

## 2 - Du papier imprégné aux isolants synthétiques dans les câbles d'énergie

## 2 - From impregnated paper to polymeric insulating materials in power cables

Robert ARRIGHI

Direction des Etudes et Recherches  
Electricité de France

*Dans le domaine des câbles d'énergie, comme dans beaucoup d'autres domaines de l'électrotechnique, les recherches et les premières réalisations faites au cours de la deuxième moitié du 19<sup>e</sup> siècle portaient en germe les techniques développées au 20<sup>e</sup> siècle.*

*Pendant plus de 70 ans, l'isolant au papier imprégné d'huile-résine, ou simplement d'huile, a dominé l'industrie des câbles, même si les câbles au caoutchouc ont connu un certain développement. Les câbles à huile fluide poursuivent leur carrière vers les très hautes tensions et les très grandes puissances.*

*C'est dans les années 1960 que l'emploi des matériaux synthétiques extrudés, thermoplastiques ou réticulés, prit son essor. Depuis, un matériau surtout a occupé le devant de la scène: le polyéthylène, utilisé pur ou réticulé, mais l'emploi du caoutchouc d'éthylène-propylène se développe également.*

*Les câbles à isolant synthétique extrudé sont en voie de couvrir tous les besoins courants, de la basse tension jusqu'aux plus hautes tensions de transport actuelles, cela avec une facilité de mise en œuvre et d'exploitation inégalée et une fiabilité que l'on peut déjà considérer comme tout à fait satisfaisante.*

As in many other electrotechnical fields, the research work and the early realizations in the cable field during the second half of the last century held in germ most of the techniques developed in the 20th century.

For more than 70 years, paper impregnated with oil-resin compounds or simply with oil prevailed as an insulating material in cable manufacturing, though rubber insulated cables were also used to some extent. The OF cable technique is going on its road towards very high voltages and ratings.

It was in the 1960's that the use of extruded polymeric materials, either thermoplastic or thermosetting, made a rapid progress. Since then the most prominent material has been polyethylene used either pure or cured, but the use of ethylene-propylene rubber is also developing.

Cables with extruded synthetic insulation are now on the point of meeting all the current needs, from low voltage to the higher existing transmission voltages, with an unequalled ease of installation and operation and a reliability that can already be regarded as quite satisfactory.

---

### 1. Les inventions du 19<sup>e</sup> siècle:

---

#### 1.1. La gutta-percha et la presse à vis.

L'histoire des matières plastiques utilisées dans l'industrie des câbles a tout juste 150 ans.

C'est en 1834, que William Montgomerie, chirurgien, envoyait de Singapour à la Royal Society of Arts de Londres, des échantillons de gutta-percha de Malaisie.

Il s'agissait d'une gomme extraite de certains arbres tropicaux, isomère du caoutchouc, gomme devenant souple et malléable à 100 °C et recouvrant à froid la consistance du cuir.

---

### 1. The 19th century inventions.

---

#### 1.1. Gutta-percha and the screw-pres.

*The history of thermo-plastic materials intended for the cable industry is exactly 150 years old.*

*It was in 1834, that William Montgomerie, a surgeon, sent from Singapore to the Royal Society of Arts of London, Malayan gutta-percha samples.*

*This was a gum extracted from certain tropical trees, an isomer of rubber becoming supple and malleable at 100 °C and recovering the consistency of leather when cold.*

Immédiatement, on en fit une grande variété d'objets, en particulier des tuyaux de toutes sortes.

Du tuyau au câble télégraphique pour lequel on cherchait un isolant, il n'y avait qu'un pas, qui fut franchi au cours d'une conversation entre deux techniciens prestigieux, Michel Faraday et William Siemens. C'est Werner Siemens, frère de William, qui le premier produisit en 1847 quelque 5 000 km de fils télégraphiques isolés. Puis la Gutta-Percha Company Ltd, qui venait de concevoir la première presse à vis (1845), construisit un câble télégraphique qui fut posé à travers la Manche en 1850. Hélas, le câble n'envoya qu'un message et fut coupé, dit-on, par un pêcheur français qui le prit pour une nouvelle espèce d'algue marine.

Bien que malheureuse, cette tentative fut suivie de beaucoup d'autres et jusque vers 1930, la gutta-percha servit d'isolant à la plupart des câbles télégraphiques sous-marins, parmi lesquels plusieurs câbles transatlantiques, dont le premier fut posé en 1868, et le Transpacifique, posé en 1902.

Ainsi l'industrie des câbles naquit d'un besoin de communication.

## 1.2. La presse à plomb.

La gutta-percha ne put être utilisée pour les câbles terrestres, qu'ils soient télégraphiques ou d'éclairage, du fait de l'instabilité de ses propriétés à l'air et de ses caractéristiques mécaniques insuffisantes.

Pour la réalisation de câbles d'éclairage, divers systèmes furent inventés, consistant à placer des conducteurs isolés dans une enveloppe de protection en bois ou en métal : tube de plomb rétreint sur le câble, ou tube d'acier.

Un fait important se place en 1879, lorsque l'ingénieur suisse Borel met au point une presse pour l'extrusion d'une gaine de plomb directement sur les conducteurs isolés.

Dans un exposé fait à Paris en 1881 à l'occasion de la réunion de la Société Internationale des Electriciens, Borel décrit sa presse et le type d'isolation utilisé pour la réalisation d'un câble d'éclairage (fig. 1).

D'autres modèles furent bientôt créés : la presse Siemens-Halske (1881), la presse Robertson (1885), la presse Huber et, bien plus tard, les presses à extrusion continue.

## 1.3. Comment va évoluer l'isolation des câbles d'énergie ?

Dès cette époque, deux tendances se font jour :

- l'emploi de matériau vulcanisé ;
- l'emploi de matériau imprégné.

Le caoutchouc naturel vulcanisé est connu depuis 1839, mais il est cher. En 1881, Callender invente l'isolant au bitume vulcanisé, mais il ne semble pas que cette invention ait eu beaucoup de suites et, malgré son prix, le caoutchouc vulcanisé chargé connaîtra un développement continu jusqu'à l'apparition des caoutchoucs synthétiques.

A la même époque, Borel utilise le jute imprégné de paraffine et de colophane et réalise des câbles monopolaires concentriques à 3 000 V, qui sont posés à Paris en 1890.

Selon la même technique, Siemens fabrique des câbles à 2 000 V, posés à Rome et Milan en 1886.

Signalons aussi le système Brooks, dans lequel deux câbles isolés au jute imprégné d'un mélange huile - résine à 50 % sont tirés dans un tube d'acier, le tout étant

*Immediately, a large diversity of objects, especially pipes of every kind, were made up from it.*

*From a pipe to a telegraphic cable for which an insulating material was searched after, it was only one step, which was leapt in the course of a conversation between two marvellous scientists Michel Faraday and William Siemens. It was William's brother, Werner Siemens, who first produced in 1847 about 5 000 km of insulated telegraph-wire. The the Gutta-Percha Company Ltd, which had just designed the first screw-press (1845), built a telegraph-cable which was laid across the English Channel in 1850. Alas, the cable transmitted only one message and was cut, it was said, by a French fisherman who took it to be a new species of sea-weed.*

*Although unsuccessful, this attempt was followed by many other endeavours and gutta-percha served as an insulating material for most of the submarine telegraph cables until about 1930; these comprised several transatlantic cables, the first of which was laid in 1868, and the transpacific cable laid in 1902.*

*Thus the cable industry was born of a communication need.*

## 1.2. The lead press'birth.

*Gutta-percha could not be used for land cables, whether telegraphic or lighting cables, owing to the instability of its properties in the air and to its inadequate mechanical characteristics.*

*For the realization of lighting cables, diverse systems were devised, consisting in putting insulated cores into a wooden or metallic protective covering: lead tube shaped onto the cable or steel pipe.*

*An important event occurred in 1879 when the Swiss engineer Borel completed a press for extruding a lead sheath directly on the insulated cores.*

*In a statement presented at the meeting of the Société Internationale des Electriciens held in Paris in 1881, Borel described his press and the type of insulation used for the achievement of a lighting cable (fig. 1).*

*Other models were created short after: the Siemens-Halske press (1881), the Robertson press (1885), the Huber press and much later, the continuous extrusion presses.*

## 1.3. How the insulation of power cables is going to evolve?

*From that time two tendencies have forced their way through:*

- the use of vulcanized material;
- the use of impregnated material.

*The vulcanized natural rubber was known since 1839, but it was expensive. In 1881, Callender devised the vulcanized bitumen insulation, but it does not seem that this invention had many consequences and in spite of its price, the filled vulcanized rubber will experience a continuous development until the appearance of synthetic rubbers.*

*At the same time, Borel, making use of paraffin and colophony-impregnated jute, realized concentric single-core cables at 3,000 V, which were laid in Paris in 1890.*

*According to the same technique Siemens manufactured cables at 2,000 V, laid in Rome and Milano in 1886.*

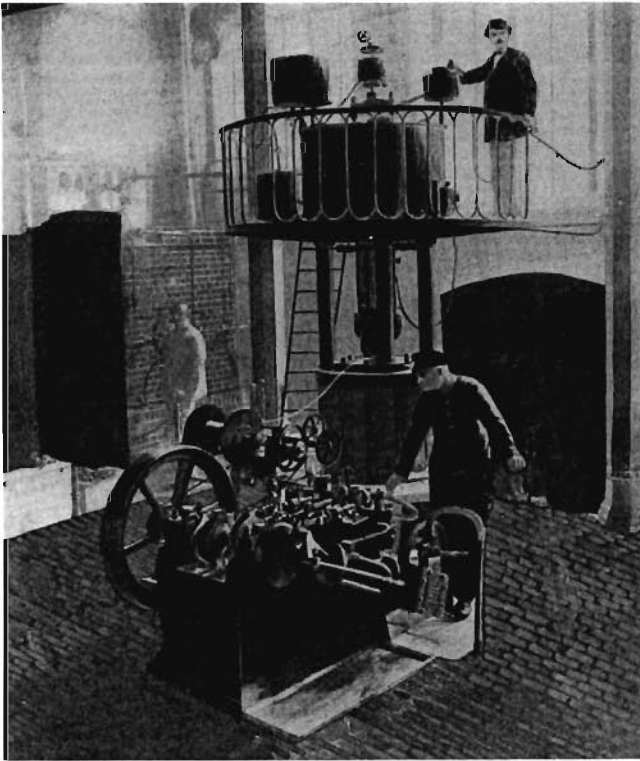


Fig. 2. Pose d'un câble papier 60 kV à imprégnation visqueuse.  
Fig. 2. Laying of a 60 kV mass impregnated paper insulated cable.

Fig. 1. Presse à plomb de Borel.  
Fig. 1. Borel's lead press.

maintenu sous pression par un réservoir d'huile extérieur. Le principe du câble sous pression était trouvé.

#### 1.4. Le papier imprégné.

Le papier imprégné apparaît en 1890, lorsque Ferranti réalise un câble 10 000 V constitué de bandes de papier de 6 m de largeur enroulées sur un tube de cuivre, placées dans un deuxième tube de cuivre retreint, le deuxième tube étant recouvert à son tour de bandes de papier et le tout tiré dans un tube d'acier ; l'intervalle entre câble et tube est rempli de bitume fondu. Plus de 40 km de câble furent ainsi réalisés en longueurs de 6 m reliées entre elles par des jonctions, confectionnées après taille de l'isolant en forme de cône.

Parallèlement, l'emploi de bandes de papier étroites enroulées en hélice est expérimenté aux Etats-Unis et, après une tentative réussie en 1893, les câbles isolés au papier imprégné de matière visqueuse sous gaine de plomb commencent leur carrière.

