

## 1. Introduction

Investigations into the degradation of materials and components which are exposed to ionizing radiation have been carried out in the past in many different fields of applications, such as for nuclear reactors, fusion reactors, high-energy accelerators, medical and industrial irradiation facilities, space projects, etc. At the European Organization for Nuclear Research (CERN), radiation damage test studies have been concentrated on organic and inorganic materials, electronic and optical components and devices, and other materials that are used in the construction and operation of high-energy accelerators.

Apart from electronic and optical devices, the organic materials are the ones most sensitive to radiation. As a consequence of this, a large number of radiation tests have been made on these materials and the results are extensively documented [1-15]. Design engineers are, however, often faced with the problem of finding the desired information quickly within the available literature. We therefore decided to publish our radiation damage test results on organic materials in the form of catalogues.

The first volume, published ten years ago, concerned organic materials used as insulation and sheathing for electric cables [16].

The second volume dealt with thermosetting and thermoplastic resins, the majority being epoxies used for magnet coil insulations [17].

The third volume contained information on miscellaneous materials and components used around high-energy accelerators [18].

The present volume complements the first one: it concerns halogen-free cable-insulating materials. As in previous parts, the materials are presented in alphabetical order following the English name.

We first present some characteristic properties of the materials represented here, and define our end-point criteria for selection of radiation-resistant materials. We then list the tests and test methods, and give the irradiation conditions. In Section 5 we explain the presentation of the data. It must be noted that most of the data have been obtained from tests after accelerated irradiations, and that all tests were made at ambient temperature. After long-time exposures and ageing in other environments, a variation in the presented data may be expected [15].

## 2. Materials, characteristic properties, and end-point criteria

With a few exceptions, which are marked in the catalogue, all test data given here have been obtained, over the past ten years, from commercially available materials. In the meantime, some

## 1. Introduction

Des essais sur la dégradation des matériaux due aux rayonnements ionisants ont été effectués dans plusieurs domaines d'application, par exemple autour des réacteurs nucléaires et de fusion, des accélérateurs à haute énergie, dans les installations industrielles ou médicales, dans les centres d'études spatiales, etc. A l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN), les essais de radorésistance ont été concentrés sur des matériaux organiques et inorganiques, des composants électroniques et optiques, et d'autres matériaux qui sont utilisés pour la construction et l'opération des accélérateurs à haute énergie.

A part les composants électroniques et optiques, les matériaux organiques sont parmi les plus sensibles aux rayonnements ionisants. Par conséquent, une grande quantité de ces matériaux ont été soumis à des essais d'irradiation, et les résultats peuvent être trouvés dans de nombreuses publications [1-15]. Toutefois, les ingénieurs rencontrent souvent des difficultés pour trouver, dans la littérature, l'information voulue. C'est pour cette raison que nous avons décidé de publier nos résultats d'essais de radorésistance des matériaux organiques sous forme de catalogues.

Le premier volume, paru il y a dix ans, concernait les matériaux utilisés comme isolants et pour les gaines de câbles électriques [16].

Le deuxième volume comprenait des résines thermodurcissables et thermoplastiques dont la plupart sont des époxydes utilisées dans l'isolation de bobines d'aimants [17].

Le troisième volume comprenait divers matériaux et composants utilisés autour des accélérateurs de particules [18].

Le présent volume est un complément du premier: il comprend les matériaux pour isolations et gaines de câbles exempts d'halogène. Comme dans chaque volume, les matériaux sont présentés dans l'ordre alphabétique suivant leur nom anglais.

Nous commençons par exposer quelques propriétés caractéristiques des matériaux présentés dans ce catalogue; nous définissons les critères de dégradation de ces propriétés, qui servent à sélectionner les matériaux radorésistants. Nous décrivons ensuite les méthodes d'essais, ainsi que les conditions d'irradiation. Dans la section 5 nous expliquons la présentation des données. Il faut noter que les résultats ont généralement été obtenus par des irradiations accélérées, et que tous les essais ont été faits à température ambiante. Après une longue période d'irradiation et un vieillissement sous d'autres conditions, on peut s'attendre à un changement dans les résultats que nous avons obtenus [15].

of them may no longer be on the market; this is indicated in the tables of the catalogue, whenever known. The most common materials that are dealt with here are:

- ethylene-propylene rubbers,
- EVA copolymers,
- linear or cross-linked polyethylenes,
- polyolefins,
- polyurethanes.

The materials were usually supplied in connection with offers from European cable manufacturers, and according to CERN specifications for control and power cables that have to operate in radiation environments. A list of firms supplying such materials is given in Appendix 3.

In Table 1 we summarize the mechanical, electrical, and physical properties of the materials, and give some indications of their behaviour in the event of combustion.

All the materials presented here are halogen-free and contain little or no sulfur and phosphorus. They have passed the DIN 57.472/813, which defines the maximum acidity and the maximum conductivity of combustion gases.

It is evident that for selection and classification of materials according to their radiation resistance, not all of the properties listed in Table 1 can be tested, and we have to restrict ourselves to a few characteristic and representative ones. In our case the mechanical properties were chosen. We justify this by our own experience and that of others [8], which shows that, in general, the mechanical degradation of plastic insulating materials due to ionizing radiation occurs before the degradation of the electrical and physical properties. Also, no important change in flammability has been observed with radiation [9].

