

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Measurement procedures for materials used in photovoltaic modules –
Part 6-2: General tests – Moisture permeation testing of polymeric materials**

**Procédures de mesure des matériaux utilisés dans les modules
photovoltaïques –
Partie 6-2: Essais génériques – Essais de perméation à l'humidité des matériaux
polymères**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2020 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester. If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11
info@iec.ch
www.iec.ch

About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigendum or an amendment might have been published.

IEC publications search - webstore.iec.ch/advsearchform

The advanced search enables to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...). It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details all new publications released. Available online and once a month by email.

IEC Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: sales@iec.ch.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 000 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 16 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

67 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

A propos de l'IEC

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des Normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

A propos des publications IEC

Le contenu technique des publications IEC est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

Recherche de publications IEC -

webstore.iec.ch/advsearchform

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Restez informé sur les nouvelles publications IEC. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et une fois par mois par email.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: sales@iec.ch.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 000 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 16 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

67 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et Définitions des publications IEC parues depuis 2002. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Measurement procedures for materials used in photovoltaic modules –
Part 6-2: General tests – Moisture permeation testing of polymeric materials**

**Procédures de mesure des matériaux utilisés dans les modules
photovoltaïques –
Partie 6-2: Essais génériques – Essais de perméation à l'humidité des matériaux
polymères**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 27.160

ISBN 978-2-8322-7921-2

**Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.
Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.**

CONTENTS

FOREWORD.....	3
INTRODUCTION.....	5
1 Scope.....	6
2 Normative references	6
3 Terms, definitions and symbols.....	7
3.1 Terms and definitions.....	7
3.2 Symbols.....	7
4 Apparatus.....	8
5 Test specimens	8
6 Procedure.....	9
7 Calculations.....	10
7.1 Determination of diffusivity and solubility of moisture	10
7.2 Determination of breakthrough constant.....	11
7.3 Variable temperature measurement	12
7.4 Variable relative humidity measurement.....	13
8 Test report.....	13
Annex A (informative) Example data	15
A.1 Example of Fickian diffusion	15
A.2 Example of failed measurement of Fickian diffusion	16
A.3 Example of non-Fickian diffusion	17
Bibliography.....	19
Figure 1 – Diagram of a diffusion cell.....	9
Figure A.1 – Example of Fickian diffusion in EVA at 85 °C and 100 % RH with a 2,84 mm thick film	16
Figure A.2 – Example of a failed data set for Fickian diffusion in polyethylene terephthalate at 22 °C and 100 % RH	17
Figure A.3 – Example of non-Fickian diffusion in a desiccant filled polyisobutylene material used as an edge seal	18

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**MEASUREMENT PROCEDURES FOR MATERIALS
USED IN PHOTOVOLTAIC MODULES –****Part 6-2: General tests –
Moisture permeation testing of polymeric materials**

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 62788-6-2 has been prepared by IEC technical committee 82: Solar photovoltaic energy systems.

The text of this International Standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
82/1659/FDIS	82/1690/RVD

Full information on the voting for the approval of this International Standard can be found in the report on voting indicated in the above table.

This document has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

A list of all parts in the IEC 62788 series, published under the general title *Measurement procedures for materials used in photovoltaic modules*, can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of this document will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific document. At this date, the document will be

- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

IMPORTANT – The 'colour inside' logo on the cover page of this publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62788-6-2:2020

INTRODUCTION

This part of IEC 62788 describes methods to measure the permeation properties of polymeric materials. The degradation of PV modules is known to go through many different corrosion processes. These degradation processes may depend upon moisture ingress into the encapsulant, edge seal, frontsheet, or backsheet materials. Typical polymeric materials used include (amongst other polymers) ethylene-vinyl acetate (EVA) and polyolefins for encapsulants, polyisobutylene (PIB) for edge seals, and polyethylene terephthalate (PET), polyvinyl fluoride (PVF), or polyvinylidene fluoride (PVDF) for backsheets. Therefore, knowing the moisture permeation characteristics of polymeric materials is relevant for module design. These properties can be determined as a function of temperature and relative humidity. With these parameters, simple scaling rules for time and distance can be used to extrapolate to the use environments.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62788-6-2:2020

MEASUREMENT PROCEDURES FOR MATERIALS USED IN PHOTOVOLTAIC MODULES –

Part 6-2: General tests – Moisture permeation testing of polymeric materials

1 Scope

This document provides methods for measuring the steady-state water vapour transmission rate (WVTR), water vapour permeability (P), diffusivity (D), solubility (S), and moisture breakthrough time (T_{10}) (defined as the time to reach 10 % of the steady state WVTR) for polymeric materials such as encapsulants, edge seals, frontsheets and backsheets. These measurements can be made at selected temperatures and humidity levels as deemed appropriate for evaluation of their performance in PV modules. Measurement is accomplished by inspection of the transient WVTR curve and by fitting it to a theoretical Fickian model. This document is best applied to monolithic films. If multilayer films are used, the D and S values are only apparent values, but the steady-state values can still be measured.

This document was written for the measurement of water permeation, but it can equally be used for other permeants such as O_2 . In this case the same diffusion equations, fitting procedures, and scaling arguments are used.

2 Normative references

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC TS 61836, *Solar photovoltaic energy systems – Terms, definitions and symbols*

ISO 2528, *Sheet materials – Determination of water vapour transmission rate (WVTR) – Gravimetric (dish) method*

ISO 9932, *Paper and board – Determination of water vapour transmission rate of sheet materials – Dynamic sweep and static gas methods*

ISO 15106-1, *Plastics – Film and sheeting – Determination of water vapour transmission Rate – Part 1: Humidity detection sensor method*

ISO 15106-2, *Plastics – Film and sheeting – Determination of water vapour transmission Rate – Part 2: Infrared detection sensor method*

ISO 15106-3, *Plastics – Film and sheeting – Determination of water vapour transmission Rate – Part 3: Electrolytic detection sensor method*

ISO 15106-4, *Plastics – Film and sheeting – Determination of water vapour transmission Rate – Part 4: Gas-chromatographic detection sensor method*

ASTM F1249-06, *Standard test method for water vapour transmission rate through plastic film and sheeting using a modulated infrared sensor*

3 Terms, definitions and symbols

For the purposes of this document, the terms and definitions the terms and definitions given in IEC TS 61836 and the following apply.

ISO and IEC maintain terminological databases for use in standardization at the following addresses:

- IEC Electropedia: available at <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: available at <http://www.iso.org/obp>

3.1 Terms and definitions

3.1.1

edge seal

polymeric material designed to be placed between two impermeable (or with extremely low permeability) frontsheet and backsheet materials to restrict moisture ingress from the sides

3.1.2

Fickian

material for which the diffusivity is constant, independent of concentration of the permeant within the experimental uncertainty

3.1.3

permeability

state or quality of a material or membrane that causes it to allow liquids or gases to pass through it

3.1.4

diffusivity

measure of the capability of a substance to be diffused or to allow something to pass by diffusion

3.2 Symbols

T	temperature [°C] or [K]
t	time from application of moisture or the start of the experiment [h]
T_{delay}	instrumental delay time [h]
T_{10}	time for WVTR to reach 10 % of its steady-state value [h]
$T_{1/2}$	time for WVTR to reach 50 % of its steady-state value [h]
l	sample thickness [mm]
H	relative humidity [%]
T_R	water vapour transmission rate [$\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$]
P	water permeability [$\text{g} \cdot \text{mm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$]
D	water diffusivity [$\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
S	water solubility [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]
K_{10}	moisture ingress breakthrough constant [$\text{cm} \cdot \text{h}^{-0.5}$]
P_0	Arrhenius permeability prefactor [$\text{g} \cdot \text{mm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$]
E_{aP}	Arrhenius permeability activation energy [$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$]
D_0	Arrhenius diffusivity prefactor [$\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
E_{aD}	Arrhenius diffusivity activation energy [$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$]

S_0	Arrhenius solubility prefactor [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]
Ea_S	Arrhenius solubility activation energy [$\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$]
$K_{0,10}$	Arrhenius moisture ingress breakthrough constant prefactor [$\text{cm}\cdot\text{h}^{-0,5}$]
Ea_{K10}	Arrhenius moisture ingress breakthrough constant activation energy [$\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$]

4 Apparatus

Any instrument capable of measuring the transient permeation through a membrane shall be used. Many examples of apparatus that are suitable for these measurements are described in ASTM F1249-06, ISO 2528, ISO 9932, ISO 15106-1, ISO 15106-2, ISO 15106-3, and ISO 15106-4. The key characteristics to look for are high precision and small timescales for the response to changes. At low permeation rates, the amount of moisture adsorbed onto instrument surfaces becomes a problem, because it limits the useful precision of some instruments.