Quant aux conducteurs, ils sont en général en cuivre, mais l'intérêt de l'aluminium est déjà souligné et des essais de conducteurs de sodium ont lieu. Les conducteurs, de massifs pour les très petites sections, sont devenus câblés pour les plus grosses et des conducteurs sectoriaux apparaissent vers 1892.

---

## 2. Les câbles isolés au papier imprégné.

---

### 2.1. L'ascension des tensions.

On peut dire, pour résumer cette période, que les techniques qui vont dominer l'industrie des câbles d'énergie

*Let us also recall the Brooks system in which two cables with a 50% oil-resin compound impregnated jute insulation were pulled into a steel pipe, the whole being maintained under pressure by an external oil tank. The principle of the pressurized cable was found.*

#### 1.4. Mass impregnated paper.

*Mass impregnated paper appeared in 1890, when Ferranti realized a 10,000 V cable consisting of paper tapes 6 meter wide, wound round a copper pipe, placed in a second shaped copper pipe, this latter being in its turn covered with paper tapes and the whole being pulled into a steel pipe; the gap between cable and pipe was filled with melted bitumen. In this manner, more than 40 km of cable were realized in 6 meter lengths linked to each other by joints made after cutting the insulation in a taper shape.*

*Concurrently, the use of narrow helically lapped paper tapes was experimented in the United States and after a successful attempt in 1893, lead sheathed, impregnated paper insulated cables came into use.*

*As to the conductors, they were generally made of copper, but the interest of aluminium was being already emphasized and tests of sodium conductors were carried out. The conductors which were solid for very small cross-sections, became stranded for the largest ones, and shaped conductors appeared by 1892.*

---

## 2. Paper insulated cables.

---

### 2.1. The ascent of voltages.

*To sum up this era, it can be said that the principle underlying the techniques which were going to dominate*

pendant plus d'un demi-siècle sont connues dans leur principe, et que déjà l'ascension des tensions a commencé grâce aux études théoriques de répartition du champ électrique dans l'isolant, qui furent alors entreprises.

Avant la fin du siècle, la tension de 10 - 11 kV est atteinte dans plusieurs pays.

En 1897, un câble 13 kV isolé au caoutchouc est posé à Minneapolis; en 1900, un câble 25 kV au caoutchouc est essayé à St-Paul (Minnesota) et, en 1902, un câble de ce type est posé à Montréal.

En 1911, les premières liaisons en câbles haute tension isolés au papier imprégné sont mises en service à 60 kV en Allemagne, à 50 kV à Barcelone.

En 1913 existent des câbles tripolaires à ceinture à 30 kV, mais ils donnent des déboires du fait de la valeur excessive du gradient tangentiel aux couches de papier. C'est alors qu'Hochstädter a l'idée du fameux écran métallique placé sur chaque conducteur isolé, écran qui permet de réaliser des câbles multipolaires à champ radial. Une variante sera le câble triplomb, développé après la première guerre mondiale pour des tensions allant jusqu'à 25 ou 30 kV, et même 60 kV.

## 2.2. Les perfectionnements des câbles à imprégnation visqueuse.

Les câbles au papier imprégné de matière visqueuse seront ensuite perfectionnés. Des compounds minéraux remplaceront les matières végétales, des écrans de papier carbone seront placés sur conducteurs et sur isolant, de nouvelles qualités de papier seront introduites, ainsi que des papiers minces pour augmenter la tenue aux ondes de choc, etc. Vers 1960, on utilisera des matières chargées de cire, moins fluides et électriquement plus stables que les matières huile - résine. Dans certaines spécifications, la gaine de plomb sera remplacée par une gaine d'aluminium lisse ou ondulée, qui en basse tension servira de conducteur neutre.

Mais les fondements de la technique resteront les mêmes et ce type de câble, dans ses différentes spécifications, constituera la quasi-totalité des réseaux publics et privés, de la basse tension jusqu'à 60 - 70 kV, et exceptionnellement 90 kV (fig. 2).

## 2.3. Les accessoires des câbles au papier imprégné.

Bien entendu des accessoires — jonctions, dérivations extrémités — seront mis au point en tant que de besoin. Selon les tensions, ils seront à remplissage de compound (huile, résine, bitume) pour la basse et la moyenne tension ou à reconstitution d'isolement pour la haute tension.

Dans tous les cas, l'étanchéité sera recherchée et, dans les modèles les plus performants, obtenue par une chemise de plomb ou de cuivre soudée au plomb du câble.

Il serait fastidieux de décrire la multitude de modèles qui furent créés. Disons que tous avaient l'inconvénient d'être lourds, encombrants et de montage long et parfois délicat.

## 2.4. Les câbles « papier » à courant continu.

La première réalisation dans ce domaine est très ancienne. Il s'agissait de la liaison Lyon - Moutiers, construite en 1906

*the power cable industry for more than half a century was known, and that the ascent of voltages commenced thanks to theoretical studies which were then undertaken on the electric field distribution within the insulation.*

*Before the end of the century, the 10-11 kV voltage level was reached in several countries.*

*In 1897, a 13 kV rubber insulated cable was laid in Minneapolis; in 1900, a 25 kV rubber insulated cable was tested in St Paul (Minnesota) and in 1902, a cable of this type was laid in Montreal.*

*In 1911, the first links of high-voltage cables with impregnated paper insulation were commissioned at 60 kV in Germany and at 50 kV in Barcelona (Spain).*

*In 1913, there existed 30 kV belted three-core cables, but they suffered many failures because of the excessive value of the gradient tangential to the paper layers. By then Hochstädter had the idea of the well-known metallic screen placed over each insulated conductor, making it possible to realize screened multi-core cables. One variant was the three-lead sheathed cable developed after the first World War for voltages up to 25 or 30 kV, and even 60 kV.*

## 2.2. Improvements of mass impregnated cables.

*Afterwards, the technique of the mass impregnated cable has been improved. Mineral compounds have replaced vegetable substances, carbon-black paper screens were placed on the conductors and on the insulation, new paper grades were introduced as well as thin papers to increase the strength to impulse waves, etc. By 1960, use was made of wax-filled compounds, less fluid and electrically more stable than oil-resin compounds. In some specifications, the lead sheath was replaced by a smooth or corrugated aluminium sheath which served in low voltage as the neutral conductor.*

*However the fundamentals of the technique remained the same and this type of cable, in its various designs, formed the quasi-totality of public and private power networks, ranging from low voltage to 60-70 kV, and exceptionally 90 kV (fig. 2).*

## 2.3. Accessoires for mass impregnated paper insulated cables.

*Of course, accessories — straight and branch joints, terminations — were developed as much as necessary. According to voltages, they were either filled with compound (oil, resin, bitumen) for low and medium voltages or with hand-lapped insulation reconstitution for higher voltages.*

*In all cases, the tightness was searched for and obtained in the most efficient models by means of a lead or copper sleeve welded to the cable's lead sheath.*

*It would be too irksome to describe the multitude of models that were created. Let us say all of them had the drawback of being heavy and cumbersome, and needed lengthy and sometimes difficult fitting.*

## 2.4. D.C. paper insulated cables.

*The first installation in this field is very old. This was the Lyon-Moutier link constructed in 1906 according to*

selon le système Thury (courant constant - tension variable) et qui comprenait deux câbles monopolaires sous plomb et armure de 4 km de longueur ; la tension maximale était de 150 kV.

Depuis, ce type de câble a surtout été utilisé pour la réalisation de liaisons sous-marines. Citons entre autres :  
— l'alimentation de l'île de Gotland en 1954 ( $\pm 100$  kV, 20 MW) ;  
— la première liaison France - Angleterre en 1961 (deux câbles  $\pm 100$  kV, 160 MW) ;  
— l'alimentation de l'île de Vancouver en 1969 (trois câbles  $\pm 300$  kV, 500 MW) ;  
— la traversée du Skagerrak en 1976-1977 (deux câbles  $\pm 250$  kV, 500 MW), où la profondeur de pose atteint 550 mètres ;  
— la très prochaine nouvelle liaison France - Angleterre (huit câbles  $\pm 270$  kV, 2 000 MW).

Ainsi, l'avenir du câble à imprégnation visqueuse est désormais limité à la réalisation de liaisons à courant continu jusqu'à une tension de l'ordre de 300 kV.

## 2.5. Le câble à huile fluide.

Le câble isolé au papier imprégné de matière visqueuse ne pouvait longtemps suffire aux besoins, car il est par nature sujet à un phénomène de contraction - dilatation, disons de « respiration », sous l'effet des cycles d'échauffement et de refroidissement qu'il subit en exploitation.

Ce phénomène est dû à la grande différence des coefficients de dilatation des métaux qui le constituent d'une part, et de la matière d'imprégnation d'autre part. Au refroidissement, des vides se créent dans l'isolant et, à partir d'un certain niveau de tension, sont le siège de décharges électriques néfastes.

Le phénomène a deux conséquences :

— le gradient de tension admissible est limité à 4 - 5 kV/mm et, par voie de conséquence, la tension maximale de service à environ 60 kV ;  
— la température maximale admissible aux conducteurs est au plus de 50 à 60 °C.

Un premier remède est proposé en 1917 par Emmanuelli, qui conçoit un câble à conducteur creux dans lequel peut circuler de l'huile provenant de réservoirs extérieurs maintenus sous pression. Le « poumon » qui permet au câble de « respirer », lui est extérieur.

En 1926, Emmanuelli accepte une commande de câbles à huile à 132 kV pour New York et Chicago et réalise, en 1927 à Milan, un câble tripolaire à 70 kV.

En 1932, il expérimente un câble à 225 kV, et, en 1936, quatre constructeurs français mettent en service la première liaison à 225 kV de 18 km de longueur entre les postes d'Ampère et de Clichy-sous-Bois. Le gradient maximal est de 9,5 kV/mm, c'est-à-dire double du gradient admissible dans les câbles sans pression.

Ce câble s'est très bien comporté, et l'on fêtera bientôt son (premier) cinquantenaire.

## 2.6. Perfectionnements du câble à huile.

La technique du câble à huile n'a cessé de se perfectionner depuis, grâce à l'augmentation de la pression de fonctionnement (quoique cette question ait été fort débattue), l'alimentation en huile à la fois par le conducteur

*the Thury system (constant current - variable voltage), which comprised two lead sheathed, armoured single-core cables, 4 km long; the maximum voltage was 150 kV.*

*Ever since, this cable has been mostly used for the realization of submarine links. Let us quote among others:*

*— the power supply to the Gotland Isle in 1954 ( $\pm 100$  kV, 20 MW);*  
*— the first France - England link in 1961 (two cables  $\pm 100$  kV, 160 MW);*  
*— the power supply to the Vancouver Isle in 1969 (three cables  $\pm 300$  kV, 500 MW);*  
*— the crossing of the Skagerrak Strait in 1976-1977 (two cables  $\pm 250$  kV, 500 MW), where the laying depth attains 550 metres;*  
*— the imminent new France - England link (eight cables  $\pm 270$  kV, 2,000 MW).*

*Thus, the future of mass-impregnated paper insulated cables is henceforth limited to the realization of DC links up to a voltage of the order of 300 kV.*

## 2.5. Self-contained oil-filled cables.

*The mass-impregnated paper insulated cable could not for long meet the needs, because it is by nature subject to a contraction-expansion, say a « respiration », phenomenon under the influence of heating and cooling cycles to which it is submitted in operation.*

*This phenomenon is due to the large difference in the expansion coefficients of the metals used for the cable, on the one hand, and of the impregnation compounds, on the other. Under cooling conditions voids are created within the insulation, which, up from a certain voltage level, are the seat of harmful electrical discharges.*

*The phenomenon has two consequences:*

*— the permissible voltage gradient is limited to 4 - 5 kV/mm and, accordingly, the working maximum voltage to about 60 kV;*  
*— the permissible maximum temperature at the conductors is of 50 to 60 °C at the utmost.*

*A first remedy was proposed in 1917 by Emmanuelli who designed a hollow conductor cable in which oil can circulate from external tanks maintained under pressure. The « lung » enabling the cable to « breath » was outside the cable.*

*In 1926, Emmanuelli accepted an order concerning 132 kV oil-filled cables for New York and Chicago, and realized in 1927 a 70 kV three-core cable link in Milano.*

*In 1932, he tested a 225 kV cable, and, in 1936, four French manufacturers commissioned the first 225 kV link, 18 km long, between the Ampère and the Clichy-sous-Bois substations. The maximum gradient was 9,5 kV/mm, that is to say, double that permissible in cables without pressure.*

*This cable has behaved very well, and its (first) fiftieth anniversary will be celebrated soon.*

## 2.6. Improvements of the oil-filled cable.

*The technique of the self-contained oil-filled cable did not cease improving since, thanks to the increase of the operating pressure — though this question has been argued —, the oil feeding both by the conductor and*

et par des canaux placés à l'extérieur de l'isolant, l'introduction de papiers minces près du conducteur, qui accroît la rigidité diélectrique au choc, l'imprégnation continue, qui permet de grandes longueurs de fabrication, l'introduction de la gaine d'aluminium qui évite le frettage de la gaine de plomb, etc. Chaque perfectionnement du câble mériterait des explications, de même que ceux apportés aux accessoires spécifiques à ce type de câble, qui sont évidemment à reconstitution totale d'isolant et de technique très élaborée.

