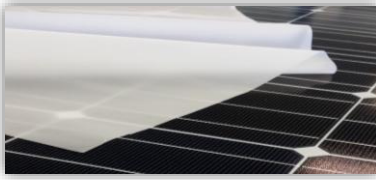
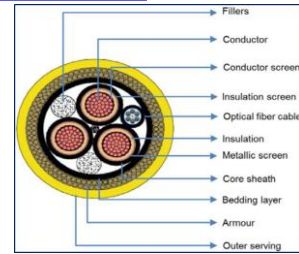


3A Option Matériaux pour l'énergie (2 CM)

Isabelle Royaud



1) Encapsulation de polymères pour les cellules Photovoltaïques (1 CM)



2) Isolation des conducteurs (1 CM)

4A Option Matériaux pour l'énergie (3 CM)

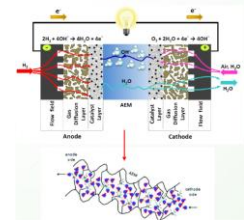
3) Matériaux Polymères pour le Nucléaire (1CM)



4) Stockage matériaux et procédés organiques (supercapa et condensateurs) (1CM)



5) Membranes pour les batteries (1 CM)



Isabelle Royaud

4A Matériaux Polymères pour le Nucléaire (1CM)

- ☐ Revêtements des câbles électriques.
- ☐ Joints des tampons d'accès des matériels.
- ☐ Revêtements internes des enceintes à double paroi.



Renforcement avec des fibres de carbone imprégnées de résine époxy

trois domaines principaux de surveillance du vieillissement qui sont :

- la dégradation de l'isolation des câbles électriques utilisés en réacteur
- la dégradation des joints en silicone assurant l'étanchéité et la prévision de leur comportement en conditions accidentelles
- la dégradation à long terme des revêtements internes des enceintes réalisées en matériau composite à matrice époxy renforcée par des fibres de verre ou de carbone.

Mécanismes principaux de vieillissement sous irradiation dans les polymères

✓ Coupure de chaînes: chain scission

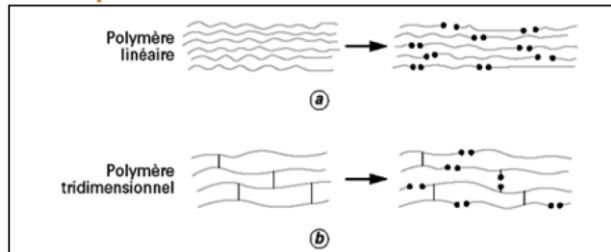


Figure 1.1 Processus de coupure statistique des squelettes macromoléculaires
Tirée de Verdu (1990)

✓ Réticulation : crosslinking

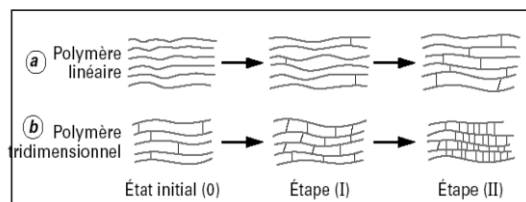


Figure 1.2 Représentation schématique des processus de réticulation dans un polymère initialement linéaire et dans un polymère initialement tridimensionnel
Tirée de Verdu (2002a)

B) Dynamic Mechanical Analysis

DMA PRINCIPLE

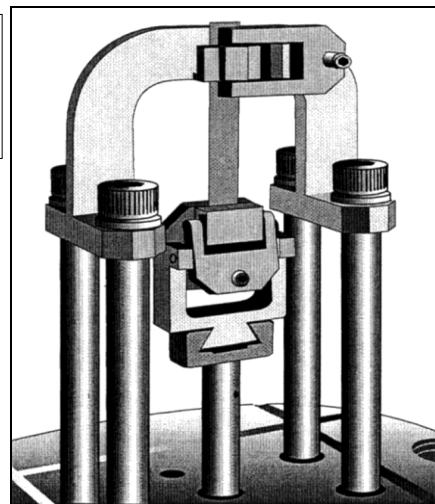
⇒ Measures the modulus (stiffness) and damping (energy dissipation) properties of materials when deformed under periodic stress

Applying sinusoidal stress
⇒ measuring sinusoidal strain
viscoelastic material

⇒ phase difference between stress and strain (δ) : depends on the viscous behaviour (E'') and the elastic behaviour (E')

$$E^* = E' + i E''$$

$$\tan \delta = E''/E'$$



TENSION TEST → Longitudinal deformation



C) Dielectric Relaxation Spectroscopy (DRS)

PRINCIPLE

Diagram of electrodes and sample

⇒ U applied, I measured

⇒ Z_s^* calculated : $Z_s^* = -i/\omega C_p^*$

⇒ C^* extracted : $C_p^* = -iI^*/\omega U^*$

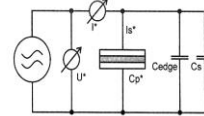
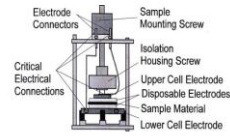
⇒ Complex permittivity : $\epsilon^* \Rightarrow \epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$

$$\epsilon^* = C_p^*/C_0$$

loss factor ⇒ $\tan \delta = \epsilon''/\epsilon'$

ϵ' is the dielectric constant

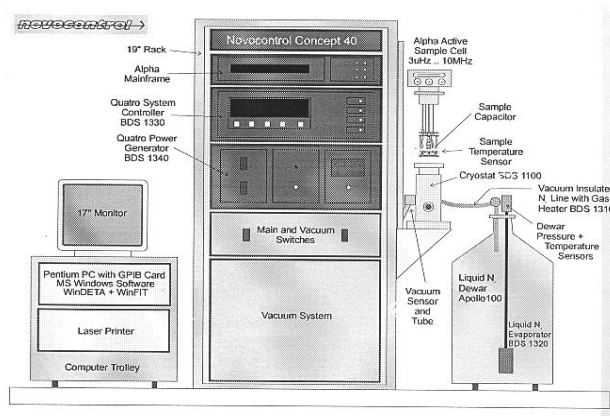
ϵ'' is the dielectric loss



Transverse deformation

Molecular mobility

Relaxational phenomenon analysis



10^{-2} Hz - 10^7 Hz, $\tan \delta$ sensitivity 10^{-4} ,
 -150°C - 300°C ramp or isothermal steps (isotherms every 3°C for ex.)
 Metallized samples or not (thickness < 1 mm)
 Golden or stainless steel electrodes of 10, 20, 30, 40 mm diameter