5 Test specimens

The suitable polymer film sample thickness will depend on the transient WVTR and the instrumental setup. Typically, samples are between 0,25 mm and 2 mm thick, but other thicknesses may be used. Very low-permeability materials, such as polychlorotrifluoroethylene (PCTFE) may require much thinner films so that permeated water is detectable at low temperatures. Conversely, high-diffusivity materials (such as silicones) may need to be several millimetres thick to accurately separate the lag time, associated with transient diffusion in the polymer, from the instrumental delay. For very thick samples, care shall be taken to assess and/or minimize moisture ingress from, or egress to, the external environment from the sides of the sample. Thickness variation shall be less than $\pm 5\%$ over the sample area of interest. The suggested sample test area is between 5 cm^2 to 100 cm^2 , but other areas may be used if desired.

NOTE Masks can be provided by permeation equipment manufacturers and are typically made of an Al foil with an adhesive on one side. These masks are typically designed to reduce the transmission area from 50 cm^2 to 5 cm^2 .

Samples shall be processed or cured (if applicable) in accordance with the manufacturer's specification. Verify that the sample does not change during measurement through loss of volatiles or other chemical degradation processes in a way that could change the permeation properties relative to the intended use environment. This can be verified by comparing initial measurements with another set of measurements, made under the same conditions, on the same film, at a later date. If permeation changes with aging, one shall either only use fresh samples or aged samples and note the sample history in the test report.

Sample surfaces shall be smooth and flat with uniform thickness ($< 5\%$ variation in thickness). This can require curing (or thermal treatment) while being held between flat, planar surfaces. Masking the samples or supporting them with a mesh can be necessary during testing at higher temperatures to prevent sag or other deformations of the sample.

Some materials, particularly polyisobutylene-based edge seals, are very tacky and prone to stick to the surfaces of the measurement instrument. In this case, a thin (preferably $< 0,05\text{ mm}$), highly permeable ($50\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$), non-stick supporting film may be used. If a film like this is used, verify that it does not impact the results by measuring films of at least two different thicknesses. If the films do not impact the measurement, the steady-state WVTR will scale as $1/l$ and the transient time should scale as $1/l^2$, where l is the sample thickness.

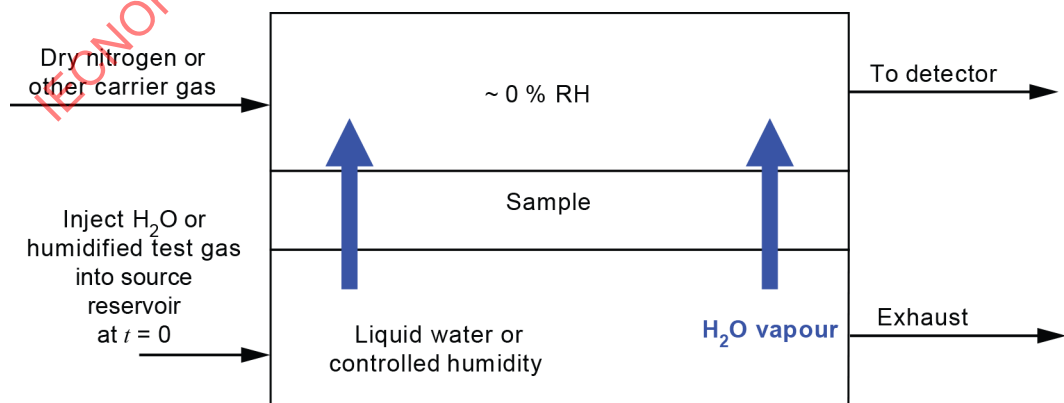
If a thicker specimen is needed, multiple layers of film may be simply stacked together in the test fixture as long as the air gap between layers is minimized. It is recommended that the laminate be run through a roll laminator or some other means to create good contact between films. This method yields acceptable results because the volume of the air gap is very low, the mole fraction of water in air is typically low, and the diffusivity of moisture in air is very high. If applying this method to other permeants, such as oxygen, small gaps between layers are likely to affect the results. Here, one shall verify the WVTR and the transient time scale as t^{-1} and t^{-2} respectively.

When measuring multilayer laminate films containing layers of different materials (e.g. a backsheet consisting of a fluoropolymer/polyethylene terephthalate/ethylene vinyl acetate), this film layering procedure shall not be used to increase the delay time for moisture ingress to determine diffusivity and solubility. Provided sufficient instrument sensitivity is present in accordance with the restrictions outlined in Clause 7, the steady-state values for WVTR and permeability can still be obtained without layering, but, in some cases, estimates of the apparent diffusivity and solubility might not be possible for a given instrument with the restrictions outlined for the time scales on the transient curves.

6 Procedure

For moisture ingress testing, sample drying in a desiccated atmosphere ($RH < 1\%$) prior to testing can be used to reduce the equilibration drying time in the instrument. The required drying time and temperature will depend on the sample diffusivity. A drying temperature of $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ is recommended for at least 48 h to 72 h for most materials. Thicker samples, or samples with low D , can take longer to dry. For samples such as edge seals with desiccants, drying might not be possible. In this case, the materials shall be used as received while taking precautions to minimize the exposure to moisture prior to testing. While being conditioned, samples should not be stacked flat on top of each other, but air should be allowed to circulate between them. Keep the sample dry until it is placed in the diffusion cell, which has been previously dried by removing residual moisture and/or purging with dry nitrogen or similar dry gas. After placing the sample in the diffusion cell, allow time for equilibration of the diffusion cell to the desired temperature.

Pass dry gas (e.g. N_2) over both sides of the sample to remove any residual moisture. Care should be taken to ensure that the gas is at the desired temperature before passing it over the film. When the cell is within $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ of the desired temperature and the WVTR is at a steady state near zero, within the detection limits of the instrument, turn off the external purge gas on the permeant source side and start monitoring moisture permeation on the detector side (see Figure 1).



IEC

Figure 1 – Diagram of a diffusion cell

For testing at 100 % RH, inject (or otherwise apply moisture as a step change) 3 ml to 10 ml of H₂O into the permeant source chamber of the cell and monitor the WVTR over time noting the time H₂O was added. Water shall not be added to the point of filling up the chamber and contacting the sample. The water should be equilibrated to the desired temperature within ± 10 °C. More than 10 ml of water may be necessary for larger films so that there is enough liquid to cover the bottom of the chamber. When the WVTR has reached steady state, the experiment can be terminated.

Experiments may also be conducted at humidity levels below 100 %. Any method that can produce a step change in humidity may be used. The step change in humidity shall be short enough to reach at least 90 % of the desired value in a time less than $0,05 \cdot T_{1/2}$, where $T_{1/2}$ is the time at which WVTR ($T_{1/2}$) is half of the WVTR at steady state.

EXAMPLE Controlled humidity step change can be accomplished by placing the test cell in a chamber with controlled temperature and humidity. Dry nitrogen or air is blown through the side of the film where the water will be sourced. Care is taken such that the tubes go through the chamber for a sufficient length of time to thermally equilibrate the gas before it contacts the test cell. This could require one to place a thermocouple in the N₂ flow to make this determination. Once thermal equilibration is achieved, and the permeated moisture rate is below detection, air is pulled out of the water source side using a pump allowing the humidified air in the chamber to enter the test cell. The vacuum pressure must be low enough that it will not deform the sample..

The time to be considered adequately close to the steady state shall be at least $4 \cdot T_{1/2}$, but preferably greater than $8 \cdot T_{1/2}$ for Fickian materials. For non-Fickian materials (e.g. edge seal materials loaded with desiccant), this steady-state time may not need to be as long because a more abrupt curve is typically obtained. For non-Fickian materials, a duration of at least $4 \cdot T_{1/2}$ shall elapse, or alternatively if the WVTR has not changed by more than 5 % over a time period of $0,5 T_{1/2}$, then sufficient data has been collected and the test can be terminated.

The diffusivity and solubility of moisture in the material, along with the instrument capabilities affect the thickness of the sample needed for measurement. The half-time $T_{1/2}$ shall be 10 times greater than the instrument delay time (T_{delay}) to determine the diffusion coefficient or the breakthrough time T_{10} . If the half-time $T_{1/2} < 10 T_{\text{delay}}$, then increase the sample thickness and retest. The $T_{1/2}$ should vary with the square of the sample thickness so a fourfold increase in $T_{1/2}$ should be obtained for a doubling of the sample thickness. Conversely, the sample thickness may need to be reduced if the permeation rate is below the detection limit of the instrument or if adsorption of moisture on instrument surfaces contributes unpredictably to the instrumental delay time (T_{delay}).