## 2.7. Des réalisations remarquables.

Le câble à huile fluide donne lieu à des réalisations remarquables. On a cité celles d'avant-guerre. Citons depuis :

— en 1940, l'invention du câble plat par Mollerhøj (Danemark) ; dans ce câble, les dilatations et contractions de l'huile sont absorbées localement par la déformation de la gaine de plomb frettée par deux lames ondulées élastiques (fig. 3) ;

— en 1952, la réalisation des premiers câbles 400 kV (en fait 525 kV) par les Suédois et les Français, dont l'épaisseur d'isolant est la même que celle des premiers câbles 225 kV (fig. 4) ;

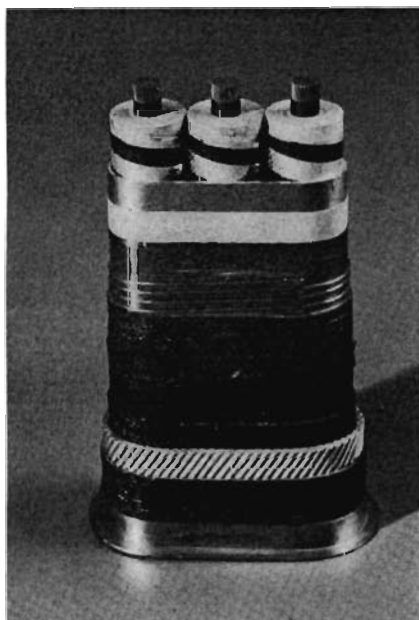


Fig. 3. Le câble plat Mollerhøj.  
Fig. 3. The flat OF Mollerhøj cable.

— vers 1965, la première réalisation en France d'un câble expérimental 750 kV ;

— en 1974, la réalisation de liaisons 500 kV au Japon, et vers 1976, en URSS ;

— en 1978-80, l'étude et l'expérimentation en Italie de câbles à 1 100 kV - 3 000 MVA.

## 2.8. Les perspectives du câble à huile fluide.

La carrière du câble à huile fluide est donc loin d'être terminée, car il se prête à de multiples adaptations :

— le papier peut être remplacé par un isolant mixte papier - film synthétique, dont différentes spécifications ont

channels located outside the insulation, the introduction of thin papers near the conductor which increases the dielectric strength to impulse waves, the continuous impregnation which permits great manufacturing lengths, the introduction of the aluminium sheath which avoids reinforcing the lead sheath, etc. Each improvement of the cable would require explanations, as well as those brought into the accessories particular to this type of cable which are featured, evidently, by a total insulation reconstitution and a very elaborate technique.

## 2.7. Some remarkable realizations.

The oil-filled cable technique has led to numerous and remarkable realizations. We have quoted some achieved before the war. Let us mention since:

— in 1940, the invention of the flat cable by Mollerhøj (Denmark); in this cable, the oil expansion and contraction are absorbed locally through the deformation of the lead sheath reinforced by two elastic corrugated tapes (fig. 3);

— in 1952, the realization by the Swedes and the French of the first 400 kV cables (in fact 525 kV) having the same insulation thickness as that of the first 225 kV cables (fig. 4);

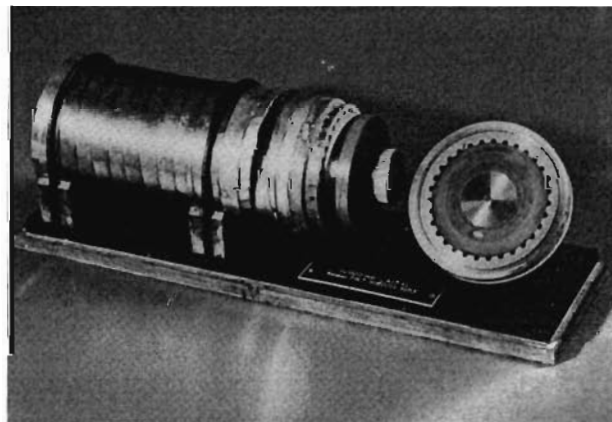


Fig. 4. Câble à huile fluide 425 kV.  
Fig. 4. 425 kV self-contained OF cable.

— by 1965, the first realization in France of a 750 kV experimental cable;

— in 1974, the realization of 500 kV links in Japan and by 1976 in USSR;

— in 1978-1980, the study and experimentation in Italy of a 1,100 kV - 3,000 MVA cable.

## 2.8. The perspectives of the oil-filled cable.

The life of the oil-filled cable technique is thus far from being terminated, for it lends itself to multiple adaptations:

— the paper can be replaced by a paper-synthetic film

déjà été expérimentées et qui permet de réduire les pertes diélectriques et d'augmenter la tension de fonctionnement ;  
 — le câble est réalisable en grosses sections, jusqu'à 2 000 à 2 500 mm<sup>2</sup>, et peut fonctionner à 90 - 100 °C en restant thermiquement stable ;  
 — il se prête bien à la mise en œuvre de systèmes de refroidissement forcé, tant interne — par le canal central — que de surface ou latéral.

Son emploi est donc indiqué pour la réalisation de liaisons de grande puissance et je citerai entre autres :

- les câbles 400 kV de la traversée en tunnel de la Severn (G.-B.), à refroidissement de surface et dont la puissance totale atteint 2 600 MVA ;
- les câbles 400 kV installés à Berlin en 1976, dont la puissance atteint 1 120 MVA, avec refroidissement de surface par circulation d'eau ;
- les câbles 400 kV installés en 1979 à Vienne, dont la puissance atteint 1 100 MVA, avec refroidissement latéral par eau ;
- le câble à 110 kV, 3 000 mm<sup>2</sup>, à circulation d'eau dans le conducteur, en expérimentation à Berlin depuis 1980 et dont la puissance maximale prévue est de 1 000 MVA.

Le câble à huile fluide est également utilisé comme câble sous-marin, aussi bien en tension alternative jusqu'à 525 kV (liaison d'alimentation de l'île de Vancouver de 9 + 30 km par deux câbles 525 kV - 1 200 MVA posés en 1983) qu'en tension continue (liaison du détroit du Tsugaru, entre les îles d'Hokkaido et d'Honshu (Japon), constituée de deux câbles ± 250 kV, 600 mm<sup>2</sup> de 43 km de longueur, posés à partir de 1978).

## 2.9. Autres câbles sous pression.

D'autres solutions sont apportées, après Emmanuelli, au problème de l'élimination des décharges partielles. Elles donnent naissance :

- aux câbles à pression interne de gaz ;
- aux câbles à compression de gaz ;
- aux câbles en tuyau sous pression d'huile.

Dans les câbles à pression interne de gaz, l'augmentation de la rigidité diélectrique dans les vacuoles est obtenue par application au sein de l'isolant papier imprégné d'une pression de gaz neutre de l'ordre de 15 bars. Le gaz est en général de l'azote, et après-guerre on expérimente un mélange d'azote et de SF<sub>6</sub>. Plusieurs variantes de ce type de câble sont créées avant-guerre jusqu'à 132 kV (câble Glover au papier préimprégné et autres câbles de constructeurs britanniques). Des câbles à pression interne de gaz sont également utilisés en tension continue : liaison du détroit de Cook (Nouvelle-Zélande) de ± 250 kV, 300 MW, posée en 1965.

Dans les câbles à compression, surtout étudiés par Hochstädter et Vogel en Allemagne et Bowden en Grande-Bretagne, une pression d'azote — de 12 à 15 bars — est appliquée sur la gaine de plomb du câble. Celle-ci doit avoir une forme appropriée pour ne pas s'écraser sous l'effet de la pression. Ce type de câble est surtout utilisé avant-guerre en Scandinavie et en Allemagne. En 1945 un câble 132 kV à double plomb est réalisé en Angleterre et un câble 220 kV en tuyau d'acier est posé en France en 1954.

Mais, au total, les câbles à pression de gaz sont supplantés par le câble en tuyau sous pression d'huile développé à partir de 1931 par Bennett (États-Unis) pour la tension

*composite insulation whose various specifications have already been experimented and which makes it possible to reduce the dielectric losses and to increase the operating voltage;*

*— cables are achievable in large cross-sections reaching 2,000 to 2,500 mm<sup>2</sup> and can operate at 90-100 °C while remaining thermally stable;*

*— they can be associated with a forced cooling system, either internal — through the central duct — or external (surface or lateral cooling).*

*Their use is therefore recommended for the realization of bulk power links; among others let us quote:*

*— the 400 kV cables of the tunnel crossing the Severn (GB) with surface cooling and a total power of 2,600 MVA;*  
*— the 400 kV cables installed in Berlin in 1976, of a power attaining 1,120 MVA with surface cooling by water circulation;*

*— the 400 kV cables installed in 1979 in Vienna, of a power up to 1,100 MVA with lateral cooling by water;*

*— the 110 kV cable, 3,000 mm<sup>2</sup>, with water circulation within the conductor, under experimentation in Berlin since 1980; its expected maximum power is 1,000 MVA.*

*The oil-filled cable is also being used as a submarine cable both in AC voltage up to 525 kV (the Vancouver Isle's feeder link of 9+30 km by two 525 kV - 1,200 MVA cables laid in 1983) and in DC voltage (the Tsugaru Strait link, between Hokkaido and Honshu Isles (Japan), comprising two cables ± 250 kV, 600 mm<sup>2</sup>, 43 km long, laid as from 1978).*

## 2.9. Other pressurized cables.

*After Emmanuelli, other solutions were brought to the problem of eliminating partial discharges. They led to:*

- gas-filled paper insulated cables;*
- compressed gas paper insulated cables;*
- high pressure OF pipe type cables.*

*In gas filled cables, the increase of dielectric strength in the voids is obtained by applying within the impregnated paper insulation a neutral gas pressure of the order of 15 bars. The gas is generally nitrogen, and after the war a mixture of nitrogen and SF<sub>6</sub> was experimented. Several variants of this type of cable were designed before the war up to 132 kV (preimpregnated paper insulated Glover's cable and other cables produced by British manufacturers).*

*Gas-pressurized cables were also used in DC Strait Cook link (New Zealand) at ± 250 kV, 300 MW, laid in 1965.*

*In compressed gas paper insulated cables, mainly studied by Hochstädter and Vogel in Germany and by Bowden in Great Britain, a nitrogen pressure of 12 to 15 bars is applied onto the cable's lead sheath. The latter must have a proper shape so as not to be crushed under the effect of pressure. This type of cable was mainly used before the war in Scandinavia and in Germany. In 1945, a double lead 132 kV cable was realized in England, and a 220 kV pipe type cable was laid in France in 1954.*

*However, on the whole, gas pressurized cables were superseded by high pressure OF pipe-type cables developed since 1931 by Bennett (United States) for 66 kV. The oil pressure in the cable is of the order of 15 bars. Compression cables were manufactured, but generally the three*

de 66 kV. La pression d'huile y est de l'ordre de 15 bars. Des câbles à compression sont réalisés, mais en général les trois phases isolées tirées ensemble dans un tuyau d'acier ne comportent pas de gaine d'étanchéité, si bien que l'huile sous pression pénètre dans l'isolant. Cette technique s'est surtout développée aux Etats-Unis jusqu'à 345 kV et en France jusqu'à 225 kV, où elle a été préférée à celle du câble à huile fluide (fig. 5).