Potential of Dielectric Dynamic Analysis

In the following fields:

- Relation Electric behavior and chain structure
- Influence of crystallinity and orientation
- Interactions polymers - small molecules
- Ageing (polar species play the role of probe for detecting the phenomena), health monitoring (in situ)
- Macromolecular Synthesis (chain stretching, network)
- Crystallization, phase transition
- Interfacial phenomena

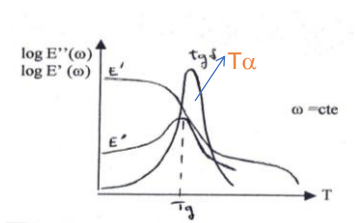
Complementarities with other techniques (RMN, DMA)

Comparisons DMA and DRS

DMA

$$E^* = E' + iE''$$

$$\tan \delta = E''/E'$$



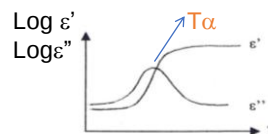
DRS

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$$

$$\tan \delta = \varepsilon''/\varepsilon'$$

Dielectric modulus: $M^* = M' + i M''$

$$\text{With } M' = \varepsilon' / (\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2) \quad \text{And } M'' = \varepsilon'' / (\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2)$$



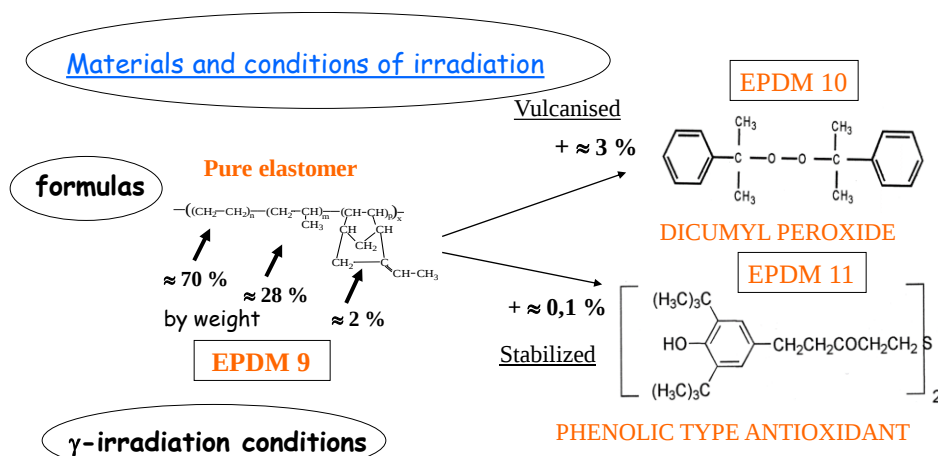
Analysis of molecular mobility

“Radiochemical ageing of EPDM : Influence on relaxation phenomena”



1) Why study the radiochemical ageing of EPDM?

- ✓ Thermal and/or radiochemical ageing of polymers → modifications of mechanical, electrical properties → **limit the life time**
- ✓ EPDM used as **cable insulation** in nuclear plants are exposed to radiation → necessary to study the degradation by exposing them to artificial radiation and the **influence of ageing** on the evolution of **mechanical and dielectric properties**.
- ✓ DRS (Dielectric Relaxation Spectroscopy) and DMA (Dynamic Mechanical Analysis) are widely used to study **relaxation phenomena** in polymers to give an insight into the **molecular dynamics** of the chains.
- ✓ The comparison of viscoelastic and dielectric behaviour of radiochemically aged polymers with the non irradiated material can give an idea of the **molecular mechanisms** which are related to the dynamics of the polymer chains.
- ✓ It is important to use both techniques in parallel since some phenomena can be observed by one technique and not by the other. In particular, DRS can be used to monitor polar species created by irradiation and hence characterise the ageing phenomena.



γ-irradiation conditions

➡ **Thermal Treatment before irradiation :**
5 min à 80°C + 1h à 23°C
to produce a reference state since Tm ≈ 50°C

- Cobalt 60
- 1 kGy/h
- 50 to 450 kGy
- pure oxygen

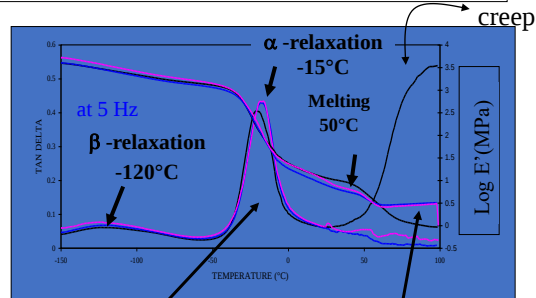
➡ **Storage after irradiation :**
dessicator under vacuum
at 23°C (air conditioned room)

Dynamic Mechanical Analysis

DMA 2980 TA Instruments

samples are rectangles of 1mm thick, frequencies used are 1, 5 and 10 Hz
temperature ramp of 2K/min from -150 to 100°C

