Technical Insights* au lien <https://xpsa.com/wp-content/uploads/2021/06/Technical-Insights-Simple-Experiments.pdf>.



## Défis de l'évaluation de l'absorption d'humidité dans le PSX et le PSE

Une fois qu'une absorption d'humidité se produit, les données à long terme suggèrent que l'eau demeure dans les isolants en mousse de polystyrène en cas d'applications humides ou mouillées au-dessous du niveau du sol. Bien que des essais à petite échelle indiquent un potentiel de drainage et de séchage, le drainage et le séchage du PSX ou du PSE dans les applications humides ou mouillées au-dessous du niveau du sol ne sont pas confirmés par des études à long terme sur le terrain.

Les essais d'exposition à court terme en laboratoire sont insuffisants pour caractériser la teneur en humidité en service pour les raisons suivantes :

- Les effets à long terme de l'exposition à l'eau ne sont pas bien représentés par les essais de laboratoire à court terme comme prescrit par la norme ASTM D2842, *Standard Test Method for Water Absorption of Rigid Cellular Plastics* (Méthode d'essai standard pour l'absorption d'eau des plastiques cellulaires rigides)<sup>13</sup>, car 24 heures d'immersion dans l'eau, selon la norme ASTM C272, n'est pas une période assez longue pour reproduire entièrement les mécanismes qui conduisent à l'absorption à long terme d'humidité sous forme de liquide et de vapeur dans l'isolant de polystyrène.
- En service, les cycles naturels de mouillage peuvent dépasser les cycles de séchage et augmenter progressivement l'absorption d'humidité au fil du temps. Cette hystérèse de mouillage/séchage de l'isolant en service n'est pas entièrement reproduite par des essais d'exposition à court terme utilisant un cycle humide/sec extrême en laboratoire.

- Connor et ses prédécesseurs ont mesuré la teneur en eau et d'autres propriétés physiques d'échantillons extraits d'applications au-dessous du niveau du sol après des années et des décennies de service dans des emplacements couvrant les zones climatiques 4 à 8.<sup>2,6-8,14-16</sup> La figure 3 résume ces données et montre le contenu d'eau mesurée (en pourcentage volumique) et les valeurs R conservées par pouce de mousse en polystyrène. Elle indique l'étendue des différences d'accumulation d'humidité dans les mousses de polystyrène après jusqu'à 30 ans de service. D'autres données évaluées par des pairs montrent que le mouillage au-dessous du niveau du sol est important et que le séchage est limité.<sup>14</sup>

La recherche suggère que les valeurs R conservées après un mouillage et un séchage extrêmes lors d'essais à court terme ne représentent pas les valeurs R réelles dans des conditions de service réelles.<sup>14,6</sup> L'une de ces affirmations est l'utilisation de la norme ASTM C1512, *Standard Test Method for Characterizing the Effect of Exposure to Environmental Cycling on Thermal Performance of Insulation Products* (Méthode normalisée d'essai de caractérisation des effets de l'exposition aux cycles environnementaux sur la performance thermique de produits isolants) pour examiner la valeur R retenue après les effets des cycles de mouillage et de séchage.<sup>10</sup> Le mouillage et le séchage prescrits par la norme ASTM C1512 représentent une exposition très limitée de 28 jours à la vapeur d'eau. Les études des données de Cai et al.<sup>14</sup> et de Connor<sup>6</sup> examinent des années et des décennies d'exposition (des milliers de jours au lieu de 28 jours).



## ENVELOPPES DU BÂTIMENT TOTALSHIELD<sup>™</sup> POUR LES BÂTIMENTS COMMERCIAUX

# FAIRE LA DIFFÉRENCE

### 1 MURS INTÉRIEURS ET INSONORISATION

Matelas insonorisants **ROSE NEXT GEN<sup>MC</sup>**  
**FIBERGLAS<sup>MD</sup>** **QUIÉTUDE<sup>MD</sup>**

ou

Isolant en laine minérale **Thermafiber<sup>MD</sup>** **SAFB<sup>MD</sup>**

Panneaux ou matelas acoustiques noirs **SelectSound<sup>MC</sup>**

Membrane insonorisante **QUIÉTUDE<sup>MD</sup>** pour planchers

### 2 MURS EXTÉRIEURS

Isolant continu **Thermafiber<sup>MD</sup>** **RainBarrier<sup>MD</sup>** avec  
résistance à la compression élevée 80/110/Max