Des études récentes faites aux Etats-Unis et en URSS montrent que ce câble pourrait convenir pour une tension de service de 500 - 550 kV, et peut-être même 800 kV, et une température maximale au conducteur avoisinant 100 °C.

Ce type de câble se prête à l'application du refroidissement forcé, en particulier par circulation et refroidissement de l'huile contenue dans le tuyau. Bien que moins performant que le câble à huile fluide, il reste néanmoins en compétition avec lui pour la réalisation de liaisons de grande puissance.

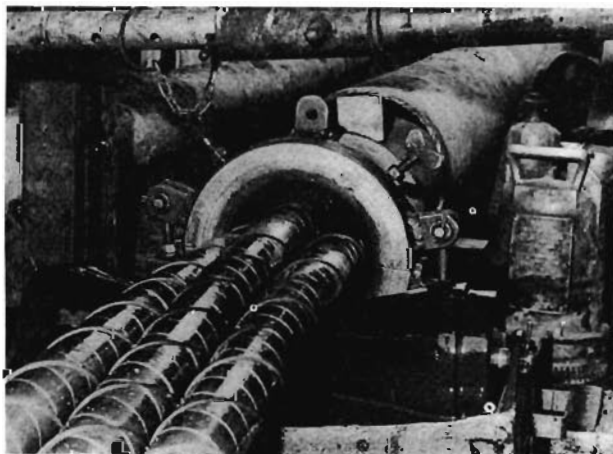
### 3. Les câbles à isolant synthétique extrudé.

Il ne fait pas de doute que le grand développement des câbles d'énergie isolés au papier pendant toute la première moitié du 20<sup>e</sup> siècle a été dû au manque de matériaux extrudables de qualité satisfaisante et relativement bon marché.

Rappelons cependant que les fils et câbles isolés au caoutchouc naturel ont été largement utilisés entre les deux guerres mondiales, pour les installations électriques des bâtiments et de l'industrie, ainsi que pour certaines applications particulières en moyenne tension. L'industrie des câbles était donc apte à mettre en œuvre de nouveaux matériaux extrudables lorsqu'ils se présenteraient sur le marché.

Ceci se produisit lorsque le PVC, le polyéthylène et divers caoutchoucs synthétiques devinrent disponibles en quantité suffisante et à des prix tels que les produits fabriqués puissent entrer en compétition avec les câbles au papier.

Ce développement s'amorça dans les années 1950. Il prit son essor dans les années 1960 et progressivement une sélection s'opéra parmi les matériaux disponibles et les domaines d'application de chacun.



*insulated phases pulled together into a steel pipe have no sealed sheath, so that the oil under pressure can penetrate into the insulation. This latter technique has been chiefly developed up to 345 kV in the United States and up to 225 kV in France, where it has been preferred to that of the self-contained OF cable (fig. 5).*

*Recent studies carried out in the United States and in USSR show that this cable type may be suitable for a rated voltage of 500 - 550 kV, and even 800 kV, and a temperature at the conductor nearing 100 °C.*

*This type of cable is adapted for the application of forced cooling, especially by circulation and cooling of the oil contained in the pipe. Though of lesser performance quality than self-contained OF cable type, it remains non the less in competition with it for the realization of high power links.*

### 3. Cables with extruded synthetic insulation.

*Without doubt, the large development of paper-insulated power cables during all first half of the twentieth century was due to the lack of extrudable materials of adequate quality and relatively moderate cost.*

*Let us recall however that wires and cables with natural rubber insulation were widely used between the two world wars for electrical installations in buildings and industry, as well as for some particular medium voltage applications. The cable industry was therefore apt to implement new extrudable materials likely to appear on the market.*

*This happened when PVC, polyethylene and various synthetic rubbers became available in sufficient quantity and at such prices that the manufactured products could come into competition with paper insulated cables.*

*This development started in the fifties and soared in the sixties, and progressively a selection was brought about amidst the available materials and the application fields for each of them.*

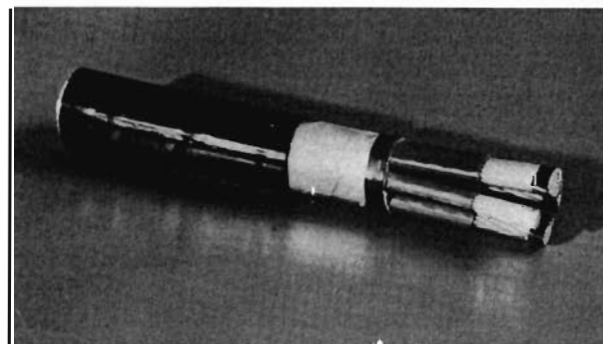


Fig. 6. Districâble tout PVC.

Fig. 6. All PVC "distributable".

Fig. 5. Tirage d'un câble en tuyau 225 kV.

Fig. 5. Pulling of a 225 kV pipe type cable.



### 3.1. Les câbles PVC.

Le polychlorure de vinyle a été créé avant-guerre en Allemagne. Convenablement chargé, plastifié et stabilisé, il se présente sous l'aspect d'une matière souple et thermoplastique, propre à constituer un matériau aisément utilisable en câblerie.

Des câbles basse tension furent effectivement fabriqués avant et pendant la guerre, notamment en Allemagne où fut aussi posé en 1944 le premier câble 6 kV.

Dans les années 1950, des réalisations virent le jour dans de nombreux pays d'Europe, en basse tension et en moyenne tension, jusqu'à 15 - 20 kV et même 30 kV.

Mais les caractéristiques électriques relativement défavorables de ce matériau polaire — forte permittivité, pertes diélectriques élevées et croissantes avec la température — en limitèrent rapidement l'emploi à la basse tension et éventuellement à la moyenne tension jusqu'à 10 kV environ.

Il faut noter cependant que le PVC est un mélange complexe dont la formulation peut être dans une certaine mesure ajustée aux besoins, pour en faire soit un matériau d'isolation de qualité suffisante pour l'application visée, soit un matériau de gainage ayant des propriétés mécaniques et de tenue aux agents physiques et chimiques tout à fait satisfaisantes. Sa tenue dans le temps est bonne, dans la mesure où les plastifiants utilisés sont stables et peu volatils. Sa température maximale d'emploi est couramment de 70 °C. Pour certains mélanges, elle peut être portée jusqu'à 85 °C.

Ainsi, pendant de nombreuses années, une partie des réseaux basse tension de distribution publique a été constituée de câbles isolés au PVC, en Allemagne, en France, etc.

Il en fut de même des câbles isolés aériens basse tension pour réseaux en façade et torsades de branchement, développés en France, en Italie, en Belgique, etc.

Aujourd'hui, le PVC est encore l'isolant retenu pour de nombreux câbles de série destinés au câblage, aux installations domestiques et industrielles, aux mines, à la sidérurgie, etc.

Il a aussi constitué jusqu'à ces derniers temps le matériau de base des câbles « à comportement amélioré au feu », bien qu'à cet égard sa position soit remise en question, comme le montreront d'ailleurs ces journées internationales.

Enfin, il reste très utilisé pour la constitution des gaines de protection de câbles de toute nature et de toutes tensions (fig. 6).

### 3.2. Les câbles isolés aux caoutchoucs synthétiques.

L'industrie des câbles dispose aussi après-guerre d'un grand nombre d'élastomères de synthèse : le caoutchouc butyl (SBR), le polychloroprène (néoprène), le polyéthylène chlorosulfoné (hypalon), et aussi plus tard le caoutchouc nitrile, les caoutchoucs de silicone, les caoutchoucs d'éthylène-propylène copolymères (EPR ou EPM) et terpolymères (EPDM), etc.

La tentation est grande d'utiliser ces produits, qui s'inscrivent dans le prolongement du caoutchouc naturel, à la fois en ce qui concerne les équipements de fabrication et les techniques de mise en œuvre. La vulcanisation continue, qui apparaît dans les années 50, constitue un facteur favorable à leur développement.

### 3.1. PVC cables.

*Polyvinylchloride was created before the war in Germany. Suitably filled, plasticized and stabilized, it appears under the aspect of a supple and thermoplastic matter, fitted for making up a material easily usable in the cable manufacturing industry.*

*Low-voltage cables were indeed manufactured before and during the war, in particular in Germany where the first 6 kV cable was laid in 1944.*

*Other achievements emerged in the fifties in several European countries, in low voltage and in medium voltage up to 15 - 20 kV, and even 30 kV.*

*However, the relatively unfavourable electrical characteristics of this polar material — high permittivity and considerable dielectric losses increasing with temperature — have rapidly limited its application to low voltage cables and on occasion to medium voltage cables, up to about 10 kV.*

*It should be noted, however that PVC is a complex compound, the formulation of which can be to a certain extent adapted to the needs, so as to make of it either an insulating material of sufficient quality for the aimed application, or a jacketing material having quite satisfactory mechanical properties and withstand strength to physical and chemical agents. Its long term strength is good in so far as the employed plasticizers are stable and little volatile. Its maximum operating temperature is currently 70 °C. For certain compounds it may be increased up to 85 °C.*

*Thus for many years, a part of low voltage public distribution systems was made up of cables insulated with PVC, in Germany, in France, etc.*

*It was the same with low voltage overhead insulated cables for frontal mains and service lines developed in France, in Italy, in Belgium, etc.*

*Today, PVC is still the insulating material retained for a great number of series cables intended for wiring, domestic and industrial installations, mines, metallurgy of iron, etc.*

*Also, it has been until recently the basic material for cables "with improved fire behaviour", though in this respect its position is to be called in question, as it will be further shown during this international symposium.*

*Finally, it is being much used for the constitution of protective coverings of cables of all kinds and voltages (fig. 6).*

### 3.2. Synthetic rubber insulated cables.

*After the war, the cable industry had also at its disposal a great many synthetic elastomers: butyl rubber, polychloroprene (neoprene), chlorosulfonated polyethylene (hypalon) and also, later on, nitrile rubber, silicone rubbers, ethylene-propylene copolymer and terpolymer rubbers (EPR or EPM and EPDM), etc.*

*The temptation was great to use these products appearing in the extension of natural rubber, with regard to both manufacturing equipments and processing techniques.*

*All these products exhibit ageing resistance qualities clearly higher than those of natural rubber. Moreover, contrarily to thermoplastic materials they have no softening phase and allow higher operating temperatures.*

Tous ces produits possèdent des qualités de résistance au vieillissement nettement supérieures à celles du caoutchouc. De plus, à l'inverse des matières thermoplastiques, ils ne présentent pas de phase de ramollissement et admettent des températures de fonctionnement élevées, supérieures à celles autorisées pour les thermoplastiques.