7 Calculations

7.1 Determination of diffusivity and solubility of moisture

An example of how to calculate diffusivity and solubility is given in Annex A. The instrument delay time T_{delay} accounts for the fact that for a specific instrument, with a specified flow rate, at a given permeation rate, there will be a delay between when moisture permeates a film and when it is detected. This value should vary approximately inversely with the carrier gas flow rate, and typically (but not always) is independent of sample thickness and permeation properties. For very low permeation rates, T_{delay} may further be affected by adsorption on the instrument surfaces. This value shall be determined using one of several methods: as a constant for an instrumental configuration by measuring two samples of a material with different thicknesses (l) at the same conditions and fitting the same set of values for D , S , and T_{delay} to the two data sets. Alternatively, T_{delay} may be determined by measuring the same Fickian film at several temperatures and fitting them using the same value for T_{delay} after fitting to an Arrhenius curve to obtain a straight line. An upper limit for T_{delay} can be determined by measurement of a thin film with a very short transient.

The diffusion shall be considered Fickian if (ignoring instrumental re-zeroing or similar noise) the WVTR (T_R) data closely fits Equation (1),

$$T_R(t) = \frac{DS}{l} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n e^{\left(-\frac{Dn^2\pi^2t}{l^2} \right)} \right] \quad (1)$$

where l is the film thickness and t is the time defined as the difference between the time the moisture was added and T_{delay} .

When using Equation (1), the terms for n shall be used up to at least $n = 15$, but values of 50 to 100 are recommended. This equation is only applicable for Fickian materials where the diffusion constant is independent from concentration.

The best-fit to Equation (1) can be determined by minimizing the sum of the square residuals, $\sum \{[\text{measured } T_R(t)] - [T_R(t) \text{ from Equation 1}]\}^2$. A visual fit only of the data is acceptable also. Either of these methods is easily accomplished by using a spreadsheet. It is suggested that the spreadsheet be set up allowing the data to be fitted by adjusting the parameters $D \cdot S / l$ and D / l^2 . These parameters can be independently and visually fit to the equation more easily. The quantity $D \cdot S / l$ is the steady-state WVTR and is fitted first. This is followed by fitting the quantity D / l^2 , which is the characteristic diffusion time and is adjusted to match the lag in permeation.

Values for D and S shall only be determined with this method for Fickian materials. When making this determination, a minimum of 10 data points shall be taken, at even intervals, before $4 \cdot T_{1/2}$. A material is considered Fickian if the difference between the measured and calculated values has an error that is less than 5 % of the steady-state WVTR at all points (instrumental transients, such as those caused by re-zeroing, may be ignored in this determination) (see Figure A.1 and Figure A.2 for examples). Often, a laminate material may have a single low-permeability layer that dominates the transient permeation resulting in a composite structure with the appearance of being Fickian. In the case of any laminate film, the diffusivity and solubility shall be reported as being only apparent properties (D_{app} , and S_{app}).

Permeability (P), or specific T_R , is defined as $P = D \cdot S = T_R \cdot l$. Because this quantity is not dependent on sample thickness, on the transient permeation time, or on the non-Fickian nature of a material, it can often be a better property (than WVTR) for intercomparison of different materials. Permeability values shall be reported after the material has reached steady state.

7.2 Determination of breakthrough constant

Examples of how to calculate the breakthrough time are given in Annex A. For materials used as edge seals, or for low-diffusivity encapsulants intended to be used to similarly reduce moisture ingress, the 10 % breakthrough constant K_{10} , relates the distance, X , for moisture permeation at a constant temperature and relative humidity to elapsed time as,

$$X = K_{10} \sqrt{\tau} \quad (2)$$

This value is determined by substituting the film thickness l for X as

$$K_{10\%} = \frac{l}{\sqrt{\tau_{10}}} \quad (3)$$

where τ_{10} is the time where the transient WVTR reaches 10 % of its steady-state value (see Clause A.3). Substitution of X and l is a good approximation for the case of a low-diffusivity edge seal used with a high-diffusivity and/or high-solubility encapsulant, because once moisture gets through the edge seal it will be quickly diffused away making the concentration on the other side of the edge seal effectively zero. This situation is well represented by the transient diffusion through a film as they are both one-dimensional diffusion situations. For the case of an encapsulant without an edge seal, this relationship is only approximate and intended to give a rough relative estimate of how far moisture would be expected to permeate.

The value of K_{10} can be computed for fickian or non-Fickian materials, see Figure A.1 and Figure A.3. For Fickian materials, $K_{10} = 3,89 \cdot D^{0,5}$.

7.3 Variable temperature measurement

With permeation equipment designed to operate at variable temperatures, an Arrhenius activation energy may be computed for the moisture permeation parameters, including a prefactor and an activation energy as:

$$D(T) = D_o e^{\left(\frac{-Ea_D}{RT}\right)} \quad \text{or} \quad \ln(D) = \left(\frac{-Ea_D}{R}\right) \left(\frac{1}{T}\right) + \ln(D_o) \quad (4)$$

$$S(T) = S_o e^{\left(\frac{-Ea_S}{RT}\right)} \quad \text{or} \quad \ln(S) = \left(\frac{-Ea_S}{R}\right) \left(\frac{1}{T}\right) + \ln(S_o) \quad (5)$$

$$P(T) = P_o e^{\left(\frac{-Ea_P}{RT}\right)} \quad \text{or} \quad \ln(P) = \left(\frac{-Ea_P}{R}\right) \left(\frac{1}{T}\right) + \ln(P_o) \quad (6)$$

$$K_{10}(T) = K_{o,10} e^{\left(\frac{-Ea_{K10}}{RT}\right)} \quad \text{or} \quad \ln(K_{10}) = \left(\frac{-Ea_{K10}}{R}\right) \left(\frac{1}{T}\right) + \ln(K_{o,10}) \quad (7)$$

In Equations (4) to (7), Ea_D , Ea_S , Ea_P , and Ea_{K10} are the activation energies, and D_o , S_o , P_o , $K_{o,10}$ are the prefactors for diffusivity, solubility, permeability, and the 10 % breakthrough constant, respectively. Plot the natural logarithm of the relevant parameter vs T^{-1} in K^{-1} and compute the least squares fit slope of the line. A minimum of three temperatures spanning at least 30 °C shall be used. The activation energy is thus calculated as the slope multiplied by the universal gas constant, $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ and the prefactor as the exponent of the intercept. The uncertainty in these factors shall be calculated accounting for the uncertainty in the individual data points and in the fit of the line on the Arrhenius plot.

Some materials can have a different Arrhenius curve above and below a phase transition. This is especially likely if the material goes through a melt transition. In this case, the relevant temperature range of applicability shall be reported.

NOTE For a Fickian material, the activation energy $Ea_{K10} = 0,5 \cdot Ea_D$ and $K_{o,10} = 3,89 \cdot D_o^{0,5}$. But, for a desiccant-filled material (e.g. a typical edge seal material) where the amount of water adsorbed in the desiccant is much greater than the amount of water dissolved in the polymer matrix, $Ea_{K10} = 0,5 \cdot Ea_P$ [2]¹.

7.4 Variable relative humidity measurement

Some instruments may be equipped to expose samples to variable controlled humidity levels. For Fickian materials, this will also allow one to determine the solubility as a function of relative humidity. When fitting variable humidity data, the diffusivity measurements shall be constant for a given temperature, otherwise the material is not considered Fickian even if Equation (1) can be fitted within an uncertainty of 5 % of the WVTR for each individual data set. For a given temperature, the measured diffusivity shall not vary by more than 10 % over a humidity change of 50 % RH to be considered Fickian. To report as Fickian, measurements shall be made over an RH span of at least 50 % with at least 3 measurement points.

If the solubility is linear with relative humidity, one can simply state so. Otherwise, the solubility values for each relative humidity at a given temperature shall be individually reported or if another functional form fits the data, it may be provided with the appropriate constants. A typical functional form is a power law relationship between solubility and RH. It is possibly, though less likely, that a material with a non-linear solubility with RH could be Fickian. If a material is determined to not be Fickian, only the individual measurements from each condition of T and RH shall be reported.