Among the mechanical properties, elongation at break is the most sensitive, i.e. it decreases sharply above a threshold dose. According to the recommendations of the International Electrotechnical Commission (IEC), the elongation at break is the reference critical property and the end-point criterion is 50% of its initial value [19].

The Radiation Index (RI) is defined in IEC 544-4 as the logarithm, base 10, of the absorbed dose in grays (rounded down to two significant digits) at which the elongation at break is reduced to 50% of its initial value, under specified conditions of irradiation and tests. (Note that 1 Gy = 1 gray = 1 J/kg = 100 rad.)

### 3. Tests and test methods

Whenever possible, tests have been carried out according to international norms [19]. Sometimes, for practical or technical reasons, exceptions had to be made.

The samples were usually given to us in the form of moulded plates 1 to 3 mm thick. Some were supplied in the form of an extruded ribbon or

## 2. Les matériaux, leurs propriétés caractéristiques et les critères de dégradation de ces propriétés

A part quelques exceptions, qui sont indiquées dans le catalogue, tous les résultats donnés ont été obtenus, au cours des dix dernières années, sur des matériaux disponibles dans le commerce. Il est possible que quelques-uns ne soient plus sur le marché, et nous l'avons noté dans les tableaux, pour les cas où nous l'avons su. Les plus courants de ces matériaux sont:

- Caoutchoucs éthylène-propylène,
- Copolymères EVA,
- Polyéthylènes réticulés ou non,
- Polyoléfines,
- Polyuréthanes.

En général, les matériaux ont été fournis par des fabricants de câbles européens, suivant des spécifications du CERN pour des câbles de contrôle ou de puissance qui doivent être utilisés en présence de rayonnements ionisants. L'appendice 3 est une liste des fabricants qui ont fourni les échantillons.

Le tableau 1 donne un résumé des propriétés mécaniques, électriques et physiques des matériaux, ainsi que quelques indications sur leur comportement en cas de combustion.

Soulignons que tous les matériaux présentés dans ce catalogue sont exempts d'halogène et ne contiennent que peu ou pas de soufre ou de phosphore. Ils passent tous le test DIN 57.472/813 qui définit une acidité et une conductivité maximales des gaz de combustion.

Il est évident que, pour la sélection et la classification des matériaux selon leur résistance aux rayonnements, on ne peut pas tester toutes les propriétés citées dans le tableau 1, et qu'il faut se limiter à quelques-unes des plus représentatives. Dans le cas présent, nous avons choisi les propriétés mécaniques. Ce choix se justifie par notre propre expérience, et celle d'autres auteurs [8], qui nous a appris que la dégradation, due à l'irradiation, des propriétés mécaniques des isolants plastiques intervient généralement avant celle de leurs propriétés électriques et physiques. Nous avons aussi trouvé que les rayonnements n'ont que peu d'effet sur l'inflammabilité de ces matériaux [9].

Parmi les propriétés mécaniques, on trouve que l'allongement à la rupture est la plus notable: il diminue sensiblement en dessus d'une dose seuil. Conformément aux recommandations de la Commission électrotechnique internationale (CEI) l'allongement à la rupture est donc choisi comme propriété critique de référence, et le critère de fin de vie est 50% de sa valeur initiale [19].

La publication CEI 544-4 définit un indice de rayonnement (RI) déterminé par le logarithme, en base 10, de la dose absorbée en grays (arrondie à deux chiffres significatifs) au-dessus de laquelle la valeur de l'allongement à la rupture a atteint

a sheath. Others were cut from prototype or production cables [the latter are marked (C) in the 'Remarks' line of the results tables]. In all cases, from five to eight samples were cut for each tested dose.

The following tests have been carried out:

- i) Tensile tests, according to ISO recommendation R37, on dumb-bell samples mainly of type S1 or S2 with an overall length of 115 mm or 75 mm. The tests were carried out on an Instron machine and allowed the following parameters to be determined:
  - tensile strength,
  - elongation at break.
- ii) Hardness Shore A, C, or D, according to ISO recommendations R868, carried out with a Wolpert apparatus.
- iii) Oxygen Index (OI) test, according to ISO 4589. This value gives an indication of the flammability of the plastic materials. Test results are reported for non-irradiated materials only. Some results of the change of this parameter with radiation are given in Ref. [9]. The test apparatus was made by Stanton Redcroft.

More details about test methods are given in Ref. [22].

#### 4. Irradiation conditions and dosimetry

Most of the samples were irradiated either in the ASTRA reactor at Seibersdorf (Austria), at doses of  $5 \times 10^5$  Gy,  $10^6$  Gy, and  $5 \times 10^6$  Gy, at a dose rate of about  $2 \times 10^5$  Gy/h, or with a cobalt-60 source, at Conservatome in Dagneux (France), at doses of  $2 \times 10^5$  Gy,  $5 \times 10^5$  Gy, and  $10^6$  Gy, at a dose rate of about 4000 Gy/h.

Samples were also taken from cables that needed to be replaced in high-radiation areas of the CERN accelerators; they were irradiated at doses between  $10^3$  and  $10^6$  Gy [10, 11, 14].

In the 7 MW pool reactor, the irradiation position 'Ebene 1' is in the pool about 26 cm away from the reactor core. The neutron dose is less than 5% of the total dose to the samples. The irradiation medium is air, and the temperature is kept below 60 °C. More details about irradiation conditions and dosimetry are given in Ref. [20].