Bien que les câbles fabriqués à partir de ces matériaux soient plus chers que les câbles au papier et les câbles thermoplastiques, l'économie qu'ils peuvent procurer sur la section des conducteurs ou le gain de courant admissible qu'ils permettent à section égale en font des concurrents possibles.

Sans parler des applications spéciales, les matériaux les plus couramment utilisés dans les années 60 furent :

- comme isolant, le caoutchouc butyl ;
- comme matériau de gaine, le polychloroprène et à une moindre échelle le polyéthylène chlorosulfoné.

Les câbles isolés au butyl sous gaine de polychloroprène connurent un certain développement en basse et moyenne tensions. Toutefois, la difficulté de vulcanisation du butyl par des peroxydes, opérée sous pression de vapeur, ne permit pas d'obtenir alors un isolant exempt d'eau, d'impuretés et de porosités.

Malgré une bonne tenue relative aux décharges partielles, le câble isolé au butyl ne dépassa guère la tension de 15 - 20 kV. Il disparut bientôt du marché, sous la pression économique des câbles polyéthylène naissants, et pendant de longues années il sembla qu'aucun élastomère ne lui succéderait.

Pourtant le caoutchouc d'éthylène-propylène vint prendre la relève au cours de ces dernières années. Il se révéla être un isolant tout à fait valable, malgré la complexité de sa formulation et des caractéristiques électriques plus proches de celles du papier imprégné que du polyéthylène.

Mais il possède une solide résistance aux décharges partielles et une très bonne résistance au vieillissement thermique et aux agents d'oxydation. Il autorise une température de fonctionnement élevée, 90 °C en régime permanent, 130 °C en régime de surcharge, 250 °C en régime de court-circuit.

Il a d'abord été utilisé pour la réalisation de câbles à moyenne tension, puis ces dernières années de câbles à haute tension à 66 kV et maintenant à 132 - 150 kV. Dans ces derniers, le gradient de service avoisine 7 kV/mm. Ce type de câble se développe en Italie, en Suisse, aux Etats-Unis, au Brésil, etc.

Sera-t-il réservé à des applications particulières, où sa température de service élevée et son élasticité sont appréciées, comme dans les installations en puits vertical, ou aura-t-il un usage plus général ? Jusqu'à quelle tension de service conviendra-t-il ? Ces questions restent posées.

### 3.3. Les câbles isolés au polyéthylène basse densité.

L'histoire du polyéthylène est bien connue. Le rapport annuel des Imperial Chemical Industries de 1938 décrivait une matière thermoplastique nouvelle qui présentait à l'époque « une combinaison unique de propriétés électriques et mécaniques ». Il s'agissait du polyéthylène basse densité, obtenu par polymérisation de l'éthylène sous très haute pression (1 500 à 3 000 bars) et haute température (170 à 300 °C).

*Although the cables manufactured with these materials were more expensive than paper-insulated and thermoplastic cables, the saving they were able to procure on the conductor cross-section area, or the higher permissible current they could admit for the same cross-section, makes of them possible competitors.*

*To say nothing of special applications, the materials most currently utilized in the sixties were:*

- *as an insulating material, butyl rubber;*
- *as a sheathing material, polychloroprene and, to a lesser extent, chlorosulfonated polyethylene.*

*Polychloroprene sheathed, butyl insulated cables experienced a certain development in low and medium voltages. However, the difficulty in vulcanizing butyl by peroxides, taking place under steam pressure, did not allow at that time to obtain an insulating material exempt from water, impurities and porosity.*

*In spite of their good relative resistance to partial discharges, butyl-insulated cables scarcely exceeded the 15 - 20 kV voltage level. They disappeared soon from the market under the economic pressure of the emerging polyethylene cables, and for many years it seemed that no elastomer would succeed butyl rubber.*

*Yet, in the course of the recent years, ethylene-propylene rubber came to take the place of butyl rubber. It proved to be a quite valid insulating material, despite the complexity of its formulation and its electrical characteristics nearer those of impregnated paper than of polyethylene.*

*But it is tough enough to withstand partial discharges and exhibits a very good resistance to thermal ageing and oxidizing agents. It allows a high operating temperature, 90 °C under steady-state conditions, 130 °C under overload conditions, 250 °C under short-circuit conditions.*

*First, it has been used as insulant of medium voltage cables, then in the recent years of high-voltage cables at 66 kV, and now at 132 - 150 kV. In these latter, the working gradient is of the order of 7 kV/mm. This type of cable is being developed in Italy, in United States, in Brazil, etc.*

*Will it be reserved for special applications where its high operating temperature and its elasticity are appreciated, as in the vertical shaft installations, or will it be used on a larger scale? Up to which operating voltage will it be suitable for? These questions remain to be answered.*

### 3.3. Low density polyethylene insulated cables.

*Polyethylene's history is well known. The 1938 yearly report of the Imperial Chemical Industries described a new thermoplastic material which exhibited at that time "a unique combination of electrical and mechanical properties". It was about low density polyethylene, obtained through polymerization of ethylene under very high pressure (1,500 to 3,000 bars) and at high temperature (170 °C to 300 °C).*

Dès cette année 1938, la Société Telcon en commandait 100 tonnes pour la fabrication de câbles téléphoniques : c'est par ce biais que le polyéthylène entra en câblerie pour l'isolement des câbles de puissance.

Disposait-on enfin du matériau d'isolation idéal ? On put le croire un temps, car il a une rigidité diélectrique intrinsèque exceptionnellement élevée, une faible permittivité, des pertes diélectriques négligeables, une bonne conductivité thermique, une apparente étanchéité à l'eau, etc.

Mais on était loin de soupçonner tous les problèmes que sa mise en œuvre allait poser, car il a aussi une température de fusion cristalline assez basse (105 à 115 °C), il est sensible à l'oxydation, à la diffusion en son sein de matériaux étrangers, aux décharges électriques, au phénomène de fissuration sous contrainte mécanique et électrique, et il possède un coefficient de dilatation élevé, croissant avec la température.

Son emploi comme isolant de câble d'énergie fut donc un acte de foi et un défi. Quoi qu'il en soit, dès 1944 un câble monopolaire est fabriqué aux Etats-Unis et en 1947 un câble 20 kV est fabriqué en Suisse. On réalise aussi en 1951 en France un câble à ceinture 6 kV.

Mais il fallut bientôt se pencher sur le problème de sélection du polyéthylène, sur sa pureté, sur les conditions d'extrusion et de refroidissement de l'isolant en forte épaisseur. Un travail de recherches et de mise au point eut lieu tout au long des années 50, qui permit de déboucher sur les câbles tels que nous les connaissons aujourd'hui. La progression des tensions reprit alors.

Vers 1958, les tensions de 50 kV alternative et 70 kV continue furent atteintes en Suisse.

Vers 1966, un câble 138 kV fut fabriqué aux Etats-Unis.

En 1968, des câbles 110 kV furent installés en Allemagne.

En France, le premier câble 63 kV date de 1962 et, en 1969, Electricité de France procéda à l'installation de la première liaison industrielle de câble à 225 kV (au poste de Chevilly-Larue). Ce câble de puissance nominale 200 MVA avait une section de 360 mm<sup>2</sup> Cu, une épaisseur d'isolant de 24 mm et un gradient de travail de 9,5 kV/mm. Comme les gens heureux, ce câble n'eut pas d'histoire, si bien que cette technique s'étendit progressivement à l'ensemble des nouvelles liaisons installées sur le réseau français à 225 kV et en particulier au nouveau réseau d'alimentation à très haute tension de la ville de Paris (fig. 7).

Comme on le sait, des câbles à 400 kV isolés au PEBD sont sur le point d'être industrialisés, d'abord avec une section de 630 mm<sup>2</sup>, puis ultérieurement de 1 600 mm<sup>2</sup> (fig. 8).

Mais ces réalisations marquantes ne doivent pas masquer l'important développement que connurent dans les années 60 les câbles à moyenne tension isolés au PEBD, aussi bien aux Etats-Unis qu'en Europe.

### 3.4. Les câbles isolés au polyéthylène haute densité.

L'histoire des câbles isolés au PEHD est parallèle à celle des câbles isolés au PEBD, avec un décalage de 8 à 10 ans.

Le PEHD est découvert peu après-guerre en Allemagne et en Italie. Il s'obtient par polymérisation de l'éthylène au moyen de catalyseurs métalliques, à une température de l'ordre de 50 à 150 °C sous pression relativement basse

*As early as this year 1938, the Telcon Co. ordered 100 tons of it for the manufacture of telephone cables: it is by this expedient that polyethylene entered the cable industry for the insulation of power cables.*

*Was the ideal insulating material finally available? This could be believed for a while, as it has an intrinsic dielectric strength exceptionally high, a low permittivity, negligible dielectric losses, a good thermal conductivity, an apparent watertightness, etc.*

*But all the problems to which its use was going to give rise were far from being suspected, for it has also a quite low crystalline melting temperature (105 to 115 °C), it is sensitive to oxidation, diffusion phenomena, electrical discharges, mechanical and electric stress cracking, etc., and it has a high expansion coefficient increasing with temperature.*

*Using it as an insulant for power cables was thus an action of faith and a challenge. Whatsoever, as early as 1944 a single-core cable was manufactured in the United States, and in 1947 a 20 kV cable was produced in Switzerland. Also in 1951, a 6 kV belted cable was made in France.*

*But soon it became necessary to consider the problem of selecting the quality of polyethylene, its purity and the conditions for extruding and cooling thick insulating walls. Research and development work was carried out all along the fifties and led to the cable designs such as known today. The progression of voltages took then up again.*

*About 1958, 50 kV AC and 70 kV DC voltages were reached in Switzerland.*

*By 1966, a 138 kV cable was produced in the United States.*

*In 1968, 110 kV cables were installed in Germany.*

*In France, the first 63 kV cable dates back to 1962 and, in 1969, Electricité de France proceeded to the installation of the first operational cable link at 225 kV (inside the Chevilly-Larue substation). This 200 MVA rated cable had a cross-section of 360 mm<sup>2</sup> Cu, an insulation thickness of 24 mm and a working gradient of 9,5 kV/mm.*

*Like happy people, this cable had no history, so that this technique extended progressively to the whole of the new links installed on the French 225 kV system and in particular to the new very high voltage power supply system of the city of Paris (fig. 7).*

*As known, 400 kV LDPE insulated cables are on the point of being operational, first with a cross-section of 630 mm<sup>2</sup> and then subsequently of 1,600 mm<sup>2</sup> (fig. 8).*

*However, these outstanding achievements should not hide the important development that medium voltage LDPE insulated cables experience in the United States as well as in Europe.*

### 3.4. High density polyethylene insulated cables.

*The history of HDPE insulated cables is parallel to that of LDPE insulated cables with a time-lag of 8 to 10 years.*

*HDPE was discovered soon after the war in Germany and in Italy. It is obtained by polymerization of ethylene by means of metallic catalyzers at a temperature of the order of 50 to 150 °C under a relatively low pressure*

— 25 à 40 bars. La structure de ses chaînes moléculaires, plus linéaire que celle du PEBD, lui confère à la fois une plus grande densité — d'où son nom —, une meilleure cohésion, mais aussi une moindre souplesse.

Le PEHD est plus difficile à mettre en œuvre que le PEBD. Mais son emploi a été préféré par certains constructeurs à cause de ses meilleures caractéristiques thermiques et mécaniques : température de fusion cristalline plus élevée (125 à 135 °C), température de service de 10 °C supérieure (80 °C au lieu de 70 °C en régime permanent, 90 °C au lieu de 80 °C en régime de surcharge), meilleure conductivité thermique, etc.

Les caractéristiques du polymère peuvent dans une certaine mesure être adaptées à la demande. De plus l'emploi d'additifs appropriés, « stabilisateurs de tension », permettent en quelque sorte de le transformer en polyéthylène imprégné et d'améliorer de façon durable sa tenue à la tension alternative et aux ondes de choc.