8 Test report

A report of the tests, with measured performance characteristics, shall be prepared by the test agency. Each test report shall include at least the following information:

- a) a title;
- b) name and address of the test laboratory and location where the tests were carried out;
- c) unique identification of the report and of each page;
- d) name and address of client, where appropriate;
- e) description of the sample construction and identification of the item tested, including specimen thickness, temperature and humidity setpoints used;
- f) characterization and condition of the test item; including the method and details of specimen preparation (including, if applicable, curing, lamination, sample history or similar processing) and any preconditioning;
- g) date of receipt of test item and date(s) of test, where appropriate;
- h) identification of test instrument used;
- i) reference to sampling procedure, where relevant;
- j) any deviations from, additions to, or exclusions from, the test method and any other information relevant to a specific test (e.g. sample preparation or permeant type);
- k) measurements, examinations and derived results supported by tables, graphs, sketches and photographs as appropriate (e.g. Arrhenius plots or plots of reported parameters as a function of temperature or humidity);
- l) calculated, or measured values of the following parameters and constants with calculated uncertainties as applicable:
 - 1) for individual measurements report as applicable:
 - i) T [°C]
 - ii) RH [%]

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

- iii) T_R [$\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$]
 - iv) P [$\text{g} \cdot \text{mm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$]
 - v) D [$\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
 - vi) S [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]
 - vii) K_{10} [$\text{cm} \cdot \text{h}^{-0,5}$]
- 2) for a series of measurements, report the temperature and RH range used, and as applicable:
- i) P_o [$\text{g} \cdot \text{mm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$]
 - ii) Ea_P [$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$]
 - iii) D_o [$\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
 - iv) Ea_D [$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$]
 - v) S_o [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]
 - vi) Ea_S [$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$]
 - vii) $K_{o,10}$ [$\text{cm} \cdot \text{h}^{-0,5}$]
 - viii) Ea_{K10} [$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$]
- m) for specimens composed of multiple layers, indicate that the measured permeation parameters are apparent values only using the subscript “_{eff}” attached to all symbols (e.g. D_{eff});
- n) a statement as to whether or not the material is considered Fickian;
- o) a statement of the estimated uncertainty of the test results (where relevant);
- p) a signature and title, or equivalent identification of the person(s) accepting responsibility for the content of the report, and the date of issue;
- q) where relevant, a statement to the effect that the results relate only to the items tested;
- r) a statement that the report shall not be reproduced except in full, without the written approval of the laboratory.

Annex A (informative)

Example data

A.1 Example of Fickian diffusion

EVA follows the Fickian model:

$$T = 85\text{ °C}$$

$$RH = 100\%$$

$$l = 2,84\text{ mm}$$

$$T_R = 114\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$$

$$D = 6,1 \times 10^{-6}\text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$$

$$S = 0,006\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$$

$$P = 324\text{ g}\cdot\text{mm}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$$

$$K_{10} = 0,634\text{ cm}\cdot\text{h}^{-0,5}$$

Report the range of temperature used for the Arrhenius fit $[=]$ °C:

$$P_o = 4,1 \cdot 10^{10}\text{ g}\cdot\text{mm}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$$

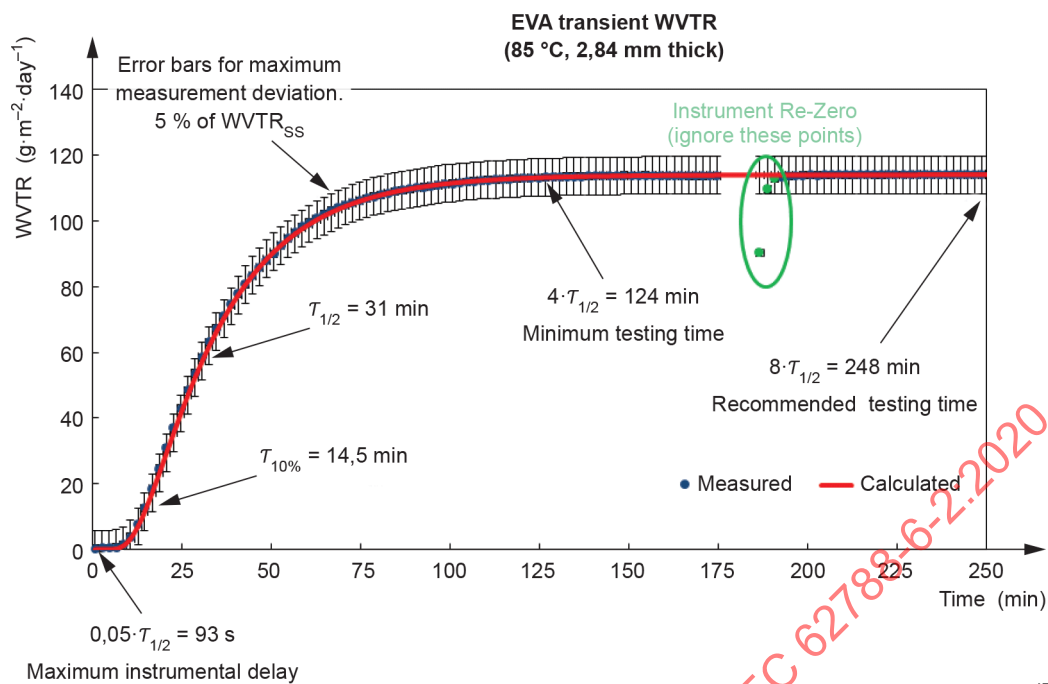
$$Ea_P = 55\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$$

$$D_o = 2,3\text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$$

$$Ea_D = 38\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$$

$$S_o = 1,8\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$$

$$Ea_S = 17\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$$

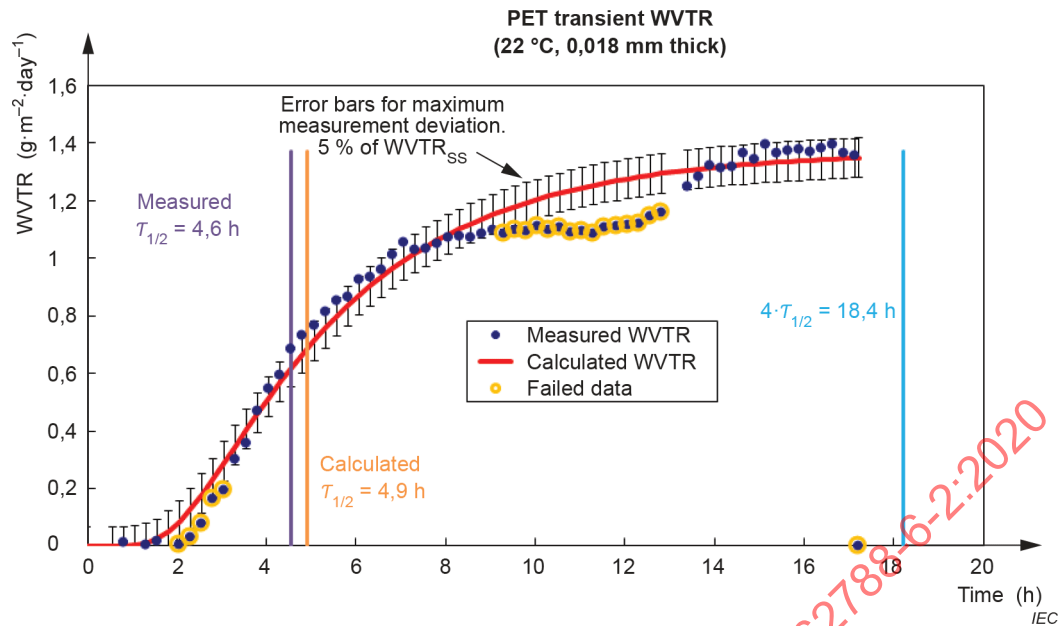


NOTE There is an instrument re-zero event at 185 min.

Figure A.1 – Example of Fickian diffusion in EVA at 85 °C and 100 % RH with a 2,84 mm thick film

A.2 Example of failed measurement of Fickian diffusion

This measurement of a polyethylene terephthalate (PET) film failed to enable measurement of diffusivity and solubility. There was an insufficient amount of data taken, and there are a large number of data points that lie outside of the $\pm 5\%$ of the $T_{R,SS}$ limit. However, the instrumental delay of 80 s was well within the maximum of $0,05 \cdot T_{1/2} = 0,05 \cdot 16\,000\text{ h} = 800\text{ h}$. The large amount of instrumental noise also results in a significantly different measured $T_{1/2}$ compared to that obtained with the theoretical calculation.



More data is needed to get up to a total time of $4 \cdot T_{1/2}$, and there are data points that deviate by more than $0,05 \cdot T_{\text{R,SS}}$ from the calculated curve.