BEFORE IRRADIATION



Crosslinking ⇒ $\nearrow$ α-relaxation temperature
Modulus at the rubbery plateau higher after the melting of the crystallites

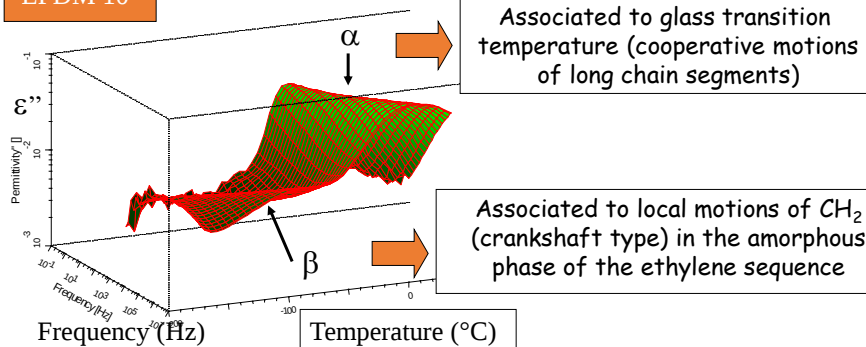
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 185, 305-310, 2001

Dielectric Relaxation Spectroscopy

NOVOCONTROL

30 mm electrode, without metallization, samples 100 microns thick
-150°C to 60°C using isotherms every 5°C
frequencies ranging from 1 Hz to 10⁵ Hz

EPDM 10



Associated to glass transition temperature (cooperative motions of long chain segments)

Associated to local motions of CH₂ (crankshaft type) in the amorphous phase of the ethylene sequence

Vieillessement de résine epoxy (colis ANDRA enrobe de déchets de faibles et moyennes activités)

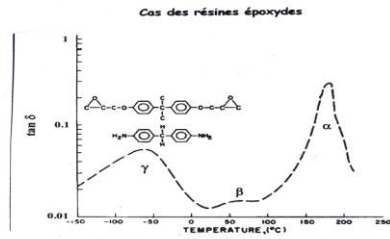


Figure I.A.3.3. Evolution de $\tan \delta$ du système DGEBA/DDM pour une sollicitation à fréquence constante ($\sim 1\text{Hz}$) et lors d'une montée en température

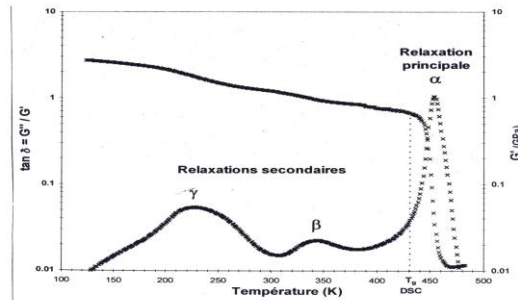


Figure III.A.1.1. Evolution de $\tan \delta$ et G' pour le système DGEBA/DDM, 1Hz , $dT/dt = 1,5\text{K/min}$.

Vieillessement sous irradiation: EFFETS DIRECTS DE L'IRRADIATION

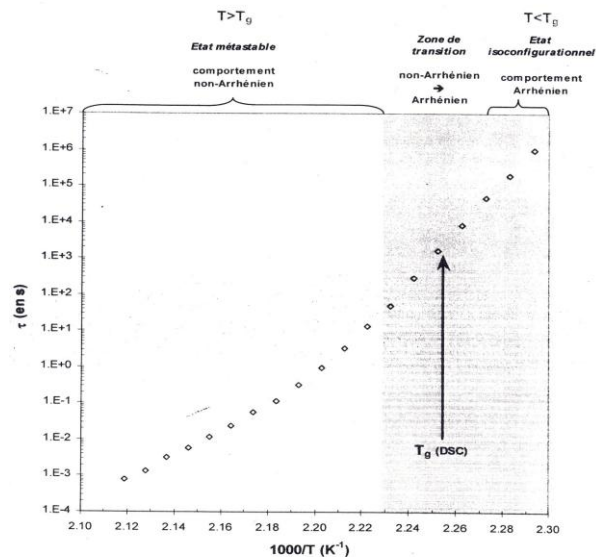


Figure III.A.2.13 Diagramme des temps de relaxation mécanique pour α , système DGEBA/DDM non irradié