Des câbles à moyenne tension en PEHD furent fabriqués dès les années 50 et le premier câble à 63 kV semble avoir été fabriqué en Allemagne en 1962. Les premiers câbles 225 kV, isolés au PEHD, dans les sections 400 mm<sup>2</sup> Al et 800 mm<sup>2</sup> Cu, ont été installés en France à la fin de 1978, et ces câbles y sont maintenant utilisés au même titre que les câbles isolés au PEBD (fig. 9).

### 3.5. Les câbles isolés au polyéthylène réticulé.

Il semble que les moyens de réticuler le polyéthylène aient été mis au point à la fin des années 50, en opérant par exposition aux radiations ou par voie chimique par l'intermédiaire de peroxydes organiques.

Cette dernière voie a presque exclusivement été retenue. La réticulation a pour effet de ponter les chaînes moléculaires par des liaisons entre carbones et de transformer le polyéthylène thermoplastique basse densité en élastomère. De ce fait, le matériau conserve une certaine tenue mécanique à chaud, qui permet d'augmenter sensiblement les températures de service :

- 90 °C en régime permanent ;
- 100 °C - 105 °C ou plus en régime de secours ;
- 250 °C en régime de court-circuit.

Par ailleurs, l'inertie chimique du PE est conservée, ainsi que sa tenue à froid, et la tendance à la fissuration est éliminée. Quant aux propriétés diélectriques, elles sont également conservées, au moins pour le produit non chargé.

L'opération de réticulation permet d'introduire dans le polyéthylène, outre des antioxydants, des additifs divers visant une amélioration de la tenue à certaines contraintes particulières.

Ainsi a-t-on réalisé des PR pour câbles résistant à l'incendie, avec faible dégagement de fumées et de gaz toxiques.

L'addition de charges minérales et de noir de carbone a permis d'en faire un matériau de câble basse tension économique et résistant aux intempéries et au rayonnement solaire.

Inversement l'emploi du produit brut, avec éventuellement l'introduction d'inhibiteurs d'arborescences, permet d'en faire un isolant de câble haute tension, dans la mesure où l'opération de réticulation ne vient pas gâcher les bonnes propriétés du polyéthylène de base.

(25 to 40 bars). The structure of its molecular chains, more linear than that of the LDPE, bestows on it both a higher density — whence its name — and a better cohesion, but also a lesser flexibility.

HDPE is more difficult to implement than LDPE. But its use was preferred by certain manufacturers because of its better mechanical and thermal characteristics: higher crystalline melting temperature (125 to 135 °C), operating temperatures higher by 10 °C (80 °C instead of 70 °C under steady-state conditions, 90 °C instead of 80 °C under overload conditions), better thermal conductivity, etc.

The polymer characteristics can, to a certain extent, be adapted to requirements. Moreover, the use of appropriate additives, "voltage stabilizers", makes it somehow possible to transform it into "impregnated" polyethylene and to improve durably its ability to withstand AC and impulse voltages.

Medium voltage cables with HDPE insulation were manufactured in the fifties and it seems that the first 60 kV cable was made in Germany in 1962.

The first 225 kV HDPE-insulated cables with cross-sections of 400 mm<sup>2</sup> Al and 800 mm<sup>2</sup> Cu were installed on the French system at the end of 1978; these cables are now used there in competition with LDPE insulated cables (fig. 9).

### 3.5. Cross-linked polyethylene insulated cables.

It seems that the means for cross-linking polyethylene were developed at the end of the fifties, operating by exposition to irradiation or by chemical way through organic peroxides.

This latter way has been quasi-exclusively retained. The reticulation results in bridging molecular chains by links between carbons, changing low density thermoplastic polyethylene into an elastomer. Because of that, the material conserves a certain mechanical resistance when hot which permits to increase sensibly the operating temperatures: — 90 °C under steady-state conditions; — 100 °C - 105 °C or more under emergency conditions; — 250 °C under short-circuit conditions.

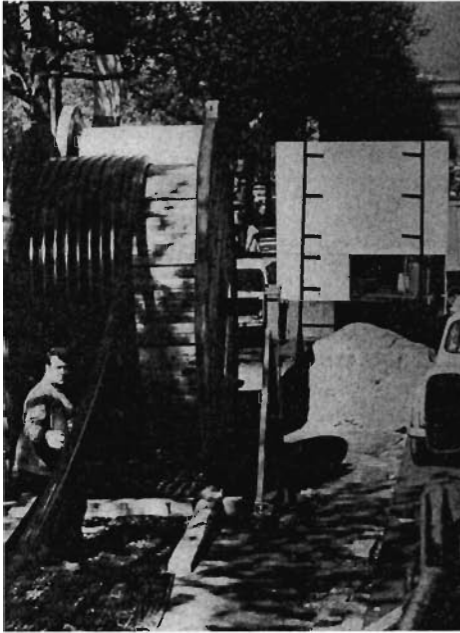
Moreover the chemical inertia of PE is preserved, as well as its mechanical resistance when cold, and the tendency to stress cracking is eliminated. As for the dielectric properties, they are also preserved, at least for the non-filled product.

The cross-linking operation makes it possible to introduce into polyethylene, in addition to anti-oxidants, various additives aiming at improving its resistance to some specific stresses.

In this manner have been produced XLPEs for fire retardant cables, with small liberation of smoke and toxic gases.

The addition of mineral fillers and carbon black has permitted to make of it an economical low voltage cable insulant, resisting to hard environmental conditions and solar radiation.

Inversely, the use of the rough product, possibly with the introduction of treeing inhibitors, permits to make of it a high-voltage cable insulant in so far as the cross-linking operation does not come to spoil the good properties of the basic polyethylene.



*Fig. 7. Pose d'un câble PEBD 225 kV le long des Champs-Élysées (Paris).*

*Fig. 7. Laying of a 225 kV LDPE cable along the Champs-Élysées Avenue in Paris.*



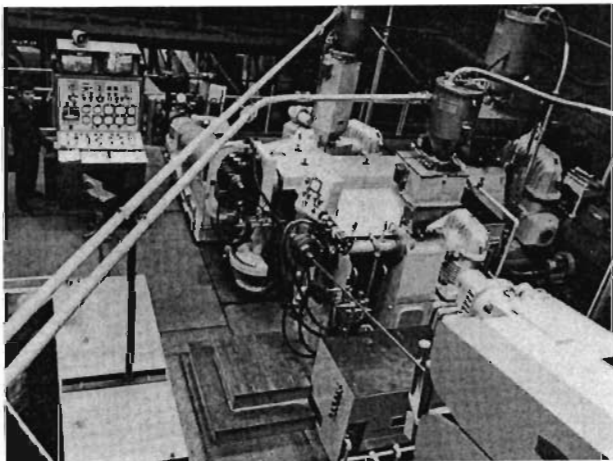
*Fig. 8. Câble PEBD 400 kV - 1 600 mm<sup>2</sup> Cu.*

*Fig. 8. 400 kV - 1,600 mm<sup>2</sup> Cu LDPE cable.*

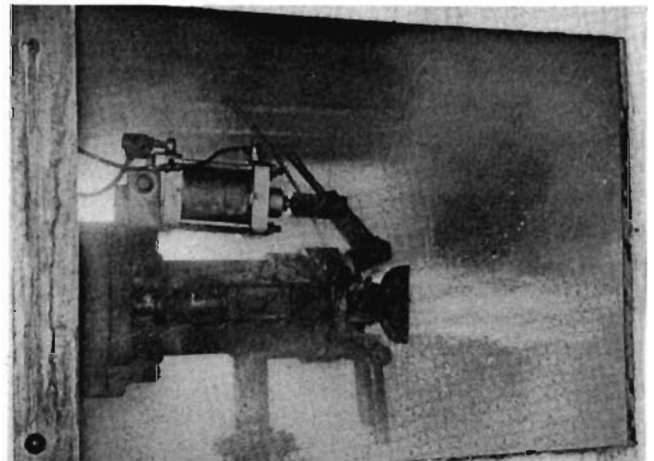


*Fig. 9. Câble PEHD 225 kV - 800 mm<sup>2</sup> Cu.*

*Fig. 9. 225 kV - 800 mm<sup>2</sup> Cu HDPE cable.*



*Fig. 10 a. Ligne d'extrusion - réticulation de PR*  
*Fig. 10 a. Extrusion - cross-linking line of XLPE.*



*Fig. 10 b. Sortie d'un câble PRC du tube de vapeur.*  
*Fig. 10 b. XLPE cable at the exit of a steam curing pipe.*

Or la réticulation, faite initialement à la vapeur à haute température sous haute pression, avait pour effet de laisser subsister des microporosités au sein de l'isolant et de le saturer en humidité. La teneur en eau atteignait de 1 000 à 2 000 ppm (fig. 10).

Aussi, pour réaliser des câbles haute tension fiables, a-t-il fallu à la fois surmonter les difficultés de mise en œuvre du polyéthylène et maîtriser l'opération de réticulation. On dut pour cela travailler à sec en réticulant sous pression d'azote, mais aussi en filière longue, dans l'huile de silicone, en bain de sel fondu, par ultrasons. La teneur en eau a pu ainsi être réduite à quelque 100 ppm ou moins.

Un nouveau procédé de réticulation est apparu récemment. Il s'agit de la réticulation par silanes proposée par Dow Corning. Dans ce procédé, on réalise des liaisons tridimensionnelles entre les chaînes en opérant en vapeur d'eau à basse température et pression atmosphérique. Paradoxalement, la teneur en eau du produit réticulé est faible : 50 à 200 ppm, mais la réaction est très lente : plusieurs semaines pour un câble 60 kV.

En résumé, les procédés de réticulation du PE sont encore très évolutifs et la technique de fabrication des câbles PR loin d'être stabilisée.

---

#### 4. Mise en œuvre des câbles synthétiques extrudés.

---

##### 4.1. Le développement des câbles au polyéthylène réticulé.

L'emploi des câbles PR s'est très rapidement développé à partir de 1960 aux Etats-Unis, au Japon, dans les pays scandinaves, puis dans les autres pays.

En basse tension, ils ont pris la succession des câbles isolés au papier et au PVC. Ils sont aujourd'hui universellement utilisés dans les spécifications habituelles de câbles à quatre conducteurs isolés, armés ou non, ainsi que dans des spécifications particulières, comme les câbles à neutre concentrique (type Céander) ou les « districâbles ». Les câbles isolés aériens que nous utilisons en France pour les réseaux en façade et les branchements sont également en polyéthylène réticulé : ils représentent actuellement plus de 100 000 km de torsades (fig. 11).

En moyenne tension, le rythme de développement des câbles PR a également été très rapide dans les pays précités :

— aux Etats-Unis, pour les réseaux URD (*underground residential distribution*), où le PR a succédé au polyéthylène ;

— au Japon où, depuis 1976, la longueur des câbles PR jusqu'à 66 kV croît au même rythme que la puissance des réseaux ;

— en Suède où le PR a tendance à se substituer au papier dans les câbles de réseaux de 10 à 100 kV.

Electricité de France, pour sa part, a étudié une spécification de câble tripolaire 20 kV, composée d'une torsade de trois câbles unipolaires à écran d'aluminium contre-collé à la gaine extérieure en PVC (fig. 12). Ce câble présente l'avantage d'un câble tripolaire pour la pose et de câbles monopolaires pour la confection des accessoires. Depuis 1978, plus de 20 000 km en ont été posés. Toutes les nouvelles liaisons sont maintenant constituées avec ce câble.