Figure A.2 – Example of a failed data set for Fickian diffusion in polyethylene terephthalate at 22 °C and 100 % RH

A.3 Example of non-Fickian diffusion

Filled PIB film:

$$T = 38 \text{ °C}$$

$$RH = 100 \%$$

$$l = 0,10 \text{ mm}$$

$$T_{\text{R}} = 0,29 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$$

$$P = 0,29 \text{ g} \cdot \text{mm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$$

$$P_0 = 4,11 \cdot 10^9 \text{ g} \cdot \text{mm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$$

$$E_{\text{aP}} = 60,4 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$K_{10} = 0,00204 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-0,5}$$

$$K_{\text{o},10} = 2500 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-0,5}$$

$$E_{\text{aK}10} = 35 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

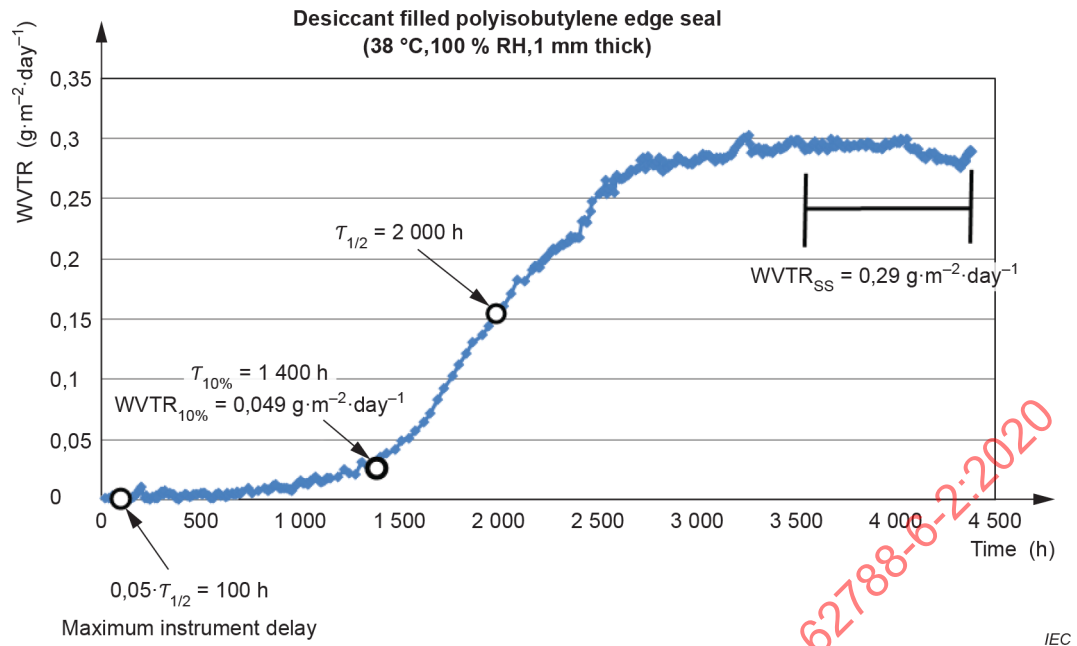


Figure A.3 – Example of non-Fickian diffusion in a desiccant filled polyisobutylene material used as an edge seal

Bibliography

- [1] Crank, J, 1975, *The mathematics of diffusion*, Oxford [England]: Clarendon Press, 1975
- [2] Kempe, Michael, Panchagade, Dhananjay, Reese, Matthew, and Dameron, Arrelaine, 2014 *Modeling moisture ingress through polyisobutylene-based edge-seals*. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, p. DOI: 10.102/pip.2465
- [3] IEC 61730-1, *Photovoltaic (PV) module safety qualification – Part 1: Requirements for construction*

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62788-6-2:2020

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	21
INTRODUCTION.....	23
1 Domaine d'application	24
2 Références normatives	24
3 Termes, définitions et symboles	25
3.1 Termes et définitions	25
3.2 Symboles	25
4 Appareillage	26
5 Éprouvettes d'essai	26
6 Procédure.....	27
7 Calculs	29
7.1 Détermination de la diffusivité et de la solubilité de l'humidité.....	29
7.2 Détermination de la constante de traversée	30
7.3 Mesurage des températures variables.....	30
7.4 Mesurage de l'humidité relative variable	31
8 Rapport d'essai	32
Annexe A (informative) Exemples de données	34
A.1 Exemple de diffusion fickienne	34
A.2 Exemple d'échec de mesurage d'une diffusion fickienne	35
A.3 Exemple de diffusion non fickienne	36
Bibliographie.....	38
Figure 1 – Schéma d'une cellule de diffusion	28
Figure A.1 – Exemple de diffusion fickienne dans l'EVA à 85 °C et une humidité relative de 100 % avec un film d'une épaisseur de 2,84 mm	35
Figure A.2 – Exemple d'ensemble de données d'échec pour une diffusion fickienne en polyéthylène téréphtalate à 22 °C et une humidité relative de 100 %	36
Figure A.3 – Exemple de diffusion non fickienne dans un matériau en polyisobutylène rempli de déshydratant utilisé comme joint d'étanchéité périphérique	37

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

PROCÉDURES DE MESURE DES MATÉRIAUX UTILISÉS
DANS LES MODULES PHOTOVOLTAÏQUES –Partie 6-2: Essais génériques –
Essais de perméation à l'humidité des matériaux polymères

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. À cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale IEC 62788-6-2 a été établie par le comité d'études 82 de l'IEC: Systèmes de conversion photovoltaïque de l'énergie solaire.

Le texte de cette Norme internationale est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
82/1659/FDIS	82/1690/RVD

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette Norme internationale.

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 62788, publiées sous le titre général *Procédures de mesure des matériaux utilisés dans les modules photovoltaïques*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de ce document ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives au document recherché. À cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé,
- remplacé par une édition révisée, ou
- amendé.

IMPORTANT – Le logo "colour inside" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62788-6-2:2020

INTRODUCTION

La présente partie de l'IEC 62788 décrit des méthodes de mesure des propriétés de perméation des matériaux polymères. La dégradation des modules PV est réputée passer par de nombreux processus différents de corrosion. Ces processus de dégradation peuvent dépendre de l'infiltration d'humidité dans l'encapsulant, le joint d'étanchéité périphérique et les matériaux de couche avant ou arrière. Les matériaux polymères types utilisés comprennent (entre autres) l'éthylène-acétate de vinyle (EVA – *ethylene–vinyl acetate*) et les polyoléfines pour les encapsulants, le polyisobutylène (PIB) pour les joints d'étanchéité périphériques, et le polyéthylène téréphtalate (PET), le fluorure de polyvinyle (PVF– *polyvinyl fluoride*) ou le polyfluorure de vinylidène (PVDF) pour les couches arrière. Par conséquent, la connaissance des caractéristiques de perméation à l'humidité des matériaux polymères est pertinente pour la conception des modules. Ces propriétés peuvent être déterminées en fonction de la température et de l'humidité relative. Ces paramètres permettent d'utiliser des règles simples de mise à l'échelle de temps et de distance pour extrapoler les environnements d'utilisation.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62788-6-2:2020

PROCÉDURES DE MESURE DES MATÉRIAUX UTILISÉS DANS LES MODULES PHOTOVOLTAÏQUES –

Partie 6-2: Essais génériques – Essais de perméation à l'humidité des matériaux polymères

1 Domaine d'application

Le présent document fournit des méthodes de mesure du coefficient de transmission de la vapeur d'eau (WVTR – *water vapour transmission rate*) en régime établi, de la perméabilité de la vapeur d'eau (P), de la diffusivité (D), de la solubilité (S) et du temps d'infiltration de l'humidité (T_{10}) (défini comme étant le temps permettant d'atteindre 10 % du WVTR en régime établi) pour les matériaux polymères tels que les encapsulants, les joints d'étanchéité périphériques et les couches avant et arrière. Ces mesurages peuvent être effectués à des températures et niveaux d'humidité choisis jugés appropriés pour l'évaluation de leurs performances dans les modules PV. Le mesurage est effectué par l'examen de la courbe du WVTR transitoire et par l'ajustement de cette courbe au modèle fickien théorique. Le présent document présente la meilleure application aux films monolithiques. Si des films multicouches sont utilisés, les valeurs de D et S sont uniquement des valeurs apparentes, mais les valeurs en régime établi peuvent tout de même être mesurées.

Le présent document a été élaboré pour traiter du mesurage de la perméation à l'eau, mais il peut également être utilisé pour d'autres perméants tels que l' O_2 . Dans ce cas, les mêmes équations de diffusion, procédures d'ajustement et motifs de mise à l'échelle sont utilisés.

2 Références normatives

Les documents suivants cités dans le texte constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC TS 61836, *Solar photovoltaic energy systems – Terms, definitions and symbols* (disponible en anglais seulement).