#### 5. Presentation of the data

The list of the materials (with the relevant suppliers) that are presented in this catalogue and in the preceding volumes is given in Appendix 1.

Appendix 2 gives the popular names and trade names of the materials, together with the corresponding chemical names.

Appendix 3 is the alphabetical compilation of data. Under each letter, the following information can be found:

50% de sa valeur initiale, dans les conditions spécifiques d'irradiation et de test. (Pour mémoire, 1 Gy = 1 gray = 1 J/kg = 100 rad.)

#### 3. Essais et méthodes d'essais

Nous avons exécuté nos essais selon les normes internationales [19] dans tous les cas où cela était possible. Pour des raisons pratiques ou techniques, quelques exceptions étaient inévitables.

Les matériaux nous ont en général été fournis sous forme de plaques, de 1 à 3 mm d'épaisseur. Certains nous ont été fournis sous forme de ruban ou de gaine extrudés. D'autres encore ont été prélevés sur des câbles prototypes ou de production [ces derniers sont en général marqués (C) sur la ligne 'Remarks' du tableau de résultats]. Dans tous les cas, de cinq à huit échantillons ont été coupés pour chaque essai.

Nous avons effectué les tests suivants:

- i) Traction, selon la recommandation ISO R37, sur des échantillons S1 ou S2, de longueur 115 mm ou 75 mm. Les essais ont été faits sur une machine Instron et ont permis de déterminer les paramètres suivants:
  - Résistance à la traction,
  - Allongement à la rupture.
- ii) Dureté Shore A, C ou D, selon la recommandation ISO R868, mesurée sur un appareil Wolpert.
- iii) L'indice d'oxygène, selon la norme ISO 4589. Cette valeur permet de classer les matériaux plastiques selon leur inflammabilité. La valeur de l'indice d'oxygène (OI) est donnée, dans ce catalogue, pour les matériaux non irradiés seulement. Quelques résultats du changement de ce paramètre avec la radiation peuvent être trouvés dans la référence [9]. L'appareil de mesure était fabriqué par Stanton Redcroft.

#### 4. Conditions d'irradiation et dosimétrie

La plupart des échantillons ont été irradiés soit au réacteur ASTRA, à Seibersdorf (Autriche), à des doses de  $5 \times 10^5$  Gy,  $10^6$  Gy et  $5 \times 10^6$  Gy, où le débit de dose est de l'ordre de  $2 \times 10^5$  Gy/h, soit par une source de cobalt-60, à la société Conservatome, à Dagneux, France, à des doses de  $2 \times 10^5$  Gy,  $5 \times 10^5$  Gy et  $10^6$  Gy, à un débit de dose de l'ordre de 4000 Gy/h.

Dans les accélérateurs du CERN, des échantillons ont été pris des câbles qui ont été remplacés après service dans des zones de radiations élevées à des doses comprises entre  $10^3$  et  $10^6$  Gy [10, 11, 14].

Dans le réacteur-piscine de 7 MW, la position «Ebene 1» se trouve à 26 cm du cœur; la dose en neutrons intégrée par les échantillons est inférieure à 5% de la dose totale. Le milieu d'ir-

- Names of the materials (trade name and/or chemical names) and their chemical composition or structure, whenever known.
- Some general information on the material properties and radiation resistance, if no detailed data are included in this catalogue.
- The radiation test results in the form of tables for every material of the same type. In these tables are given the TIS identification number of each material, its type or trade name or commercial reference, the name of the supplier, the exposition doses and dose rates; then come the values of the tensile strength and elongation at break for tensile tests, the hardness Shore D, the limit of oxygen index (before irradiation) and the value of the radiation index for the corresponding dose rate.
- For each material, the individual data sheet in the form of table and graph, according to IEC 544 standard [21].

Appendix 4 is a list of the suppliers of materials and cables which collaborated to the catalogue.

Appendix 5 gives the main abbreviations used in the tables of results.

## 6. Classification of materials

In Table 2 we give a classification of the materials in decreasing order of radiation resistance. This classification corresponds to accelerated irradiations: it gives only an order of magnitude of the limit-dose of usability of the materials. From the table it appears that for a large number of materials the 'limit for application' is around  $5 \times 10^5$  Gy. Under long-term irradiations at low dose rate, this limit may be as low as  $2 \times 10^5$  Gy, or even  $10^5$  Gy for some polyolefins, which are rather sensitive to degradation in the presence of oxygen [15].

radiation est l'air, et la température maximale est de 60°C. Plus de détails sur les conditions d'irradiation et de dosimétrie peuvent être trouvés dans la référence [20].

## 5. Présentation des résultats

Les listes des matériaux (avec leurs fournisseurs respectifs) pour lesquels nous donnons des résultats et ceux présentés dans les volumes précédents constituent l'appendice 1. Pour y retrouver facilement un matériau dont on ne connaît le nom qu'en français, nous avons préparé une liste de traductions (voir tableau 3).

L'appendice 2 donne les noms déposés des matériaux, avec leur nom chimique.