Isolant de polystyrène extrudé rigide

**FOAMULAR<sup>MD</sup>** **NGX<sup>MC</sup>** CodeBord<sup>MD</sup>/C-200

Isolant **ROSE NEXT GEN<sup>MC</sup>** **FIBERGLAS<sup>MD</sup>**

Ruban à joints **JointSeal<sup>MC</sup>**

### 3 SOUS LA DALLE

Isolant de polystyrène extrudé rigide haute  
densité **FOAMULAR<sup>MD</sup>** **NGX<sup>MC</sup>** 400/600/1000

### 4 TOITURE

Isolant **FOAMULAR<sup>MD</sup>** **NGX<sup>MC</sup>** 350 pour toitures

### 5 MURS PÉRIMÉTRIQUES DE FONDATION

Isolant de polystyrène extrudé rigide

**FOAMULAR<sup>MD</sup>** **NGX<sup>MC</sup>** C-300

Choisir l'isolant ROSE NEXT GEN<sup>MC</sup> FIBERGLAS<sup>MD</sup>, l'isolant rigide FOAMULAR<sup>MD</sup> NGX<sup>MC</sup> et l'isolant en laine minérale Thermafiber<sup>MD</sup> de Owens Corning<sup>MD</sup> aide à créer une enveloppe du bâtiment durable et écoénergétique. Tournez-vous vers les isolants de Owens Corning pour trouver des solutions écoénergétiques, insonorisantes et efficaces en termes de coûts pour les bâtiments institutionnels, commerciaux et industriels.

Pour en savoir plus, communiquez avec les experts  
en solutions d'enveloppes du bâtiment de Owens Corning  
à l'adresse [specowenscorning.ca/joindrepretech](http://specowenscorning.ca/joindrepretech).



**QUÉBEC ET CANADA ATLANTIQUE**  
**Salvatore Ciarlo, ing.**  
Directeur des solutions architecturales  
et des services techniques, Canada  
[salvatore.ciarlo@owenscorning.com](mailto:salvatore.ciarlo@owenscorning.com)  
1 800 504-8294



**QUEST CANADIEN**  
**Luis Faria, B.Ing., PMP, CMgr MCFI**  
Directeur technique des ventes,  
Ouest canadien  
[luis.faria@owenscorning.com](mailto:luis.faria@owenscorning.com)  
1 833 258-5299

Les produits homologués GREENGUARD sont certifiés conformes aux normes établies par GREENGUARD en matière de faibles émissions de produits chimiques dans l'air intérieur durant l'utilisation des produits. Pour en savoir plus, visitez le site [ul.com/gg](http://ul.com/gg). La validation des déclarations par UL Environment confère une crédibilité de tierce partie aux déclarations environnementales fondées sur un seul attribut. \*Le contenu de 73 % de matières recyclées est basé sur le contenu moyen en verre recyclé de tous les isolants en fibre de verre en matelas, en rouleau et en vrac sans liant de Owens Corning fabriqués au Canada. LA PANTHÈRE ROSE<sup>™</sup> & © 1964-2022 Metro-Goldwyn-Mayer Studios Inc. Tous droits réservés. La couleur ROSE est une marque déposée de Owens Corning. © 2022 Owens Corning. Tous droits réservés.

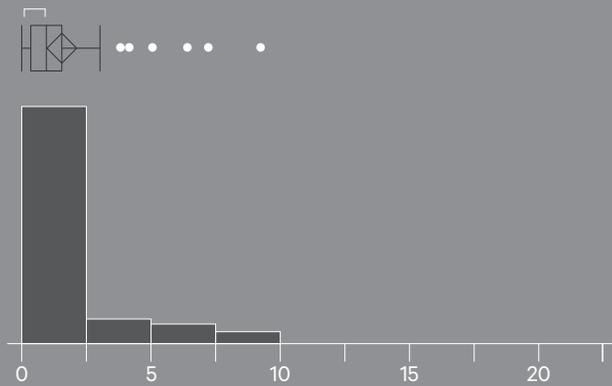


### Figure 3

Analyse statistique de l'absorption d'eau (pourcentage volumique) et de la valeur RSI conservée, panneaux PSX et PSE  
Source : DuPont de Nemours.