ISO 2528, *Matériaux en feuilles – Détermination du coefficient de transmission de la vapeur d'eau – Méthode (de la capsule) par gravimétrie*

ISO 9932, *Papier et carton – Détermination du coefficient de transmission de la vapeur d'eau des matériaux en feuille – Méthode dynamique par balayage de gaz et méthode statique*

ISO 15106-1, *Plastiques – Film et feuille – Détermination du coefficient de transmission de vapeur d'eau – Partie 1: Méthode utilisant un détecteur d'humidité*

ISO 15106-2, *Plastiques – Film et feuille – Détermination du coefficient de transmission de vapeur d'eau – Partie 2: Méthode utilisant un détecteur infrarouge*

ISO 15106-3, *Plastiques – Film et feuille – Détermination du coefficient de transmission de vapeur d'eau – Partie 3: Méthode utilisant un détecteur électrolytique*

ISO 15106-4, *Plastiques – Film et feuille – Détermination du coefficient de transmission de vapeur d'eau – Partie 4: Méthode utilisant un détecteur à chromatographie en phase gazeuse*

ASTM F1249-06, *Standard test method for water vapour transmission rate through plastic film and sheeting using a modulated infrared sensor*

3 Termes, définitions et symboles

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions de l'IEC TS 61836 ainsi que les suivants s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <http://www.iso.org/obp>

3.1 Termes et définitions

3.1.1

joint d'étanchéité périphérique

matériau polymère conçu pour être placé entre deux matériaux imperméables (ou à très faible perméabilité) de couche avant et de couche arrière afin de limiter l'infiltration d'humidité par les côtés

3.1.2

fickien

matériau dont la diffusivité est constante, indépendamment de la concentration du perméant dans les limites de l'incertitude expérimentale

3.1.3

perméabilité

état ou qualité d'un matériau ou d'une membrane permettant à des liquides ou gaz de le ou la traverser

3.1.4

diffusivité

mesure de la capacité d'une substance à être diffusée ou à permettre quelque chose de la traverser par diffusion

3.2 Symboles

T	température [°C] ou [K]
t	temps entre l'application de l'humidité et le début de l'expérience [h]
T_{delay}	temps instrumental de retard [h]
T_{10}	temps permettant au WVTR d'atteindre 10 % de sa valeur en régime établi [h]
$T_{1/2}$	temps permettant au WVTR d'atteindre 50 % de sa valeur en régime établi [h]
l	épaisseur de l'échantillon [mm]
H	humidité relative [%]
T_R	coefficient de transmission de la vapeur d'eau [$\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{jour}^{-1}$]
P	perméabilité de l'eau [$\text{g} \cdot \text{mm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{jour}^{-1}$]
D	diffusivité de l'eau [$\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
S	solubilité de l'eau [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]
K_{10}	constante de la traversée d'infiltration d'humidité [$\text{cm} \cdot \text{h}^{-0,5}$]
P_0	préfacteur d'Arrhenius pour la perméabilité [$\text{g} \cdot \text{mm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{jour}^{-1}$]

Ea_P	énergie d'activation d'Arrhenius pour la perméabilité [$\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$]
D_o	préfacteur d'Arrhenius pour la diffusivité [$\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$]
Ea_D	énergie d'activation d'Arrhenius pour la diffusivité [$\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$]
S_o	préfacteur d'Arrhenius pour la solubilité [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]
Ea_S	énergie d'activation d'Arrhenius pour la solubilité [$\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$]
$K_{o,10}$	préfacteur d'Arrhenius pour la constante de traversée d'infiltration d'humidité [$\text{cm}\cdot\text{h}^{-0,5}$]
Ea_{K10}	énergie d'activation d'Arrhenius pour la constante de traversée d'infiltration d'humidité [$\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$]

4 Appareillage

Tout instrument capable de mesurer la perméation transitoire au travers d'une membrane doit être utilisé. Les normes ASTM F1249-06, ISO 2528, ISO 9932, ISO 15106-1, ISO 15106-2, ISO 15106-3 et ISO 15106-4 décrivent de nombreux exemples d'appareillages adaptés à ces mesurages. Les principales caractéristiques recherchées sont la haute précision et les petites échelles de temps pour la réponse aux changements. À de faibles taux de perméation, la quantité d'humidité adsorbée sur les surfaces de l'instrument devient problématique, car elle limite la précision utile de certains instruments.

5 Éprouvettes d'essai

L'épaisseur appropriée de film polymère dépend du WVTR transitoire et du montage instrumental. En règle générale, les échantillons ont une épaisseur comprise entre 0,25 mm et 2 mm, mais d'autres épaisseurs peuvent être utilisées. Les matériaux à très faible perméabilité, tels que le polychlorotrifluoroéthylène (PCTFE), peuvent exiger des films bien plus fins de sorte à détecter le perméant d'eau à basse température. À l'inverse, les matériaux à diffusivité élevée (tels que les silicones) peuvent nécessiter une épaisseur de quelques millimètres pour séparer de manière précise le temps de réponse, associé à la diffusion transitoire dans le polymère, et le retard instrumental. Pour les échantillons très épais, une attention doit être portée à l'évaluation et/ou la réduction de l'infiltration d'humidité dans l'environnement externe, ou de l'évacuation d'humidité de l'environnement externe, par les côtés de l'échantillon. La variation de l'épaisseur doit être inférieure à $\pm 5\%$ sur la surface concernée d'échantillon. La surface d'essai d'échantillon proposée est comprise entre 5 cm^2 et 100 cm^2 , mais d'autres surfaces peuvent être utilisées si cela est souhaité.

NOTE Des masques peuvent être fournis par les fabricants d'équipements de perméation, et ils sont généralement constitués d'une feuille d'aluminium dont un côté est couvert d'adhésif. Ces masques sont généralement conçus pour réduire la transmission surfacique en la faisant passer de 50 cm^2 à 5 cm^2 .

Les échantillons doivent être traités ou durcis (le cas échéant) conformément aux spécifications du fabricant. Vérifier que l'échantillon ne change pas au cours du mesurage par le biais de pertes de matières volatiles ou d'autres processus de dégradation chimique pouvant modifier les propriétés de perméation relatives à l'environnement d'utilisation prévu. Cette vérification peut être effectuée en comparant les mesurages initiaux à un autre ensemble de mesurages, effectués ultérieurement dans les mêmes conditions et sur le même film. Si la perméation varie avec le vieillissement, seuls des échantillons neufs ou vieillis doivent être utilisés et l'historique des échantillons doit être noté dans le rapport d'essai.

Les surfaces des échantillons doivent être lisses et planes et avoir une épaisseur uniforme (variation de $< 5\%$ de l'épaisseur). Ceci peut exiger leur durcissement (ou traitement thermique) lorsqu'elles sont maintenues entre des surfaces planaires plates. Le masquage des échantillons ou leur soutien avec une maille peut s'avérer nécessaire pendant les essais à des températures supérieures afin d'éviter les affaissements ou autres déformations de l'échantillon.

Certains matériaux, en particulier les joints d'étanchéité périphériques à base de polyisobutylène, sont très poisseux et sont susceptibles de coller aux surfaces de l'instrument de mesure. Dans ce cas, un film de soutien fin (de préférence $< 0,05$ mm), à haute perméabilité ($50 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{jour}^{-1}$), et anti adhérent peut être utilisé. Si un film de ce type est utilisé, vérifier qu'il n'a pas d'impact sur les résultats en mesurant les films d'au moins deux épaisseurs différentes. Si les films n'ont pas d'impact sur le mesurage, le WVTR en régime établi à une échelle de $1/l$ et il convient que la durée transitoire ait une échelle de $1/l^2$, où l est l'épaisseur de l'échantillon.

Si une éprouvette plus épaisse est nécessaire, plusieurs couches de film peuvent être empilées simplement dans le montage d'essai tant que l'entrefer entre les couches est réduit le plus possible. Il est recommandé de faire passer le stratifié dans un laminoir à rouleaux ou d'utiliser d'autres moyens de créer un bon contact entre les films. Cette méthode donne des résultats acceptables en raison du très faible volume de l'entrefer, du titre molaire de l'eau qui est généralement faible, et de la très haute diffusivité de l'humidité dans l'air. L'application de cette méthode à d'autres perméants, tels que l'oxygène, donne lieu à de petits entrefers entre les couches, susceptibles d'affecter les résultats. Il doit alors être vérifié que le WVTR et la durée transitoire ont des échelles de l^{-1} et l^{-2} respectivement.

Lors du mesurage de films laminés multicouches comprenant des couches constituées de différents matériaux (par exemple, une couche arrière comprenant fluoropolymère/polyéthylène téréphtalate/éthylène-acétate de vinyle), cette procédure de stratification de film ne doit pas être utilisée pour augmenter le délai au cours duquel l'infiltration d'humidité détermine la diffusivité et la solubilité. Dans la mesure où les instruments ont une sensibilité suffisante conformément aux restrictions décrites dans l'Article 7, les valeurs en régime établi pour le WVTR et la perméabilité peuvent tout de même être obtenues sans stratification, mais, dans certains cas, les estimations relatives aux valeurs apparentes de diffusivité et de solubilité peuvent ne pas être possibles pour un instrument donné avec les restrictions indiquées pour les échelles de temps sur les courbes transitoires.