L'appendice 3 est la compilation des résultats. Sous chaque lettre de l'alphabet on peut y trouver les informations suivantes:

- Noms des matériaux (nom du commerce et/ou nom chimique) et leur formule chimique, si connue.
- Quelques informations sur la radiorésistance des matériaux pour le cas où les données détaillées manquent.
- Les résultats, sous forme de tableaux, des essais de radiorésistance de tous les matériaux d'un même type. Dans ces tableaux, on trouve le numéro TIS d'identification, le type de matériau ou sa désignation commerciale, le nom du fournisseur, les doses d'exposition, les débits de dose; viennent ensuite les valeurs de la force et de l'élongation à la rupture en essais de traction, les valeurs de la dureté Shore D, la valeur de l'indice d'oxygène mesuré avant irradiation, et enfin la valeur de l'indice de rayonnement au débit de dose considéré.
- Les résultats individuels des essais, pour chaque matériau, sous forme de graphique et tableau, conformément à la norme CEI 544 [21].

L'appendice 4 donne les noms des fournisseurs de matériaux et de câbles qui ont collaboré à ce catalogue.

L'appendice 5 présente les principales abréviations utilisées dans les tableaux de résultats.

## 6. Classification des matériaux

Dans le tableau 2, nous classons les matériaux dans l'ordre décroissant de leur tenue aux radiations. Ce classement correspond à des irradiations accélérées; il ne donne donc qu'un ordre de grandeur de la dose jusqu'à laquelle les produits peuvent être utilisés. Il ressort de ce tableau que, même en irradiation accélérée, la plupart des matériaux ont une utilisation limitée à une dose se situant autour de  $5 \times 10^5$  Gy. Lors d'irradiations à long terme, cette dose limite peut être abaissée à  $2 \times 10^5$  Gy, ou même  $10^5$  Gy, pour certaines polyoléfines particulièrement sensibles à la dégradation en présence d'oxygène [15].

## Acknowledgements

This data compilation was carried within the framework of an IAEA Research coordination programme on radiation degradation of polymers (Contract No. 4319, 1985 to 1989).

Our particular thanks are due to K. Goebel and K. Potter at CERN for their interest in this work and for their constant support of radiation-damage studies.

Most of the tested materials were used or proposed for LEP and the SPS at CERN. We thank MM. K. Badke, J. Thorlund and F. Vriens for their collaboration.

We would also like to thank the European manufacturers who have supplied the test samples, both for their interest in the subject and for the useful discussions that we had with representatives of many of them.

The irradiations were carried out in the ASTRA reactor of the Forschungszentrum Seibersdorf in Austria, where we appreciated the collaboration with A. Burtscher and J. Casta, and at Conservatome in Dagneux, France, with Mrs C. Saunier and Mrs M.-O. Bachelier.

Some mechanical tests and oxygen-index measurements were carried out at CERN by P. Beynel. The data processing and the presentation of results were realized from programmes written by G. Tartaglia and R. Tartaglia.

Finally, we thank the CERN Scientific Reports Editing and Text Processing Sections for the effort and attention they have given to this work.

## Remerciements

Cette compilation de résultats s'inscrit dans le cadre d'un Programme de recherche sur la dégradation des polymères par irradiation coordonné avec l'IAEA (contrat no. 4319, 1985 à 1989).

Nous remercions particulièrement K. Goebel et K. Potter, du CERN, pour l'intérêt qu'ils ont montré pour ce travail et leur soutien continu des études de dégradation des matériaux due aux rayonnements.

La plus grande partie des matériaux testés ont été utilisés ou proposés pour le LEP et au SPS (CERN). Nous remercions MM. K. Badke, J. Thorlund et F. Vriens pour leur bonne collaboration.

Nous tenons aussi à remercier les fabricants de câbles européens qui ont fourni des échantillons d'essais; nous avons eu des discussions utiles avec les représentants de nombreuses firmes.

Les irradiations ont été effectuées au réacteur ASTRA du Forschungszentrum Seibersdorf en Autriche, où nous avons apprécié la collaboration que nous ont offerte A. Burtscher et J. Casta, et à Conservatome, à Dagneux, France, où nous remercions Mmes C. Saunier et M.-O. Bachelier.

Certains des essais mécaniques et des mesures de l'indice d'oxygène ont été effectués au CERN par P. Beynel. Le traitement des données et la présentation des résultats sont réalisés à partir de programmes écrits par G. Tartaglia et R. Tartaglia.

Nous voudrions enfin exprimer notre appréciation de l'effort et de l'attention que le Service de dactylographie de rapports scientifiques a apportés à la présentation de ce document.