Carte de relaxation

EFFETS DIRECTS DE L'IRRADIATION

Récapitulatif du comportement en déformations linéaires

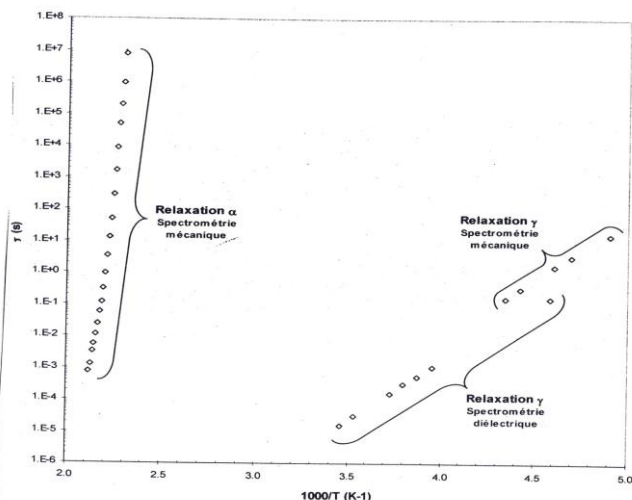


Figure III.A.2.18 Diagramme des temps de relaxation mécanique, système DGEBA/DDM

EFFETS DIRECTS DE L'IRRADIATION

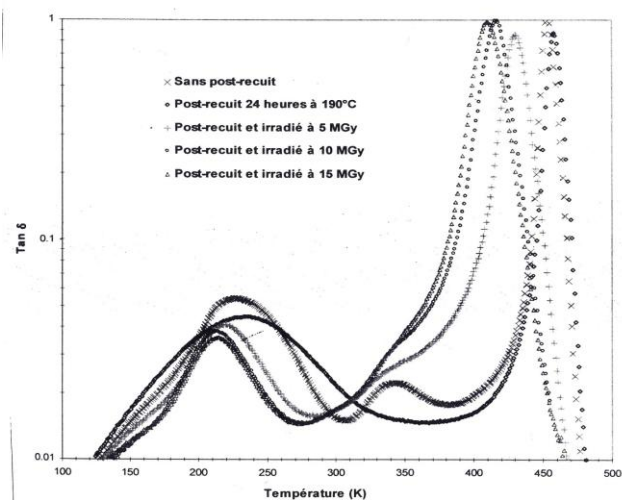
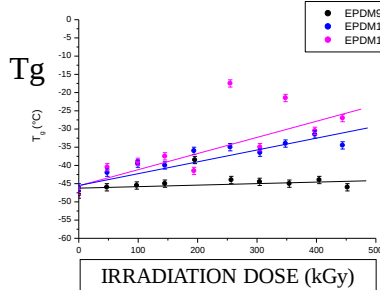


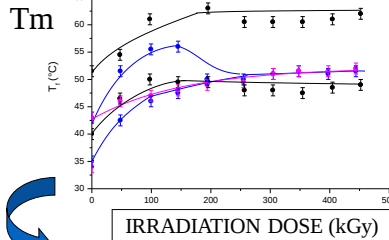
Figure III.A.2.20 Evolution de $\tan \delta$, résine DGEBA/DDM pour différentes doses, $1H_z$, $dT/dt = 1.5 K/min$.

Analysis of thermal transitions

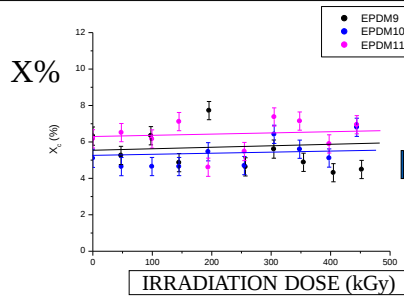


DSC (Differential Scanning Calorimetry)

10 mg sample, 100 μ m thick, 10K/min under Helium, -80°C to 100°C



T_g and T_m increase with irradiation dose for the three formulations



No significant variation of the crystallinity ratio with irradiation dose for the three formulations

Dielectric (isochronal) spectra of non irradiated materials (frequencies between 1 Hz and 100 kHz)

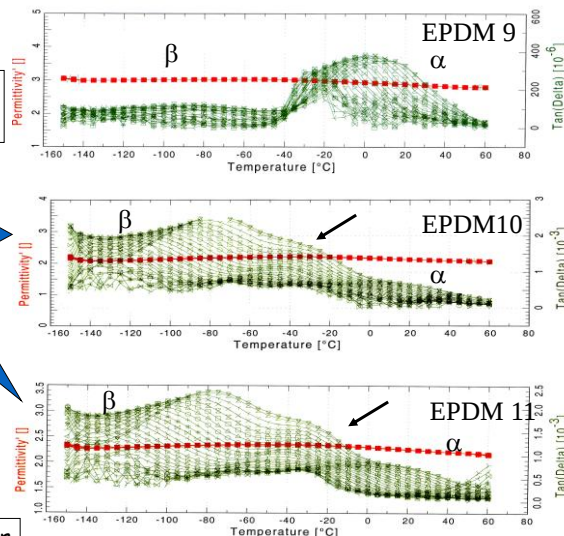
EPDM's are not polar
Weak dielectric loss

Appearance of new polar species

TGA :

Non-irradiated samples
0.45 to 0.7 % weight loss between 100°C and 300°C for EPDM 10 and 11 in contrast with only 0.05 % for EPDM 9

These polar species disappear after the first dose of irradiation (50 kGy)

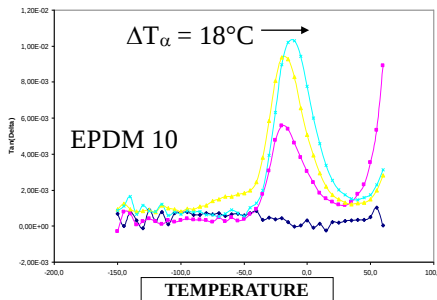
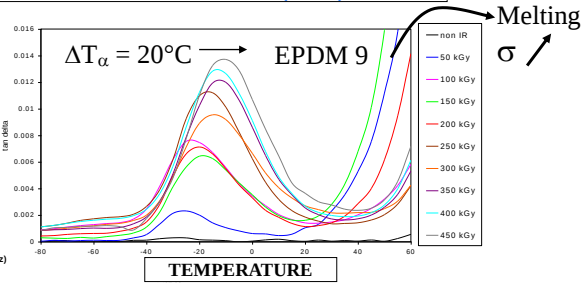


Correlation with TGA which shows similar behaviour at 450 kGy for the three irradiated EPDM's

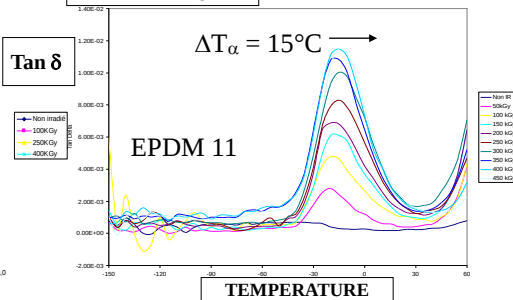
DRS

Comparison of EPDM 9, 10 and 11 non irradiated and irradiated for different doses (1 Hz)

$$\Delta T_{\alpha} = T_{\alpha}(\text{irr.}) - T_{\alpha}(\text{non irr.})$$

Tan δ ΔT_{α} Tan δ

EPDM 11



Irradiation induces crosslinks which brings the chains closer: $\searrow$ long range motions