*Now, the curing process, initially carried out with steam at high temperature under high pressure, resulted in the formation of micro-porosities within the insulation and its saturation with humidity. The water content reached 1,000 to 2,000 ppm (fig. 10).*

*To achieve reliable high voltage cables, it was therefore necessary both to overcome the difficulties in implementing polyethylene and to control the curing process.*

*For that reason, the work had to be done under dry conditions by cross-linking under nitrogen pressure, but also in long die-plate, in silicone oil, in molten salt bath, by ultrasounds.*

*The water content could thus be reduced to about 100 ppm or less.*

*A new curing process has recently appeared, namely the silane process proposed by Dow Corning. In this process three-dimensional links between chains are produced by working in steam at low temperature and under atmospheric pressure. Paradoxically, the water content in the cross-linked product is small: 50 to 200 ppm, but the reaction is very slow: several weeks for a 60 kV cable.*

*To sum up, the PE cross-linking processes are still very evolutive and the technique of manufacturing XLPE cables is far from being stabilized.*

---

#### 4. About the use of extruded polymeric cables.

---

##### 4.1. The development of cross-linked polyethylene insulated cables.

*The use of XLPE cables has experienced a very fast development as from 1960 in the United States, in Japan, in the Scandinavian countries, then in the other countries.*

*In low voltage, they succeeded paper and PVC insulated cables. They are being today universally used in the common specifications of four-core cables armoured or not, as well as in special designs such as cables with a concentric neutral conductor (Ceander type) or "districables". The overhead insulated cables in use in France for frontal networks and service lines are also XLPE insulated: they represent now more than 100,000 km of twists (fig. 11).*

*In medium voltage, the rate of development of XLPE cables has also been very fast in the afore-mentioned countries:*

*— in the United States, for the underground residential distribution (URD) networks where XLPE succeeded PE;*

*— in Japan, where since 1976, the length of XLPE cables up to 66 kV has been increasing at the same rate as the power capacity of the networks;*

*— in Sweden where XLPE has a tendency to supersede paper insulation in the 10 to 100 kV network cables.*

*EDF, as far as it is concerned, has designed a 20 kV three-core cable composed of a twist of three single-core cables with an aluminium screen bonded to the PVC oversheath (fig. 12). This cable offers the advantage of a three-core cable as for the laying process, and that of single-core cables as for the fitting of accessories. Since 1978, more than 20,000 km of this cable have been laid and all the new links are now made with it.*

*Thus XLPE cables appear as the true heir to paper insulated cables in the whole range of distribution voltages.*

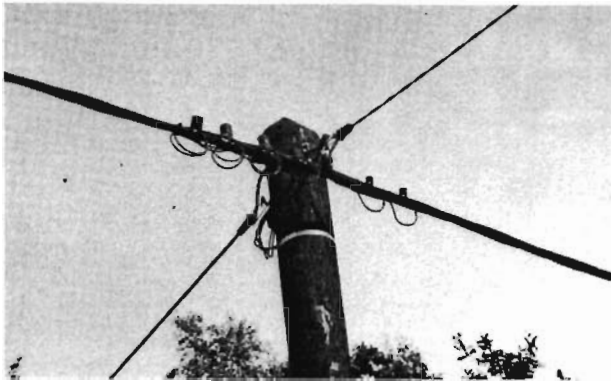


Fig. 11. Torsade de câble BT au PRC.  
Fig. 11. Low voltage XLPE cable twist.



Fig. 12. Câble 20 kV type EDF (HN 33-S-23).  
Fig. 12. 20 kV EDF type cable (HN 33-S-23).

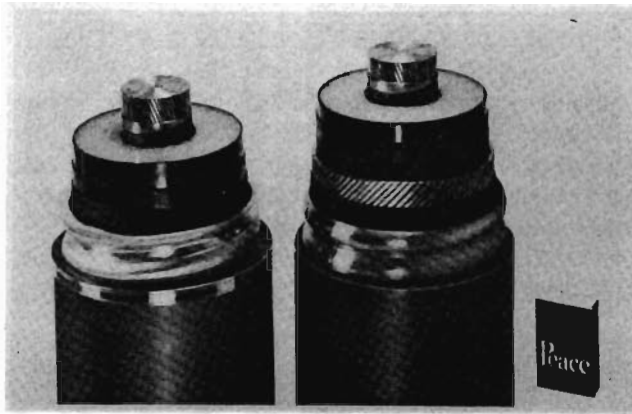


Fig. 13. Echantillons de câble PRC 275 kV.  
Fig. 13. 275 kV XLPE cable samples.

Ainsi, le câble PR apparaît-il comme le véritable héritier du câble papier dans tout le domaine des tensions de distribution.

La percée des câbles PR dans le domaine de la haute tension n'est pas moins remarquable.

En 1962, le premier câble 77 kV est fabriqué au Japon.

En 1973, apparaît en Suède un câble 145 kV, 500 mm<sup>2</sup> Al, obtenu par triple extrusion ; le gradient de travail y est de 7 kV/mm.

Vers 1975, est introduite la réticulation sèche qui permet d'envisager des câbles plus performants. Tels sont les premiers câbles 275 kV installés au Japon à partir de 1978, qui ont 27 mm d'épaisseur d'isolant (fig. 13), le câble 345 kV de 26 mm d'isolant en étude aux États-Unis et le câble 500 kV en cours de mise au point au Japon.

Les câbles isolés au polyéthylène, réticulé ou non, sont également utilisés comme câbles sous-marins en tension alternative et ouvrent des perspectives intéressantes, qui restent à explorer, en tension continue.

#### 4.2. Accessoires pour câbles à isolant synthétique.

Que dire des accessoires pour câbles à isolant synthétique, sinon que leur conception a subi une mutation comparable à celle des câbles. Un très gros effort de recherche a été conduit depuis une dizaine d'années pour rendre les matériels de raccordement aussi fiables que les câbles eux-mêmes.

*The breakthrough of XLPE cables in the high voltage field is not less remarkable.*

*In 1962, the first 77 kV cable was manufactured in Japan.*

*In 1973, appeared in Sweden a 150 kV cable, 500 mm<sup>2</sup> Al, obtained by triple extrusion; the working gradient was about 7 kV/mm.*

*By 1975, dry cross-linking process was introduced allowing for cables with improved performance to be expected. Such are the first 275 kV cables installed in Japan from 1978, having an insulation thickness of 27 mm (fig. 13), the 345 kV cable with 26 mm insulation under study in the United States and the 500 kV cable being developed in Japan.*

*Cables insulated with polyethylene, cross-linked or not, are also used for submarine links in AC voltage and open attractive perspectives which remain to be explored, in DC voltage.*

#### 4.2. Accessories for cables with synthetic insulation.

*What to think of accessories for cables with synthetic insulation, except that their design has undergone a change comparable to that of cables. A very great research effort has been conducted since about ten years to make them as reliable as the cables themselves.*

L'importance de ce sujet mériterait de longs développements et la présentation de très nombreux modèles. Je me limiterai à noter quelques tendances.

L'emploi quasi général de conducteurs en aluminium a nécessité la mise au point de raccords adaptés ayant une résistance parfaitement stable dans le temps : raccords à poinçonnage profond, soudure autogène sont les modèles les plus utilisés.

Pour l'isolation proprement dite en basse et moyenne tensions, on peut noter :

- l'élimination quasi générale de toute matière isolante coulée à chaud ;
- l'emploi de résine thermodurcissable pour les jonctions et les dérivations ;
- en extrémité de câble moyenne tension et également en jonction, l'emploi de manchons souples répartiteurs de tension ;
- la protection des extrémités par des gaines rétractables ou des isolateurs élastiques moulés présentant une bonne résistance au cheminement ;
- la réalisation de prises de courant jusqu'à la tension de 35 kV environ et une intensité nominale de 630 A (fig. 14).

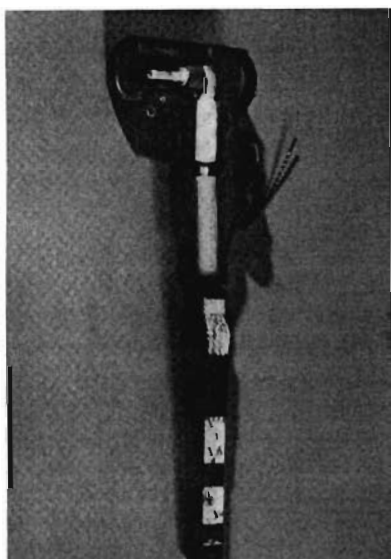


Fig. 14. Prise embrochable 20 kV - 200 A.  
Fig. 14. 20 kV - 200 A plug-in termination.

*The importance of this subject would deserve long developments and the presentation of a great many models. I shall limit myself to mentioning some trends.*

*The quasi-general use of aluminium conductors has required the development of adapted connecting devices having a perfectly stable electric resistance in time: deep punching and welded connectors are the most widely used.*

*Regarding the properly so-called insulation in low and medium voltages, it should be noted:*

- *the quasi-general elimination of any hot cast insulating compound;*
- *the use of thermosetting resin for filling joint and branch boxes;*
- *for medium voltage cable terminations and also joints, the use of flexible linear voltage distribution sleeves;*
- *the protection of terminations by shrinkable sleeves or moulded elastic insulators exhibiting a high resistance to arcing;*
- *the realization of plug-in terminations up to a voltage of about 35 kV and a rated ampacity of 630 A (fig. 14).*

*In the high voltage field where the stresses are higher, the retained principles have been chronologically:*

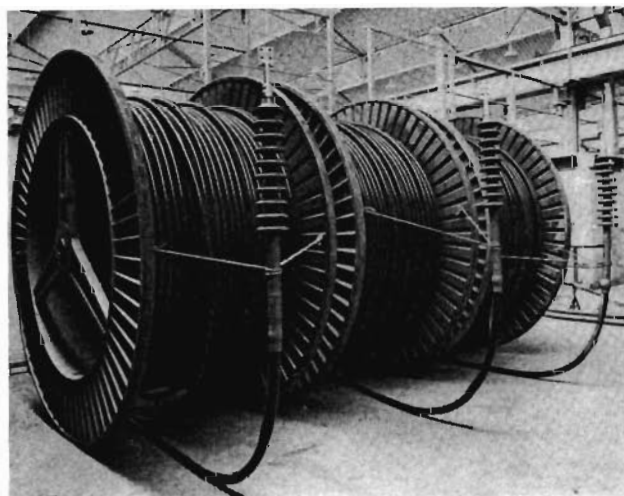


Fig. 15. Longueur de réparation 90 kV, muni d'extrémités préfabriquées.  
Fig. 15. 90 kV repair length with factory-built terminations.

En haute tension, où les contraintes sont élevées, les principes retenus ont été dans l'ordre chronologique :

- pour les jonctions, le moulage par injection de polyéthylène sous vide, puis sous azote, le rubanage de matériau adhésif de même nature que celui du câble ou compatible avec lui ;
- pour les extrémités, les mêmes techniques de moulage, puis la préfabrication en usine de cônes déflecteurs de champ.

Pour les très hautes tensions — 225 kV et plus — les techniques de moulage sous gaz inerte restent pour l'instant de rigueur, mais des techniques de prémoulage associées à l'emploi de SF<sub>6</sub> se développent.

- *for joints, vacuum, then nitrogen, injection moulding of polyethylene, tape lapping of adhesive material of the same kind as that of the cable or compatible with it;*
- *for terminations, the same moulding techniques, then the prefabrication in factory of stress cones.*

*For very high voltages — 225 kV and above — the inert gas moulding techniques remain mandatory for the time being, but the development of premoulding techniques associated with the use of SF<sub>6</sub> is under way.*

*In all cases, it can be observed that the investigations have been directed toward designing accessories the main part of which could be produced in the factory, in order to reduce the on-site assembly difficulties and time. For*



Dans tous les cas, on constate que les recherches se sont orientées vers la réalisation d'accessoires dont la plus grande part puisse être fabriquée en usine, afin de réduire les difficultés et le temps de montage sur place. Pour les câbles haute tension, des longueurs de dépannage comprenant des extrémités à montage rapide ont même été créées jusqu'au niveau de 225 kV (fig. 15).