## References

- [1] J.F. Kirchner and R. Bowman, Effects of radiation on materials and components (Reinhold Publishing Corp., New York, 1964).
- [2] R.O. Bolt and J.G. Carroll, Radiation effects on organic materials (Academic Press, New York, London, 1963).
- [3] B. Doležel: Die Beständigkeit von Kunststoffen und Gummi, chapter 2: Beständigkeit gegen ionisierende Strahlung (Carl Hanser Verlag, Munich and Vienna, 1978), p. 303.
- [4] M.H. Van de Voorde, Effects of radiation on materials and components, CERN 70-5 (1970).
- [5] M.H. Van de Voorde and C. Restat, Selection guide to organic materials for nuclear engineering, CERN 72-7 (1972).
- [6] D.C. Phillips, The effects of radiation on electrical insulators in fusion reactors, AERE-R8923 (UK Atomic Energy Authority, Harwell, 1978).
- [7] D.C. Phillips et al., The selection and properties of epoxide resins used for the insulation of magnet systems in radiation environments, CERN 81-05 (1981).
- [8] O. Stuetzer, Status report: Correlation of electrical cable failure with mechanical degradation, Sandia Report SAND 83-2622 and NUREG/CR 3623 (1984).
- [9] H. Schönbacher and M. Van de Voorde, Radiation and fire resistance of cable insulating materials used in accelerator engineering, CERN 75-3 (1975).
- [10] R. Grueb, B. Langeset, P. Maier and H. Schönbacher, Life performance of an EPR-insulated power cable exposed in service beyond 3 MGy in a high-level radiation area, Nucl. Instrum. Methods **214**, 469 (1983).
- [11] H. Schönbacher, Life experience with aging of organic electrical insulating materials in nuclear radiation environment, Proc. ANS/ENS Int. Topical Meeting on Operability of Nuclear Power Systems in Adverse Environments, LaGrange Park, 1987, p. 516.
- [12] P. Maier and A. Stolarz, Long-term radiation effects on commercial cable-insulating materials irradiated at CERN, CERN 83-08 (1983).
- [13] G. Lipták et al., Radiation tests on selected electrical insulating materials for high-power and high-voltage application, CERN 85-02 (1985).
- [14] F. Hanisch et al., Effects of radiation types and dose rates on selected cable-insulating materials, Radiat. Phys. Chem. Vol. 30, No. 1, pp. 1-9, 1987.
- [15] R.L. Clough, K.T. Gillen, J.C. Campan, G. Gaussens, H. Schönbacher, T. Seguchi, H. Wilski and S. Machi, Accelerated Aging Tests for Predicting Radiation Degradation of Organic Materials, Nuclear Safety, Vol. 25, March-April 1984.
- [16] H. Schönbacher and A. Stolarz-Izicka, Compilation of radiation damage test data—Part I: Cable-insulating materials, CERN 79-04 (1979).
- [17] H. Schönbacher and A. Stolarz-Izicka, Compilation of radiation damage test data—Part II: Thermosetting and thermoplastic resins, CERN 79-08 (1979).
- [18] P. Beynel, P. Maier and H. Schönbacher, Compilation of radiation damage test data—Part III: Materials used around high-energy accelerators, CERN 82-10 (1982).
- [19] International Electrotechnical Commission, Geneva, Publication No. 544: Guide for determining the effects of ionizing radiation on insulating materials, Part 1: Radiation interaction, Ref. 544-1 (1977). Part 2: Procedures for irradiation, Ref. 544-2 (1979). Part 3: Test procedures for permanent effects, Ref. 544-3 (1979). Part 4: Classification system for service in radiation environments, Ref. 544-4 (1985).
- [20] H. Schönbacher et al., Study on radiation damage to high-energy accelerator components by irradiation in a nuclear reactor, Kerntechnik **17**, 268 (1975).
- [21] G.P. Tartaglia and P. Beynel, Radiation damage to insulation materials: Test and data evaluation procedures following IEC Standard 544, CERN Divisional report TIS-RP/180 (1986).
- [22] Proc. Research Coordination Meeting on Radiation Damage to Organic Materials in Nuclear Reactor and Radiation Environment, Takoseki, 12-20 July 1989 (IAEA Technical Report Series, Vienna 1990).
- [23] R.L. Clough, Radiation resistant polymers, in Encyclopedia of Polymer Science and Engineering (to be published by John Wiley & Sons, New York).