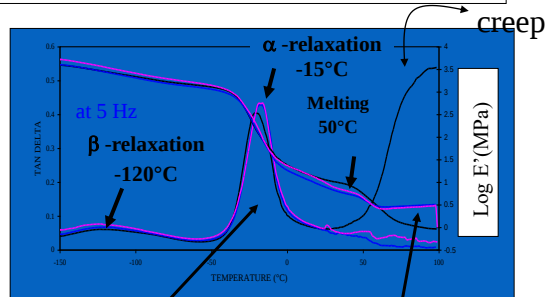
Example: EPDM

Dynamic Mechanical Analysis

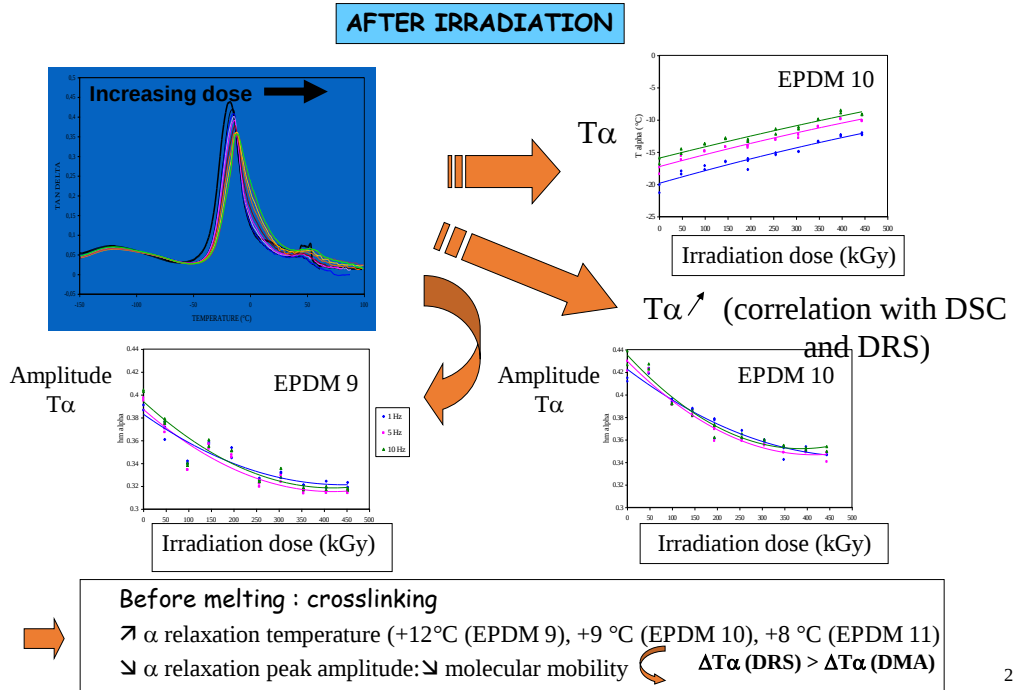
DMA 2980 TA Instruments

samples are rectangles of 1mm thick, frequencies used are 1, 5 and 10 Hz
temperature ramp of 2K/min from -150 to 100°C

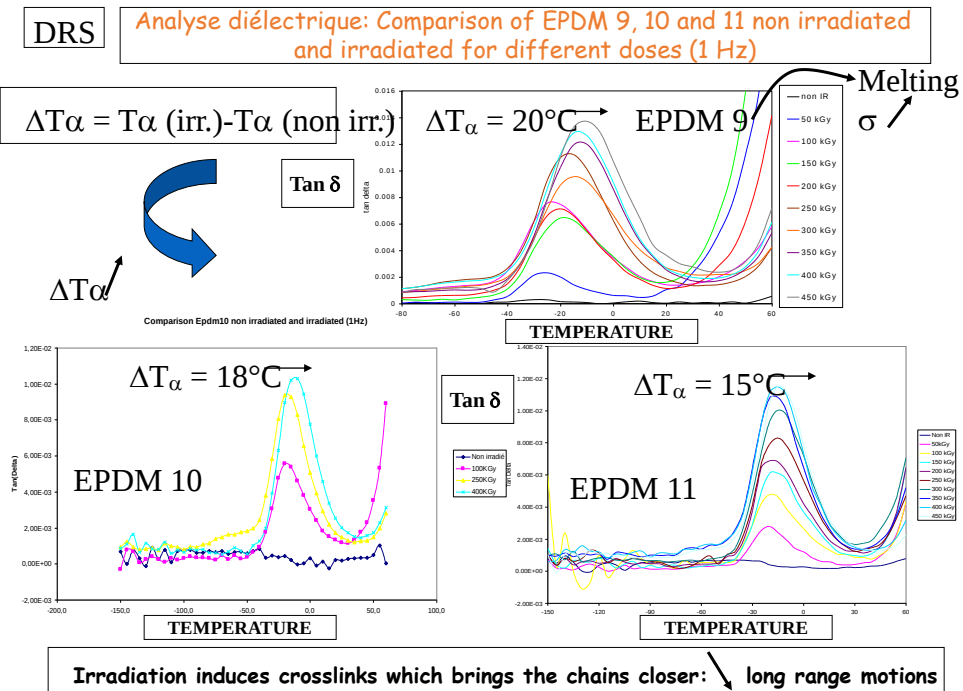
BEFORE IRRADIATION

Crosslinking $\Rightarrow$ $\nearrow$ α -relaxation temperature

Modulus at the rubbery plateau higher
after the melting of the crystallites



21



22

Matériaux Polymères pour le Nucléaire



☐ Isolation des gaines de câbles en réacteur

☐ câbles qui ont permis de mettre en évidence l'importance d'étudier le vieillissement de certains polymères à faible débit de dose car les dégâts sont plus importants qu'à fort débit de dose comme dans le cas des vieillissements accélérés