6 Procédure

Pour les essais d'infiltration d'humidité, un séchage de l'échantillon dans une atmosphère desséchée (humidité relative $< 1 \%$) peut être effectué avant les essais pour réduire le temps de séchage d'équilibrage dans l'instrument. Le temps de séchage et la température exigés dépendent de la diffusivité de l'échantillon. Une température de séchage comprise entre 40°C et 50°C est recommandée pendant une période comprise entre 48 h et 72 h pour la plupart des matériaux. Les échantillons plus épais, ou les échantillons à faible D , peuvent prendre plus de temps pour sécher. Pour les échantillons tels que les joints d'étanchéité périphériques avec des déshydratants, le séchage peut ne pas être possible. Dans ce cas, les matériaux doivent être utilisés tels que reçus tout en prenant des précautions afin de réduire le plus possible l'exposition à l'humidité avant les essais. Il convient de ne pas empiler les échantillons à plat les uns sur les autres pendant leur conditionnement, mais il convient de laisser passer de l'air entre eux. Maintenir l'échantillon sec jusqu'à ce qu'il soit placé dans la cellule de diffusion, qui a été préalablement séchée par le retrait de l'humidité résiduelle et/ou une purge à l'azote sec ou un gaz sec similaire. Après avoir placé l'échantillon dans la cellule de diffusion, laisser la cellule de diffusion s'équilibrer à la température souhaitée.

Faire circuler du gaz sec (par exemple, N_2) des deux côtés de l'échantillon pour retirer toute humidité résiduelle. Il convient de veiller à assurer que le gaz est à la température souhaitée avant de faire passer le film. Lorsque la cellule a une température à $\pm 0,5^\circ\text{C}$ de la température souhaitée et que le WVTR se trouve à un régime établi proche de zéro, dans les limites de détection de l'instrument, couper le gaz externe de purge du côté de la source du perméant et commencer la surveillance de la perméation à l'humidité du côté du détecteur (voir la Figure 1).

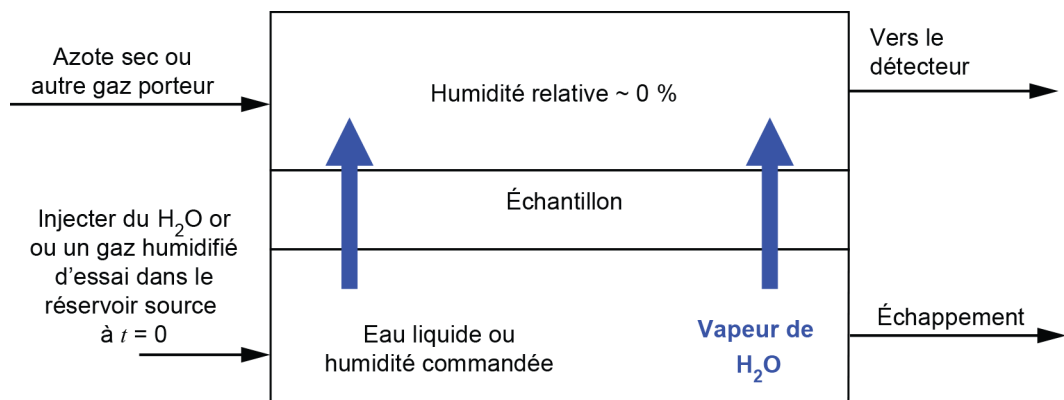


Figure 1 – Schéma d'une cellule de diffusion

Pour les essais effectués à une humidité relative de 100 %, injecter (ou appliquer de l'humidité autrement, sous forme de changement progressif) 3 ml à 10 ml de H_2O dans la chambre source de perméant de la cellule et surveiller le WVTR sur la durée en notant l'instant auquel le H_2O a été ajouté. Il ne doit pas être ajouté d'eau au point de remplir la chambre et de provoquer un contact avec l'échantillon. Il convient d'équilibrer l'eau à la température souhaitée ± 10 °C. Plus de 10 ml d'eau peuvent être nécessaires pour les films plus grands de sorte qu'il y ait assez de liquide pour couvrir la partie inférieure de la chambre. Lorsque le WVTR a atteint le régime établi, l'expérience peut être terminée.

Les expériences peuvent également être effectuées à des niveaux d'humidité inférieurs à 100 %. Toute méthode pouvant produire un changement progressif de l'humidité peut être utilisée. Le changement progressif de l'humidité doit être suffisamment court pour atteindre au moins 90 % de la valeur souhaitée en moins de $0,05 \cdot T_{1/2}$ où $T_{1/2}$ est l'instant auquel la valeur du WVTR($T_{1/2}$) est égale à la moitié de celle du WVTR en régime établi.

EXEMPLE Le changement progressif commandé de l'humidité peut être effectué en plaçant la cellule d'essai dans une chambre à température et humidité commandées. De l'azote ou de l'air sec est soufflé au travers du côté du film par lequel l'eau sera obtenue. Des précautions sont prises de sorte que les tubes traversent la chambre pendant une période suffisante pour équilibrer de manière thermique le gaz avant qu'il entre en contact avec la cellule d'essai. La réalisation de cet équilibrage peut exiger qu'un thermocouple soit placé dans l'écoulement du gaz N_2 . Lorsque l'équilibrage thermique est atteint, et que le taux d'infiltration d'humidité se situe en deçà du seuil de détection, l'air est aspiré du côté de la source d'eau à l'aide d'une pompe permettant à l'air humidifié dans la chambre de pénétrer la cellule d'essai. La pression des pompes à vide doit être suffisamment basse pour ne pas déformer l'échantillon.

La durée approximative à considérer comme étant suffisamment proche du régime établi doit être d'au moins $4 \cdot T_{1/2}$, mais elle doit de préférence être supérieure à $8 \cdot T_{1/2}$ pour les matériaux fickiens. Pour les matériaux non fickiens (par exemple, matériaux de joints d'étanchéité périphériques remplis de déshydratant), cette durée en régime établi peut ne pas être aussi longue, car une courbe plus abrupte est généralement obtenue. Pour les matériaux non fickiens, une durée d'au moins $4 \cdot T_{1/2}$ doit s'écouler ou, en variante, si le WVTR n'a pas changé de plus de 5 % sur une période de $0,5 T_{1/2}$, des données suffisantes ont été collectées et l'essai peut être terminé.

La diffusivité et la solubilité de l'humidité dans le matériau, ainsi que les capacités de l'instrument, affectent l'épaisseur de l'échantillon nécessaire au mesurage. Le demi-temps $T_{1/2}$ doit être 10 fois supérieur au temps de retard de l'instrument (T_{delay}) pour déterminer le coefficient de diffusion ou le temps d'infiltration T_{10} . Si le demi-temps $T_{1/2} < 10 T_{\text{delay}}$, augmenter l'épaisseur d'échantillon et soumettre à nouveau à l'essai. Il convient que $T_{1/2}$ varie avec le carré de l'épaisseur d'échantillon de sorte à obtenir un quadruplement de $T_{1/2}$ pour un doublement de l'épaisseur d'échantillon. À l'inverse, l'épaisseur d'échantillon peut nécessiter une réduction si le taux de perméation est en deçà du seuil de détection de l'instrument ou si l'adsorption d'humidité sur les surfaces de l'instrument contribue de manière imprévisible au temps instrumental de retard (T_{delay}).

7 Calculs

7.1 Détermination de la diffusivité et de la solubilité de l'humidité

Un exemple pour calculer la diffusivité et la solubilité est donné à l'Annexe A. Le temps de retard de l'instrument T_{delay} tient compte du fait que, pour un instrument spécifique, avec un débit spécifié, à un taux donné de perméation, un certain délai s'écoule entre l'instant auquel l'humidité pénètre un film et l'instant auquel ce phénomène est détecté. Il convient que cette valeur varie en fonction du débit du gaz porteur de manière approximativement inverse à celui-ci, et elle dépend généralement (mais pas toujours) de l'épaisseur d'échantillon et des propriétés de perméation. Pour les taux de perméation très bas, T_{delay} peut être davantage affecté par l'adsorption sur les surfaces de l'instrument. Cette valeur doit être déterminée à l'aide de l'une des diverses méthodes existantes. La configuration instrumentale constante est obtenue en mesurant deux échantillons d'un matériau ayant des épaisseurs différentes (l) dans les mêmes conditions et avec le même ensemble de valeurs pour D , S , et T_{delay} pour les deux ensembles de données. En variante, T_{delay} peut être déterminé en mesurant le même film fickien à différentes températures et en lui assignant la même valeur pour T_{delay} après lui avoir assigné une courbe d'Arrhenius en vue d'obtenir une ligne droite. Une limite supérieure de T_{delay} peut être déterminée en mesurant un film fin avec un transitoire très court.

La diffusion doit être considérée comme fickienne si (en ignorant la remise à zéro de l'instrument ou les bruits analogues) les données de WVTR(T_R) correspondent à l'Équation (1),

$$T_R(t) = \frac{DS}{l} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n e^{\left(-\frac{Dn^2\pi^2 t}{l^2} \right)} \right] \quad (1)$$

où l est l'épaisseur du film et t est la durée définie comme étant l'écart entre l'instant auquel l'humidité a été ajoutée et T_{delay} .