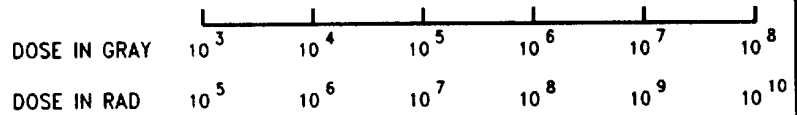
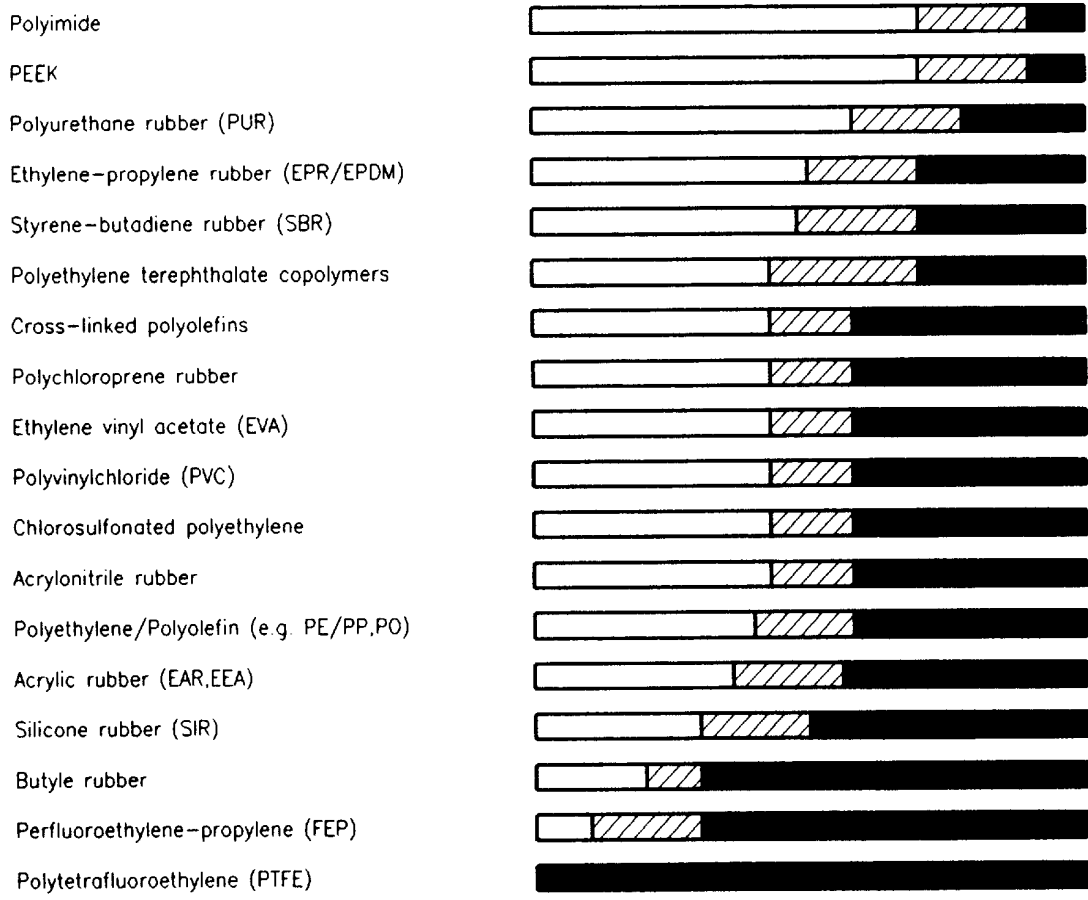
**Table 1**  
Main characteristics of some materials

Properties	EAR EEA	EPR std	EPDM f	EVA	Kapton	PUR	PE	XLPE	Silicone rubber	Butyl rubber	PEEK
<i>Physical</i>											
Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )	1.09	0.86		0.94	1.42	1.1-1.3	0.91-0.96		1.2-1.5	1.3	1.3-1.5
Water absorption (%)				< 0.01	1.3	0.6-0.8	< 0.01		0.5-2.4		0.5
Thermal conductivity (kcal/m·h·°C)							0.28				0.25-0.9
Thermal coefficient of expansion (10 <sup>-5</sup> /°C)							16-30		15-16		2-5
<i>Electrical</i>											
Dielectric constant at 1 kHz		2.5-4.0	3.2-4.5	4.2-5.3	3.5	6.0	2.2-4.5		3.0	7-10	3.2
Loss factor at 1 kHz		0.02-0.004		0.05	0.003	0.005	0.05-0.0003		0.004		0.003
Resistivity (Ω·m)		10 <sup>11</sup> -10 <sup>15</sup>		10 <sup>14</sup> -10 <sup>15</sup>	10 <sup>14</sup>	10 <sup>11</sup> -10 <sup>13</sup>	10 <sup>15</sup> -10 <sup>16</sup>		10 <sup>13</sup>	10 <sup>12</sup> -10 <sup>14</sup>	10 <sup>12</sup> -10 <sup>15</sup>
Dielectric strength (kV/mm)		15-30		20	160-280	15	15-25		16-28	6-20	15-20
<i>Mechanical</i>											
Ultimate tensile strength (MPa)	11.7-22	3.9-8.8		10-15	118-168	24.5-34.3	12.3-17.7		5.9-8.8	17-21	120-200
Ultimate elongation (%)	270-500	250-550		320-600	50-70	400-600	600-650   200-350		400-600	400-900	2-50
Hardness Shore D		15-36		32-40		30-40	32-55			10-35	
Abrasion resistance compared to PVC		worse		same to worse	better	better	same to worse		worse	good	
<i>Combustion</i>											
Toxic gases <sup>a)</sup>											
CO <sub>2</sub>		m				m	m		l		
SO <sub>2</sub>		l				o	o		o		
HF		o				o	o		o		
HCN		o				l	o		o		
Hydrocarbon		h				m	m		l		
Max. temperature (°C) permanently	140-150	85-90			200	70	70   85-90		150		250
t < 4 h		160-180				100	90-180		320		
t < 4 s		250					150				
Oxygen index	20-25	18-21   23-31		18-22	50-90	19-22	18-20		24-35		24-35
Fume production <sup>a)</sup>		h			l	m	h		l		

a) For toxic gas content and fume production: l = low; m = medium; h = high; o = nothing; all gases contain CO.

std = standard material, f = special flame-retardant material.

**Table 2**  
**Classification of materials according to their radiation resistance**



Appreciation of Damage	Elongation	Utility	Symbol
Incipient to mild	75-100 % OF IN. VALUE	Nearly always usable	
Radiation index area	25-75 % OF IN. VALUE	Often satisfactory	
Moderate to severe	< 25 % OF IN. VALUE	Not recommended	



**Tableau 3**

Noms, en ordre alphabétique, de tous les matériaux cités dans ce volume, avec le titre en anglais sous lequel on peut les trouver dans le catalogue.

Les noms *en italiques* sont des marques de fabrique, ou des noms déposés, pour lesquels nous ne donnons pas de traduction.