# PSX

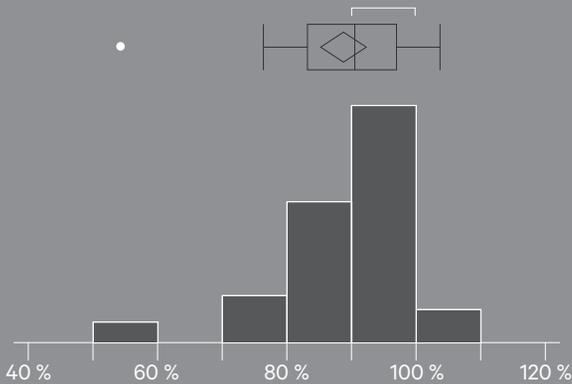
## Eau, % vol



## Sommaire statistique

Moy.	1,57
Écart-type	1,77
Erreur std. moy.	0,23
Moy. supérieure à 95 %	2,04
Moy. inférieure à 95 %	1,10
N	57,00
CV	112,30

## RSI retenue, %

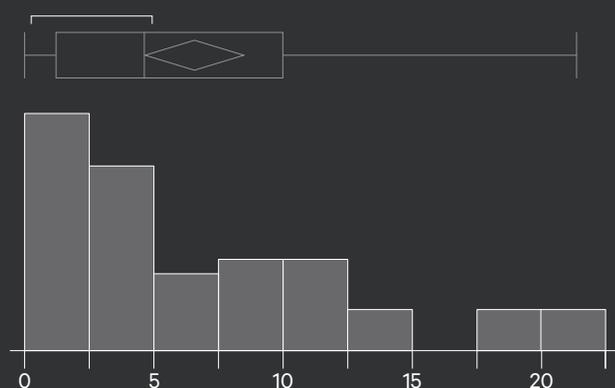


## Sommaire statistique

Moy.	0,89
Écart-type	0,09
Erreur std. moy.	0,02
Moy. supérieure à 95 %	0,92
Moy. inférieure à 95 %	0,86
N	36,00
CV	10,48

# PSE

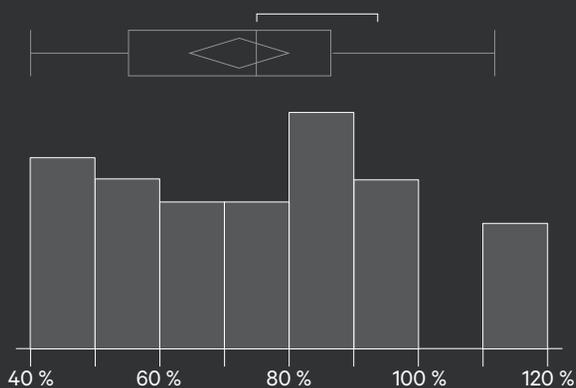
## Eau, % vol



## Sommaire statistique

Moy.	6,38
Écart-type	5,85
Erreur std. moy.	0,89
Moy. supérieure à 95 %	8,18
Moy. inférieure à 95 %	4,58
N	43,00
CV	91,72

## RSI retenue, %



## Sommaire statistique

Moy.	0,72
Écart-type	0,19
Erreur std. moy.	0,04
Moy. supérieure à 95 %	0,81
Moy. inférieure à 95 %	0,63
N	21,00
CV	26,51

## Vers une prédiction et une modélisation précises

Il existe deux voies complémentaires menant vers la prédiction des valeurs R de conception en service pour les applications de service humides ou mouillées de PSX.

La première voie consiste à accorder une plus grande attention aux essais à long terme sur le terrain<sup>6</sup>. La teneur en humidité et les valeurs R doivent être mesurées sur les échantillons au fur et à mesure qu'ils sont prélevés. C'est la pratique utilisée par Connor<sup>6</sup> et ses prédécesseurs.<sup>7,8</sup> Les données d'humidité et les valeurs R réelles sur le terrain sont beaucoup plus significatives pour les rédacteurs de spécifications et beaucoup plus utiles pour élaborer des simulations et des modèles d'absorption d'humidité.

Les résultats d'essais à long terme sur le terrain soutiennent, par exemple, les valeurs de conception du PSX et du PSE recommandées par la norme ASCE 32 pour les fondations peu profondes protégées contre le gel (FPSF).<sup>11,12</sup> Les valeurs de conception qui figurent dans la norme ASCE 32 peuvent être utilisées pour des applications au-dessous du niveau du sol avec une exposition similaire aux FPSF.

L'orientation des panneaux est également un facteur. L'isolant peut être installé verticalement ou horizontalement, ce qui a des conséquences sur l'absorption d'humidité selon l'application. Les différences dans les valeurs de conception pour les applications verticales par rapport aux applications horizontales ont été étudiées de manière approfondie et sont abordées dans la norme ASCE 32 relativement à leur application dans les fondations peu profondes protégées contre le gel.