Lors de l'utilisation de l'Équation (1), les termes correspondant à n doivent être utilisés au moins jusqu'à $n = 15$, mais les valeurs comprises entre 50 et 100 sont recommandées. Cette équation s'applique uniquement aux matériaux fickiens lorsque la constante de diffusion ne dépend pas de la concentration.

Le meilleur ajustement à l'Équation (1) peut être déterminé en réduisant le plus possible la somme des carrés des résidus, $\sum \{[\text{mesuré } T_R(t)] - [T_R(t) \text{ à partir de l'Équation 1}]\}^2$. Un ajustement uniquement visuel des données est également acceptable. Ces deux méthodes sont facilement exécutables à l'aide d'un tableur. Il est suggéré de configurer le tableur de sorte à permettre l'ajustement des données par l'ajustement des paramètres $D \cdot S / l$ et D / l^2 . Ces paramètres peuvent être ajustés à l'équation plus facilement de manière indépendante et visuelle. La grandeur $D \cdot S / l$ est le WVTR en régime établi et est ajustée en premier. Cet ajustement est suivi par celui de la grandeur D / l^2 qui représente le temps caractéristique de diffusion et est ajusté pour correspondre au temps de réponse en perméation.

Les valeurs de D et S doivent uniquement être déterminées avec cette méthode pour les matériaux fickiens. Lors de cette détermination, au moins 10 points de données doivent être prélevés, à des intervalles réguliers, avant $4 \cdot T_{1/2}$. Un matériau est considéré comme fickien si l'écart entre la valeur mesurée et la valeur calculée présente une erreur inférieure à 5 % du WVTR en régime établi en tout point (les transitoires instrumentaux, tels que ceux causés par une remise à zéro, peuvent être ignorés lors de cette détermination) (voir les exemples aux Figure A.1 et Figure A.2). Il arrive souvent qu'un matériau stratifié puisse comprendre une seule couche à faible perméabilité qui domine la perméation transitoire résultant dans une structure composite avec l'apparence d'un matériau fickien. Dans le cas d'un film laminé, la diffusivité et la solubilité doivent être consignées comme étant uniquement des propriétés apparentes (D_{app} et S_{app}).

La perméabilité (P), ou un T_R spécifique, est défini(e) comme $P = D \cdot S = T_R \cdot l$. Étant donné que cette grandeur ne dépend pas de l'épaisseur de l'échantillon, du temps transitoire de perméation, ou de la nature non fickienne d'un matériau, il peut souvent s'agir d'une meilleure propriété (par rapport au WVTR) pour l'intercomparaison de différents matériaux. Les valeurs de perméabilité doivent être consignées lorsque le matériau a atteint le régime établi.

7.2 Détermination de la constante de traversée

Des exemples pour calculer le temps d'infiltration sont donnés à l'Annexe A. Pour les matériaux utilisés comme joints d'étanchéité périphériques, ou pour les encapsulants à faible diffusivité destinés à être utilisés pour réduire de manière similaire l'infiltration d'humidité, la constante de traversée de K_{10} , est liée à la distance, X , pour la perméation à l'humidité à une température et une humidité relative constantes jusqu'à ce que le temps prévu soit écoulé,

$$X = K_{10} \sqrt{\tau} \quad (2)$$

Cette valeur est déterminée en remplaçant X par l'épaisseur de film l , comme suit

$$K_{10\%} = \frac{l}{\sqrt{\tau_{10}}} \quad (3)$$

où τ_{10} est la durée au cours de laquelle le WVTR transitoire atteint 10 % de sa valeur en régime établi (voir l'Article A.3). Le remplacement de X et l est une bonne approximation en cas d'utilisation d'un joint d'étanchéité périphérique à faible diffusivité avec un encapsulant à haute diffusivité et/ou haute solubilité, car lorsque l'humidité traverse le joint d'étanchéité périphérique, elle est rapidement diffusée, ce qui rend la concentration de l'autre côté du joint d'étanchéité périphérique effectivement nulle. Cette situation est bien représentée par la diffusion transitoire au travers d'un film, car il s'agit de deux situations de diffusion unidimensionnelle. Dans le cas d'un encapsulant sans joint d'étanchéité périphérique, cette relation est uniquement approximative et est destinée à fournir une estimation relative approximative de la distance à laquelle l'humidité est présumée s'imprégner.

La valeur de K_{10} peut être calculée pour les matériaux fickiens et non fickiens (voir les Figure A.1 et Figure A.3). Pour les matériaux fickiens, $K_{10} = 3,89 \cdot D^{0,5}$.

7.3 Mesurage des températures variables

Au moyen d'un équipement de perméation conçu pour fonctionner à des températures variables, une énergie d'activation d'Arrhenius peut être calculée pour les paramètres de perméation à l'humidité comprenant un préfacteur et une énergie d'activation de sorte que:

$$D(T) = D_o e^{\left(\frac{-Ea_D}{RT}\right)} \quad \text{ou} \quad \ln(D) = \left(\frac{-Ea_D}{R}\right) \left(\frac{1}{T}\right) + \ln(D_o) \quad (4)$$

$$S(T) = S_o e^{\left(\frac{-Ea_S}{RT}\right)} \quad \text{ou} \quad \ln(S) = \left(\frac{-Ea_S}{R}\right) \left(\frac{1}{T}\right) + \ln(S_o) \quad (5)$$

$$P(T) = P_o e^{\left(\frac{-Ea_P}{RT}\right)} \quad \text{ou} \quad \ln(P) = \left(\frac{-Ea_P}{R}\right) \left(\frac{1}{T}\right) + \ln(P_o) \quad (6)$$

$$K_{10}(T) = K_{o,10} e^{\left(\frac{-Ea_{K10}}{RT}\right)} \quad \text{ou} \quad \ln(K_{10}) = \left(\frac{-Ea_{K10}}{R}\right) \left(\frac{1}{T}\right) + \ln(K_{o,10}) \quad (7)$$

Dans les Équations (4) à (7), Ea_D , Ea_S , Ea_P et Ea_{K10} sont les énergies d'activation, et D_o , S_o , P_o , $K_{o,10}$ sont les préfacteurs pour la diffusivité, la solubilité, la perméabilité, et la constante de traversée de 10 %, respectivement. Tracer la courbe correspondant au logarithme naturel du paramètre pertinent en fonction de T^{-1} en K^{-1} et calculer la pente choisie par la méthode des moindres carrés de la ligne. Un minimum de trois températures couvrant au moins 30 °C doivent être utilisées. L'énergie d'activation est ainsi calculée comme étant la pente multipliée par la constante universelle des gaz, $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ et le préfacteur est calculé comme étant l'exposant du point d'intersection. L'incertitude de ces facteurs doit être calculée en tenant compte de l'incertitude des points individuels de données et de l'ajustement de la ligne sur le graphique d'Arrhenius.

Certains matériaux peuvent présenter une courbe d'Arrhenius différente au-dessus et en dessous d'une transition de phase. Ces cas sont particulièrement probables si le matériau est soumis à une transition de fusion. Dans ce cas, la plage de températures pertinentes applicable doit être consignée.

NOTE Pour un matériau fickien, l'énergie d'activation $Ea_{K10} = 0,5 \cdot Ea_D$, et $K_{o,10} = 3,89 \cdot D_o^{0,5}$. Cependant, pour un matériau rempli de déshydratant (par exemple, un matériau type de joint d'étanchéité périphérique) dans lequel la quantité d'eau absorbée dans le déshydratant est nettement supérieure à la quantité d'eau dissoute dans la matrice polymère, $Ea_{K10} = 0,5 \cdot Ea_P$ [2]¹.

7.4 Mesurage de l'humidité relative variable

Certains instruments peuvent être équipés pour exposer des échantillons à des niveaux variables d'humidité commandée. Pour les matériaux fickiens, ceci permet également de déterminer la solubilité en fonction de l'humidité relative. Lors de l'ajustement de données variables relatives à l'humidité, les mesurages de la diffusivité doivent être constants pour une température donnée; si ce n'est pas le cas, le matériau n'est pas considéré comme un matériau fickien, même si l'Équation (1) peut être ajustée dans les limites d'une incertitude de 5 % du WVTR pour chaque ensemble individuel de données. Pour une température donnée, la diffusivité mesurée ne doit pas varier de plus de 10 % au cours d'une variation d'humidité de 50 % d'humidité relative pour considérer le matériau comme étant fickien. Pour consigner les matériaux comme étant fickiens, des mesurages doivent être effectués sur un intervalle d'humidité relative d'au moins 50 % avec au moins trois points de mesure.

¹ Les chiffres entre crochets se réfèrent à la Bibliographie.