☐ Joints en silicone

☐ La compressibilité et l'étanchéité des joints a été testée à quelques températures (T_{amb} , 75, 104° C et 150° C) et après les avoir soumis à un certain nombre de doses d'irradiation (70 et 255 kGy) et différents débits de dose (0,7 et 0,9 kGy/h) simulant des scénarios d'accident: Ces expériences ont permis de montrer que les propriétés d'étanchéité du joint en silicone étaient largement affectées par ces conditions d'exposition, notamment de l'extrusion du joint a été observé et des mesures de taux de fuite sous pression d'air sec, vapeur d'eau/ N_2 ont mises en évidence des défaillances. mécanismes à l'origine de cette dégradation?

☐ Par contre une solution a été proposé par l'exploitant : un changement de la formulation du joint qui améliore les problèmes d'étanchéité.

Matériaux Polymères pour le Nucléaire



☐ Appliquer une équivalence temps-température à l'aide, d'une loi du type Arrhenius. la dégradation du joint en silicone sous l'effet combiné de la température et de l'irradiation ne peut être prédite de façon précise.

☐ La validation des modèles prédictifs de vieillissement ne peut être faite en l'absence de données relatives à des joints vieillis dans les conditions opératoires des réacteurs.

☐ Des comparaisons avec des vieillissements naturels de ces joints fait par l'IRSN pendant 10 ans peuvent servir de validation pour des nouveaux joints utilisés par les exploitants et à tester.

☐ Revêtements enceinte en composite-epoxy/fibre de verre

☐ Des éprouvettes réalisés en composites à matrice époxy ont été testés. Deux résines thermodurcissables de type époxy ont été utilisées représentatives des systèmes couramment employés par EDF. Des essais de vieillissement accélérés ont été effectués par le CEA en collaboration avec l'IRSN. Divers débits de dose (1, 10, 100 Gy/h) et deux températures (70° C et 150° C) ont été testés.

☐ Cette étude a montré des pertes d'étanchéité et des pertes d'adhérence après accident grave simulé.

Matériaux Polymères pour le Nucléaire



☐ Revêtements en composite-epoxy/fibre de verre

☐ Comment appréhender correctement et prévoir la dégradation de ces matériaux polymères entraînant des pertes d'étanchéité ou des pertes d'adhérence quand ils sont soumis à ces conditions de vieillissement thermique, d'hydrolyse et d'irradiation en synergie?

☐ Perte d'adhérence du revêtement sur la paroi béton : l'effet de l'interface fibre/matrice, les phénomènes d'endommagement dans les composites (craquelures de la matrice, des fibres, délamination fibre/matrice), les phénomènes d'adhérence/adhésion béton/ époxy/fibre de verre, les phénomènes de scission de chaîne qui peuvent se produire sous l'effet du vieillissement sous irradiation dans les résines époxy

☐ Proposer à l'exploitant d'utiliser des composites à matrice époxy mais renforcés par des fibres de carbone, de changer le type de matrice polymère (par exemple PEEK) des composites auto-cicatrisants. Simuler une fissure dans le béton avec ce revêtement composite et voir ce qui se passe sur l'ensemble.

Matériaux Polymères pour le Nucléaire



Prédiction de durée de vie?

- ✓ Les méthodes de prévision de durée de vie font toujours appel à des extrapolations.
- ✓ Les approches empiriques qui restent valables pour des besoins d'interpolation ne sont pas valables pour les extrapolations.
- ✓ Les méthodes de prévision de durée de vie doivent s'appuyer, autant que possible, sur une approche des mécanismes d'évolution du matériau, physiques et chimiques.
- ✓ Les phénomènes de vieillissement sont, dans la pratique, des problèmes multi-échelles.
- ✓ De façon générale, les processus radiochimiques, l'oxydation, l'hydrolyse, etc. proviennent des interactions entre l'irradiation, l'oxygène, l'eau, la vapeur d'eau, etc., à une très faible échelle, celle des atomes ou des molécules.
- ✓ Cependant ces événements localisés n'affectent les propriétés du matériau que si elles ont des répercussions à une échelle plus grande, par exemple une modification de la taille des macromolécules dans les polymères ou de leur morphologie (amorphe ou semi cristalline). Il existe ainsi au moins deux niveaux microstructuraux importants : celui des arrangements atomiques et moléculaires et celui situé à une échelle plus grande qui permet d'expliquer les modifications des propriétés mécaniques par exemple.

Prédiction de durée de vie?



✓ Le cas des joints en élastomères illustre bien la différence qui doit être faite au niveau de la durée de vie entre les matériaux et les systèmes.

En cours d'utilisation, un joint constitue une partie d'un système qui doit remplir certaines fonctions.

✓ La fin de la durée de vie de ce système est l'apparition d'une fuite qui n'est pas une caractéristique du matériau.

✓ L'apparition de cette fuite résulte de modifications dans la géométrie du joint (extrusion) et de la « résilience » ou recouvrance/élasticité du matériau (module mécanique). Cette dernière propriété est liée à des modifications des propriétés mécaniques du matériau et implique une combinaison de phénomènes de vieillissement chimique et de fluage.

✓ Une propriété maîtresse du matériau est, dans ce cas, la déformation résiduelle sous compression (DRC).