En français	En anglais
<i>Acorad</i>	
<i>Afumex</i>	
Caoutchouc butyle	Butyl rubber
Caoutchouc acrylique d'éthylène	EAR, EEA
Caoutchouc éthylène-propylène	EPR
Caoutchouc éthylène-propylène diène monomère	EPDM
Caoutchouc silicone	SIR
Caoutchouc thermoplastique	Thermoplastic rubber (TPR)
<i>Chlorostop</i>	
Chlorure de polyvinyle	PVC
<i>Cogegum</i>	
<i>Desmopan</i>	
<i>Elastollan</i>	
Éthylène-acétate de vinyle	EVA
<i>Flamtrol</i>	
<i>Halar</i>	
<i>Hypalon</i>	
<i>Hytrel</i>	
<i>Kapton</i>	
<i>Lupolen</i>	
<i>Megolon</i>	
<i>Neoprene</i>	
<i>Nordel</i>	
Polyéthylène	PE
Polyéthylène réticulé (PRC)	XLPE
Polyéthylène semiconducteur	Semiconducting PE
Polyoléfines	Polyolefins
Polyuréthane	PUR
<i>Pyrofil</i>	
<i>Radox</i>	
<i>Rheyhalon</i>	
<i>Silanpex</i>	
<i>Silythene</i>	
<i>Sioplas</i>	
<i>Teflon</i>	
<i>Tefzel</i>	
<i>Toxfree</i>	
VAC	
<i>Vamac</i>	
<i>Viton</i>	



## Appendix 1a:

### LIST OF MATERIALS AND RELEVANT SUPPLIERS\*) (FOR THIS EDITION ONLY)

Material (Trade names are in italics)	Supplier
<i>Acorad</i>	Acome
<i>Afumex</i>	Pirelli SPA
<i>Cogegum</i> (blend of EVA and EPDM)	Norsk Kabel EB Padanaplast
<i>Elastollan</i>	Elastogran-EPE
Ethyl acrylate rubber (EAR)	Dätwyler Du Pont de Nemours Norsk Kabel EB
Ethylene ethyl acrylate (EEA)	BP Chemicals Fulgor Cavi
Ethylene-propylene diene monomer rubber (EPDM)	Bical - BICC Cables Câbles de Lyon Dätwyler Gorse Huber & Suhner NKT Telecom Cables Studer Kabel
Ethylene-propylene rubber (EPR)	AEG Kabel Cablexport Câbles de Lyon CEAT Cavi Cossonay Câbleries Dätwyler Fulgor Cavi Gorse kabelmetal electro Lynenwerk Metallurgica Bresciana Pirelli SPA Roque Silec Studer Kabel

\*) Addresses may be found in Appendix 4

Ethylene vinyl acetate copolymer (EVA)	<p>BASF  Bical – BICC Cables  BP Chemicals  Cabeltel-Filotex  Câbles de Lyon  Dätwyler  Fulgor Cavi  Gorse  Lynenwerk  NKT Telecom Cables  Norsk Kabel EB  Pirelli SPA  Roque  STC Telecommunications</p>
<i>Lupolen</i> (polyolefin)	<p>BASF  Cabeltel-Filotex  Kabelmetal electro  Pirelli SPA</p>
<i>Megolon</i> (polyolefin)	<p>Lindsay &amp; Williams</p>
Polyethylene (PE)	<p>BP Chemicals  Câbles de Lyon  Huber &amp; Suhner  kabelmetal electro  Neste (ex-Unifos)  NKT Telecom Cables  Norsk Kabel EB  Silec  Studer Kabel</p>
Polyolefin	<p>Acome  AEG Kabel  AEI Compounds  Bical – BICC Cables  BP Chemicals  Cabeltel-Filotex  Cablexport  Dätwyler  Lindsay &amp; Williams  Metallurgica Bresciana  Neste (ex-Unifos)  NKT Telecom Cables  Norsk Kabel EB  Padanaplast  Pirelli SPA  Silec</p>
Polyurethane (PUR)	<p>Elastogran – EPE  Huber &amp; Suhner  Metallurgica Bresciana</p>
<i>Radox</i> (Polyolefin base)	<p>Huber &amp; Suhner</p>
<i>Rheyhalon</i> (polyolefin or rubber)	<p>AEG Kabel</p>
Semiconducting polyethylene	<p>Gorse  Silec</p>
<i>Silanpex</i> (EVA base)	<p>NKT Telecom Cables</p>

Silicone rubber (SIR)	Gorse
<i>Silythene</i> (PE)	Silec
<i>Sioplas</i> (polyolefin)	AEI Compounds NKT Telecom Cables STC Telecommunications
Thermoplastic rubber (TPR)	BP Chemicals
<i>Toxfree</i> (polyolefin or rubber)	Cablexport CEAT Cavi
VAC (vinyl acetate copolymer)	kabelmetal electro
<i>Vamac</i> (EAR)	Du Pont de Nemours Norsk Kabel EB
XLPE (cross-linked polyethylene)	AEG Kabel Fulgor Cavi Gorse Metallurgica Bresciana Padanaplast Pirelli SPA Silec