La seconde voie implique la modélisation du comportement des différents types d'isolant. Il devrait être possible de saisir dans un modèle le type d'isolant, ainsi que des estimations des conditions saisonnières de température et d'humidité. Cela permettrait de prédire la teneur en eau et des valeurs R en fonction du temps, et d'obtenir des estimations des marges d'erreur en utilisant une base de données réelles.

La migration complexe de l'humidité à travers la structure alvéolaire de l'isolant en mousse peut être modélisée à l'aide d'un logiciel de modélisation hygrothermique. L'un des environnements de modélisation hygrothermique les plus connus pour expliquer l'absorption d'humidité des matériaux est WUFI®<sup>17</sup>, mais d'autres progiciels de modélisation hygrothermique existent également.<sup>18</sup> Notez que les caractéristiques génériques des matériaux prédéfinies dans de tels progiciels peuvent ne pas tenir compte avec précision des impacts de l'humidité absorbée sur les matériaux spécifiques.

Certains des modèles spécifiques à l'impact de l'accumulation d'humidité dans les isolants de polystyrène ont déjà été mis au point, et leur efficacité prédictive continue de croître.<sup>19,20</sup> Par exemple, Cai et al.<sup>19</sup> ont élaboré un modèle multi-échelle pour étudier les performances hygrothermiques et les facteurs d'impact de l'isolation thermique à alvéoles fermées à partir des premiers principes, et il concorde avec les données obtenues par expérimentations. Dans une autre étude, Woodcraft et al.<sup>20</sup> utilisent un modèle de conductivité thermique essentiellement dérivé, tenant compte de l'impact de l'humidité, pour ajuster les données d'études sur le terrain et d'expériences en laboratoire où des mousses isolantes ont été soumises à l'humidité sous diverses formes. L'incorporation de modèles d'impact de l'humidité sur le comportement hygrothermique des matériaux améliore la précision des modèles prédictifs.

## Résumé

Alors que les modèles d'impact de l'humidité sont progressivement intégrés dans la modélisation hygrothermique et deviennent de plus en plus courants, l'utilisation des valeurs R de conception à long terme de la norme ASCE 32 dans les applications en contact avec l'humidité demeure recommandée.

Pour le moment, il y aura probablement peu d'unanimité sur les normes d'essai de la performance à long terme des isolants de polystyrène, bien que les travaux de laboratoire et la modélisation se poursuivront afin de mettre au point des matériaux améliorés pour des applications spécifiques.

En attendant de pouvoir utiliser les modèles prédictifs mettant l'accent sur la performance thermique à long terme de l'isolation en mousse de PSX ou de PSE dans les applications humides au-dessous du niveau du sol, les concepteurs sont invités à tenir compte de la dynamique d'absorption d'humidité à long terme, de ses effets sur les performances thermiques à long terme (valeur R conservée) du PSX et du PSE, ainsi que de l'épaisseur relative requise dans ces applications. —

## Notes

<sup>1</sup> Cai, Shanshan, Boxiong Zhang et Lorenzo Cremaschi. « Moisture Behavior of Polystyrene Insulation in Below-grade Application. » *Energy and Buildings*. Volume 159. 2018. pp. 24-38.

<sup>2</sup> Dechow, FJ et KA Epstein. « Laboratory and Field Investigations of Moisture Absorption and its Effect on Thermal Performance of Various Insulations. » *Thermal Transmission Measurements of Insulation*, ASTM STP 660, R. P. Tye, Ed., American Society for Testing and Materials 1978. pp. 234-260. [https://www.astm.org/DIGITAL\\_LIBRARY/STP/PAGES/STP35747S.htm](https://www.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/STP/PAGES/STP35747S.htm).

<sup>3</sup> Woestman, John. « XPS Delivers High R-values in Below-grade Applications. » *The Construction Specifier*, août 2020.

<sup>4</sup> Cai, Shanshan, Boxiong Zhang et Lorenzo Cremaschi. « Review of Moisture Behavior and Thermal Performance of Polystyrene Insulation in Building Applications. » *Building and Environment*. Volume 123. 2017. pp. 50-65.

<sup>5</sup> CAN/ULC S701.1 Norme sur l'isolant thermique en polystyrène.