On peut imaginer la chaîne causale simplifiée suivante :

Modifications physiques et chimiques du matériau en conditions de vieillissement sous compression :

→ Modifications locales de la DRC

→ Modifications dans la géométrie du joint et de sa réponse mécanique (extrusion)

→ Fuite (perte d'étanchéité)

CONCLUSIONS



□ Le vieillissement des polymères est un **problème multi-échelle et interdisciplinaire**. Il s'étend depuis la chimie macromoléculaire (polymérisation/synthèse/formulation) des polymères, la mobilité moléculaire des chaînes macromoléculaires, la mise en œuvre jusqu'aux propriétés finales d'usage des matériaux qui peuvent être modélisées par exemple par des calculs par éléments finis.

□ **Le facteur « temps »** intervient essentiellement dans le premier maillon de la chaîne. Les mécanismes de vieillissement sous contrainte des élastomères ont été étudiés depuis très longtemps. Ces études ont montré qu'il n'est pas possible de comprendre l'évolution de ce système sans disposer d'éléments d'information sur la structure de l'élastomère (taux de réticulation, nombre de nœuds de réticulation chimiques). De telles données peuvent facilement être obtenues à partir de mesures de routine (analyse mécanique dynamique, taux de gel, analyse vibrationnelle structurale..., etc.).

□ Il existe de nombreuses raisons pour **se méfier des hypothèses concernant la cinétique souvent trop simples**, par exemple : (i) la dépendance à la température de la vitesse de vieillissement peut suivre ou non une loi de Arrhenius ; (ii) la durée de vie sous irradiation n'est pas toujours liée uniquement à la dose reçue mais peut être aussi liée au débit de dose ; (iii) les cinétiques de vieillissement suivent des lois élémentaires (ordre zéro, premier ordre, etc.). Les mécanismes de base d'oxydation, d'irradiation (réticulation ou scission de chaînes), de gonflement, pertes d'additifs ou d'hydrolyse doivent être étudiés de façon détaillée.



CONCLUSION

□ Une autre difficulté rencontrée dans l'étude du vieillissement des polymères est liée à l'existence d'un temps d'incubation, un peu similaire à celui observé en fatigue. Les signes précurseurs d'endommagement avant la rupture finale sont très difficilement détectables. Le manque d'informations détaillées sur ces signes précurseurs gêne la mise en place de modèles appropriés.

□ Il apparaît ainsi nécessaire de développer des techniques très sensibles pour détecter cet endommagement. Exemples: utilisation de la spectroscopie Raman en complément de la spectroscopie IR pour l'analyse non destructive (gaine externe des câbles électriques) ou l'utilisation de capteurs diélectriques pour suivre la santé du matériau au cours de sa vie qui pourrait détecter cet endommagement de manière précoce.

Polymers are indispensable materials in nuclear power stations, contributing to safety, efficiency, and reliability. However, their use presents unique challenges that require ongoing research and development efforts. As we continue to advance our understanding of polymers and their behavior in nuclear environments, we can enhance the performance and safety of nuclear power stations, contributing to a sustainable energy future.

REFERENCES



*[Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Volume 151, Issues 1–4](#), 2 May 1999, Pages 449–452,

Ageing of polymers in electrical equipment used in nuclear power plants, R. Clavreul, Electricité de France, Research and Development Division, Ecuelles, 77818 Moret sur Loing Cx France

*Thèses de Jean-François CHAILAN (EDF-1993), Nathalie CELETTE (CEA-2001), Lionel VIGNOUD (CEA-2001), Pierre QUENNEHEN (EDF-2016), Université de Lyon1, IMP UMR 5223).

Thèse Emilie PLANES Insa de Lyon, (2008)

*Influence of SiO₂ fillers on the irradiation ageing of silicone rubbers" POLYMER, 42, 9287-9292, 2001 I. STEVENSON, L. DAVID, C. GAUTHIER, L. ARAMBOURG, J. DAVENAS, G. VIGIER

*"HSF-SIMS, IR, Viscoelastic and dielectric techniques applied to the study of the aging of epoxy/amine resins mixed with

simulated nuclear waste due to gamma irradiation" , *Macromolecular Symposia*, Vol 119, p213, 1997, STEVENSON I., COLOMBINI D., DEBRE O., THOMAS J.P., ROMERO M.A.

*"Gamma irradiation induced modifications of polymers found in nuclear waste embedding processes.

Part I: the epoxy-amine resin" , *Nuclear and Methods in Physics Research B*, vol 131, 313-320, 1997, O. DEBRE, B. NSOULI, J.P. THOMAS, I. STEVENSON, D. COLOMBINI, M.A. ROMERO

*"Gamma irradiation induced modifications of polymers found in nuclear waste embedding processes. Part II: the ion-exchange resins" , *Nuclear and Methods in Physics Research B*, Vol 131, 321-328, 1997, O. DEBRE, B. NSOULI, J.P. THOMAS, I. STEVENSON, D. COLOMBINI, M.A. ROMERO

*" Relaxation behaviour of radiochemically aged EPDM elastomers" , *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 185, 305-310, 2001, N. CELETTE, I. STEVENSON, J. DAVENAS, L. DAVID, G. VIGIER

*"Effect of electron irradiation on the mechanical properties of DGEBA/DDM epoxy resins", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 185, 336-340, 2001

L. VIGNOUD, L. DAVID, B. SIXOU, G. VIGIER, I. STEVENSON

*« Radiochemical ageing of EPDM followed by Near Infrared Transmittance Spectroscopy » , *The Analyst*, 2001, volume 126, issue 12, G. LACHENAL, I. STEVENSON, N. CELETTE

*« Influence of SiO₂ fillers on the irradiation ageing of silicone rubbers » , *POLYMER*, 42, 9287-9292, 2001, I. STEVENSON, L. DAVID, C. GAUTHIER, L. ARAMBOURG, J. DAVENAS, G. VIGIER