## Appendix 1b:

### LIST OF MATERIALS PRESENTED IN THE PREVIOUS VOLUMES (Trade names in italics)

#### Volume I: Cable insulating materials (Ref. 16)

Butyl rubber  
*Chlorostop*  
Chlorosulfonated polyethylene (CSP)  
Cross-linked polyethylene (XLPE)  
*Desmopan*  
Ethyl-acrylate rubber (EAR)  
Ethylene-propylene diene rubber (EPDM)  
Ethylene-propylene rubber (EPR)  
Ethylene vinyl acetate (EVA)  
*Flamtrol*  
Fluoropolymer  
*Halar*  
*Hypalon*  
*Hytrel*  
*Kapton*  
*Lupolen*  
*Neoprene*  
*Nordel*  
Polychloroprene  
Polyethylene (PE)  
Polyurethane (PUR)  
Polyvinyl chloride (PVC)  
*Pyrofil*  
*Radox*  
Semiconducting polyethylene  
Silicone rubber  
*Silythene*  
*Stilan*  
*Teflon*  
*Tefzel*  
*Viton*  
XLPE

#### Volume II: Thermoplastic and thermosetting resins (Ref. 17)

*Araldite B*  
*Araldite D*  
*Araldite F* and other *Araldite* resins  
*Araldite F* + epoxy *Novolac*  
*Birakrit*  
*Cevolit*  
*Crystic*  
*Dobeckan IF*  
*Dobeckot*

*Epikote*  
Epoxy resins  
Epoxy resins + epoxy *Novolac*  
*Etronax*  
*Isoval*  
*Kerimid*  
*Kinel*  
*Makrolon*  
*Novolac*  
*Orlitherm*  
Phenolic resins  
Polycarbonate resins  
Polyester resins  
Polyimide resins  
*Polylite*  
Polyurethane resins  
*Resofil*  
*Ryton*  
*Samicanit*  
*Samicatherm*  
Silicone resins  
*Veridur*  
*Vetresit*  
*Vetronit*

#### Volume III: Accelerator engineering materials and components (Ref. 18)

Adhesive tape  
Aluminium oxide  
*Araldite*  
Asbestos cement  
Askarel  
*Buna*  
Cable insulation  
Cable tie  
Ceramic  
Cerium-doped glass  
Connector  
Copper wire  
*Diala C*  
Diester oil  
Electronic components  
Epoxy resin  
Ethylene-propylene rubber (EPR) and (EPDM)  
Ethylene-tetrafluoroethylene copolymer (ETFE)  
Fluorinated oil

Fluorinated polymer  
Foam  
Glass  
Glass fibre  
Heating element  
HF absorber  
Hoses  
*Hostalen*  
*Hypermalloy*  
*Hytrel*  
Insulated wire  
Insulating oil  
Insulating sleeve  
Insulating tape  
Iron  
Joint  
*Kapton*  
*Kevlar*  
*Kynar*  
Lighting  
Lithium polysilicate  
Lubricating oil  
Luminous paint  
*Lupolen*  
Magnet coil insulation  
Magnetic material  
*Makrolon*  
*Micatherm*  
Microswitch  
Mineral oil  
Motor, electric  
*Mylar*  
*Neoprene*  
Nitrile-butadiene rubber  
*Nomex*  
*Noryl*  
*Novolac*  
*Nylon*  
Oil  
Optical fibre  
O-ring  
Paint  
Paper  
Particle detector  
*Pertinax*  
*Plexiglas*  
Polyacrylate  
Polyamide  
Polybutylene terephthalate (PBTP)  
Polycarbonate  
Polychloroprene (*Neoprene*)

Polyester resin  
Polyethylene (PE) and (XLPE)  
Polyethylene terephthalate (PETP)  
Polyhydantoin  
Polyimide  
Polyolefin  
Polyphenylene oxide (PPO)  
Polyphenylene sulfide (PPS)  
Polypropylene (PP)  
Polysiloxane  
Polytetrafluoroethylene (*Teflon* PTFE)  
Polyurethane resin (PUR)  
Polyurethane rubber (PUR)  
Polyvinyl chloride (PVC)  
Polyvinyl toluene  
Quartz  
Relay  
Resin  
*Resistofol*  
Rubber  
*Ryton*  
Scintillator  
*Scotchcal*  
Seal (O-ring)  
Silica  
Silicon detector  
Silicone oil  
Silicone rubber  
Sleeve  
Styrene-butadiene rubber (SBR)  
Switch  
Tape  
*Teflon* (PTFE)  
*Tefzel*  
Terminal board  
Textile  
Thermoplastic resin  
Thermosetting resin  
Thermoshrinking sheath  
Vacuum chamber tube  
Vacuum gasket  
Vacuum pump accessory  
Vacuum seal  
Vacuum valve  
*Valvata*  
Valve  
*Vestolene*  
*Viton*  
Wire  
Wood

## Appendix 2:

### TRADE AND POPULAR NAMES AND CORRESPONDING CHEMICAL NAMES OF MATERIALS PRESENTED IN THIS EDITION

Acorad	Polyolefin
Afumex	Polyolefin
Cogegum	Blend of polyolefin and rubber
Elastollan	Polyurethane
Lupolen	Polyolefin (PE or EVA)
Megolon	Polyolefin
Radox	Polyolefin
Rheyhalon	Polyolefin or rubber
Silanpex	EVA base
Silythene	Polyethylene
Sioplas	EVA base
Toxfree	Polyolefin or rubber
Vamac	Ethyl acrylate rubber