<sup>6</sup> Connor, Billy. « Comparison of Polystyrene Expanded and Extruded Foam Insulation in Roadway and Airport Embankments. » Alaska University Transportation Center, University of Alaska Fairbanks, (INE/AUTC 1908). Avril 2019. <http://autc.uaf.edu/projects/2019/comparison-of-polystyrene-expanded-and-extruded-foam-insulation-in-roadway-and-airport-embankments/>.

<sup>7</sup> Esch, David C. « Insulation Performance Beneath Roads and Airfields. » Highway Research. Fairbanks, Alaska: Alaska Department of Transportation and Public Facilities, 10. (AK-RD-87-17, décembre 1986. [http://dot.alaska.gov/stwddes/research/assets/pdf/ak\\_rd\\_87\\_17.pdf](http://dot.alaska.gov/stwddes/research/assets/pdf/ak_rd_87_17.pdf).

<sup>8</sup> Pouliot, Nadia et Yves Savard. « High-Density Expanded Polystyrene Boards as Road Insulation, Phase I, Performance Evaluation of Expanded Polystyrene on Road 161 in St-Martyrs-Canadiens. » Performance Follow-up Report, Quebec: Ministry of Transport Quebec (Rapport de suivi du rendement, Québec : Ministère des Transports du Québec.) 2003.

<sup>9</sup> Pakkala, Toni A. et Jukka Lahdensivu. « Long-term Water Absorption Tests for Frost Insulation Materials Taking into Account Frost Attack. » *Case Studies in Construction Materials*. Vol. 1. 2014. pp. 40-45.

<sup>10</sup> ASTM C1512 - 10(2015)e1, *Standard Test Method for Characterizing the Effect of Exposure to Environmental Cycling on Thermal Performance of Insulation Products*. ASTM International. 2015.

<sup>11</sup> ASCE SEI/ASCE 32-01, *Design and Construction of Frost-Protected Shallow Foundations*. 2001. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784405642.fm>.

<sup>12</sup> Crandell, Jay H. « Below-Ground Performance of Rigid Polystyrene Insulation: Review of Effective Thermal Resistivity Values. » *Journal of Cold Regions Engineering*. Volume 24. 2010. pp. 35-53.

<sup>13</sup> ASTM D2842, *Standard Test Method for Water Absorption of Rigid Cellular Plastics*.

<sup>14</sup> Kehrer, M. et J. Christian. « Measurement of Exterior Foundation Insulation to Assess Durability in Energy-saving Performance. » Oak Ridge National Laboratory; Building Technologies Research and Integration Center. 2012.

<sup>15</sup> McMaster, J.B. et G.A. Wrong. « The Role of Extruded Polystyrene in Ontario's Provincial Transportation System. » *Transportation Research Record*. 1146, 1988. pp. 10-22. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1987/1146/1146-002.pdf>.

<sup>16</sup> Ovstaas, G., S. Smith, W. Strzepek et G. Titley. « Thermal Performance of Various Insulations in Below- Earth-Grade Perimeter Application. » Dans STP 789-EB, *Thermal Insulation, Materials, and Systems for Energy Conservation in the '80s*, ed. F. Govan, D. Greason et J. McAllister. West Conshohocken, Pennsylvania : ASTM International. 1983. pp. 435-454.

<sup>17</sup> WUFI® est une famille de produits logiciels qui permet un calcul réaliste du mouvement transitoire unidimensionnel et bidimensionnel couplé de la chaleur et de l'humidité dans les murs et autres éléments de construction multicouches exposés aux intempéries naturelles. WUFI® est l'acronyme de *Wärme Und Feuchte Instationär*, qui signifie « mouvement transitoire de la chaleur et de l'humidité ».

<sup>18</sup> Melton, Paula. « Choosing the Right Hygrothermal Modeling Tool. » 2 avril 2014, extrait de <https://www.buildinggreen.com/product-review/choosing-right-hygrothermal-modeling-tool>.

<sup>19</sup> Cai, Shanshan, Haijin Guo, Boxiong Zhang, Guowen Xu, Kun Li et Lizhi Xia. « Multi-scale Simulation Study on the Hygrothermal Behavior of Closed-cell Thermal Insulation. » *Energy*. Volume 196. 1er avril 2020. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117142>.

<sup>20</sup> Valentina Woodcraft et al., ASTM STP1629 : *Performance, Properties, and Resiliency of Thermal Insulations*; DOI : 10.1520/STP162920200037, à paraître en 2021.