REFERENCES



*Stability of polymers under ionizing radiation:the many faces of radiation interactions with polymers”, Nucl. Inst. And Methods in Physics Research B, **191**, 653-661, **2002**, J. DAVENAS, I. STEVENSON, N. CELETTE, S. CAMBON, J.L. GARDETTE, A. RIVATON, L. VIGNOUD, [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(02\)00628-6](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(02)00628-6), hal-03979420v1

*Applicability of FT-NIR spectroscopy and PCA Analysis for studying elastomers after radiochemical ageing », *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, **10(4)**, 279-287, **2002**

G. LACHENAL, I. STEVENSON

*Influence of the molecular modifications on the properties of EPDM elastomers under irradiation” , *NIMB (Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B)*, **208**, 461-465, **2003**, J. DAVENAS, I. STEVENSON, N. CELETTE, L. DAVID, G. VIGIER

*Irradiation effects on the relaxation behaviour of EPDM elastomers», *Polymer International, Edition Spéciale FPL*, **53**, 495-505, **2004**
N. CELETTE, I. STEVENSON, L. DAVID, J. DAVENAS, G. VIGIER, G. SEYTRE

*Effect of charges on the mechanical properties of elastomers during their aging by irradiation” *Revue des Composites et des Matériaux Avancés*, **18 (1)**, 51-62, **2008**, Planès E., Chazeau L., Vigier G., Stevenson I.

*“[Determination of the aging mechanism of single core cables with PVC insulation](#)”, P. Quennehen, I. Royaud, G. Seytre, O. Gain, P. Rain, T. Espilit, S. François, *Polymer Degradation and Stability*, **119**, 96-104, **2015**

Points importants du cours à retenir



- ❖ Quels sont les deux mécanismes principaux de dégradation due à l'irradiation en centrale nucléaire pour les polymères ou les composites à matrice polymère?
- ❖ Par quelles techniques peut-on les étudier?
- ❖ Ces techniques sont-elles complémentaires? Pourquoi?
- ❖ Quel est le comportement de l'EPDM sous irradiation?
- ❖ Quel est le comportement des résines epoxy sous irradiation?
- ❖ Une augmentation de la température de relaxation associée à la transition vitreuse indique quel phénomène?
- ❖ Une diminution de la température de relaxation associée à la transition vitreuse indique quel phénomène?
- ❖ Qu'est ce que La dose totale intégrée ?
- ❖ Qu'est ce que le débit de dose ?
- ❖ Un débit de dose faible peut-il entrainer plus de dégâts dans le matériau polymère qu'un fort débit de dose?
- ❖ Le vieillissement sous irradiation peut-il se prédire?
- ❖ Le vieillissement sous irradiation est-il multi-échelles?
- ❖ Citer des endroits dans une centrale nucléaire où l'on peut trouver des polymères?
- ❖ Pourquoi ces polymères doivent ils être surveiller tout au long de leur vie d'utilisation (health monitoring)?
- ❖ Par quelles techniques peut-on faire ce suivi non destructif?

Polymers in Nuclear Power Stations: Applications and Challenges

Summary in English

=> In this lecture, we have explored the crucial role that polymers play in the safe and efficient operation of nuclear power stations.

=> applications, properties, and the challenges associated with their use in this critical industry.

Polymers in Nuclear Power Stations:

- ❑ Nuclear power stations are complex facilities where various materials must perform under extreme conditions, including high temperatures, radiation exposure, and mechanical stress.
- ❑ Polymers, which are large molecules made up of repeating subunits, find widespread use in nuclear power stations due to their unique properties.

Types of Polymers used:

- a. Thermoplastics:** Polymers like polyethylene and polypropylene are used for insulation, cable sheathing, and various non-structural applications.
- b. Thermosetting Polymers:** Epoxy resins are used for encapsulating electrical components and as a matrix material in composite structures.
- c. Elastomers:** Rubber compounds are utilized in gaskets, seals, and flexible components that require resistance to radiation and high temperatures.

Applications of Polymers:

- a. Cable Insulation:** Polymers provide electrical insulation for power cables, ensuring reliable transmission of electricity within the plant.
- b. Radiation Shielding:** Lead-loaded polymers can serve as radiation shielding materials, protecting workers from harmful radiation exposure.
- c. Seals and Gaskets:** Polymers create effective seals and gaskets, preventing leaks in various systems, such as coolant loops and containment structures.
- d. Structural Components:** Reinforced polymers, like fiberglass-reinforced composites, are used for structural components like reactor pressure vessel covers.

=> Properties Required in Nuclear Applications:

- a. **Radiation Resistance:** Polymers must withstand ionizing radiation without significant degradation or loss of mechanical properties.
- b. **Thermal Stability:** High-temperature resistance is essential, especially in reactor coolant systems and containment structures.
- c. **Chemical Compatibility:** Polymers must be compatible with the chemicals and coolants used in nuclear reactors to prevent corrosion.
- d. **Mechanical Strength:** Polymers must maintain their mechanical strength even in harsh operating conditions.

=> Challenges in Polymer Usage:

- a. **Radiation Degradation:** Prolonged exposure to radiation can lead to chain scission, cross-linking, and embrittlement of polymers.
- b. **Thermal Aging:** Polymers may degrade over time due to high temperatures, affecting their performance and longevity.
- c. **Creep and Stress Relaxation:** Polymers can experience creep and stress relaxation under load, potentially leading to sealing or structural issues.

=> Research and Development Efforts:

- a. Ongoing research aims to develop radiation-resistant polymers and composites.
- b. Improved polymer formulations and manufacturing processes.
- c. Monitoring and inspection techniques to assess the health of polymer components.