#### 4.3. L'eau et la fiabilité des câbles synthétiques.

Avec l'apparition des câbles synthétiques, on avait cru pouvoir s'affranchir enfin du problème de l'eau qui avait, si l'on peut dire, empoisonné l'existence des câbles isolés au papier imprégné. Il fallut bientôt se rendre à l'évidence : l'action de l'eau sur ces câbles est plus insidieuse que sur les câbles papier, mais tout aussi réelle.

Qu'elle soit introduite dans l'isolant lors de la vulcanisation ou la réticulation ou qu'elle y pénètre par diffusion lente, l'eau a une influence néfaste sur le comportement dans le temps des câbles et, à partir d'un certain niveau de contrainte locale, peut entraîner la rupture diélectrique de toute la couche isolante.

En fait, il semble que la nocivité de l'eau soit liée à la présence d'impuretés dans le diélectrique, à la nature de ces impuretés, à leurs dimensions, à leur répartition, à leur évolution sous la tension de service.

Pour une qualité de fabrication donnée, augmenter le gradient de service accroît la sensibilité de l'isolant à l'eau. Inversement, réduire la taille et le nombre des impuretés renforce la tenue à l'eau.

Au risque encouru par l'isolant s'ajoute celui de la propagation longitudinale de la corrosion lorsque l'écran métallique est en aluminium. Un risque semblable existe aussi pour le conducteur.

La protection des câbles synthétiques vis-à-vis de l'eau sera donc hiérarchisée en fonction de la tension de service et des conditions d'installation et d'exploitation prévues.

En basse tension, il n'est généralement pas nécessaire de prévoir de protection spécifique.

En moyenne tension, la gaine extérieure et les couches semi-conductrices extrudées interne et externe forment une barrière suffisante contre la pénétration transversale d'eau dans l'isolant. De plus, lorsque l'écran métallique est en aluminium, la tendance est de placer à ce niveau un compound dont l'objet est d'empêcher la propagation longitudinale de l'eau et de la corrosion en cas de défaut de la gaine extérieure.

En très haute tension, la règle communément adoptée est de placer le câble isolé sous une gaine continue de plomb ou d'aluminium, elle-même protégée par une gaine synthétique extrudée de qualité appropriée. On considère ces protections contre la pénétration transversale d'eau comme suffisantes, étant donné que le câble sera muni, s'il y a lieu, d'une protection mécanique supplémentaire (pose en caniveau par exemple).

Pour les câbles de tension intermédiaire, il n'y a pas encore de position unanime sur la nécessité d'une gaine métallique continue.

Notons encore que les accessoires d'extrémité et de jonction doivent être étanches et que, lorsque les câbles sont prévus pour fonctionner dans l'eau avec un risque non nul de dommage mécanique (câbles sous-marins par exemple), il devient nécessaire de les obturer non seule-

*high voltage cables, repairing lengths comprising high-speed assembly terminations have even been created up to the 225 kV level (fig. 15).*

#### 4.3. Influence of water on the reliability of polymer insulated cables.

*With the advent of polymeric cables, there was a general belief that finally it was possible to get free from the water problem which, so to say, had "envenomed" the life of cables with impregnated paper insulation. Soon, it became necessary to bow to the facts: the action of water on these cables is more insidious than on paper cables but quite as real.*

*Whether introduced into the insulation during the vulcanization or cross-linking process, or penetrating there through slow diffusion, water has a disastrous influence on the time-behaviour of these cables, and up from a certain local stress level it may lead to the breakdown of the whole insulating wall.*

*Indeed, it seems that the harmfulness of water is associated with the presence of impurities within the dielectric, their nature, their sizes, their distribution, their evolution under the working voltage.*

*For a given manufacturing quality, increasing the working voltage gradient will increase the sensitivity to water of the insulation. Inversely reducing the size and number of impurities leads to improve the strength of insulation towards water effects.*

*Moreover there is a chance for corrosion to be propagated when the metallic screen is in aluminium. A similar chance exists for aluminium conductors.*

*The protection of polymeric cables against water penetration should therefore be graded in function of the foreseen rated voltage and laying and operating conditions.*

*For low voltage cables, in general no specific protection is required.*

*For medium voltage cables, the oversheath and the internal and external extruded semi-conducting layers form a suitable barrier against radial penetration of water into the insulation. In addition with a metallic screen in aluminium, the tendency is to apply at this level a compound, the role of which is to prevent water and corrosion to spread along the cable in case of failure of the oversheath.*

*For very high voltage cables, the rule generally adopted consists in placing the core under a continuous lead or aluminium sheath well protected by an oversheath of adequate quality. These protections against radial water penetration are considered as suitable, given these cables may receive if necessary an additional mechanical protection (laying in troughs for example).*

*For intermediate voltage cables, there are not yet unanimous views on the need for a continuous metallic sheath.*

*It should be noted too that terminations and joints must be waterproof and for cables to be operated in the presence of water with some chance of being mechanically damaged (submarine cable for instance), the complete*

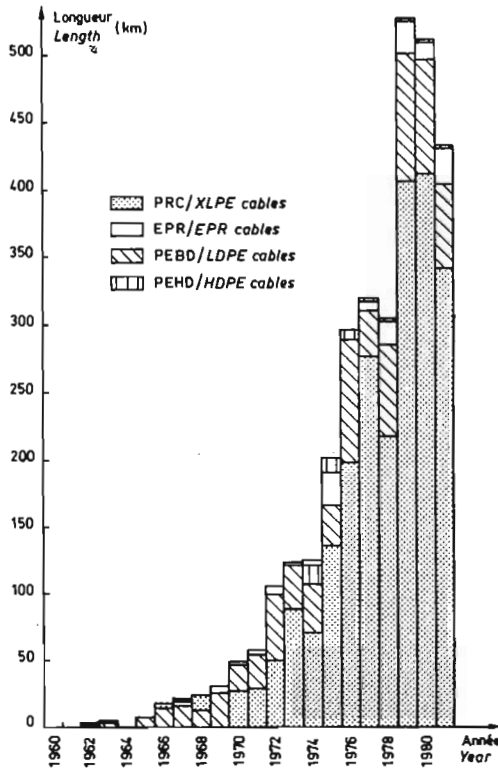


Fig. 16. Longueur des liaisons triphasées de câble synthétique HT posées chaque année, par type d'isolant.

Fig. 16. Length of HV 3-phase polymer cable links installed each year, per type of insulation.

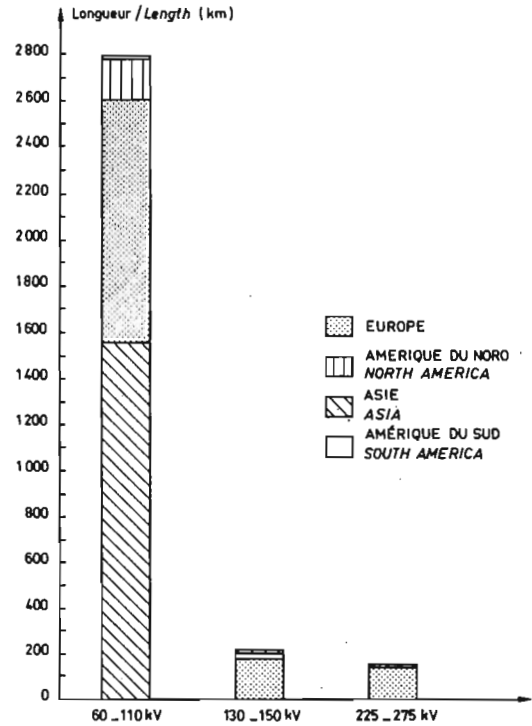


Fig. 18. Longueur totale des liaisons triphasées HT installées jusqu'en 1981, par continent.

Fig. 18. Cumulative length of HV 3-phase links installed up to 1981, per continent.

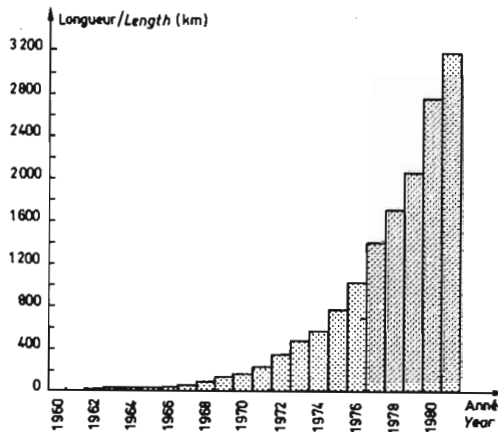


Fig. 17. Longueur totale des liaisons HT triphasées posées jusqu'en 1981.

Fig. 17. Cumulative length of HV 3-phase links installed up to 1981.

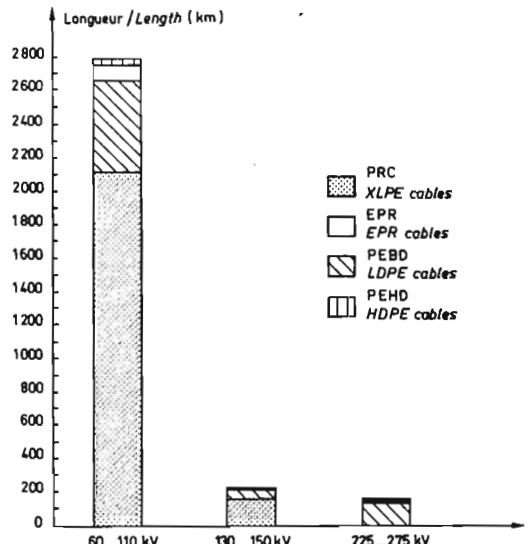


Fig. 19. Longueur totale des liaisons triphasées HT installées jusqu'en 1981, par type d'isolant.

Fig. 19. Cumulative length of HV 3-phase links installed up to 1981, per type of insulation.

ment au niveau de l'écran métallique, mais aussi à celui du conducteur.

Ce n'est finalement que si, dans chaque situation, les précautions indispensables contre la pénétration d'eau sont prises, que les câbles à isolant synthétique peuvent avoir la fiabilité qu'on attend d'eux.

obturation becomes mandatory not only at the screen level, but also at the conductor's one.

In conclusion, the expected reliability of polymeric cables is likely to be obtained only if, in every situation, adequate provision is made against water penetration.

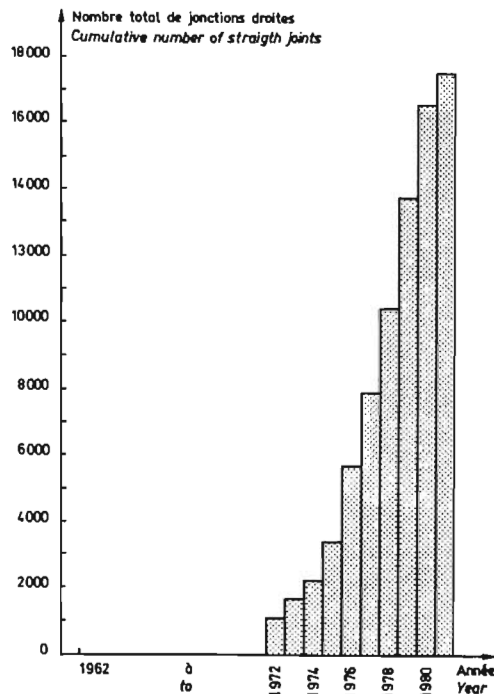


Fig. 20. Nombre total d'extrémités de câble HT installées jusqu'en 1981.

Fig. 20. Cumulative number of sealing ends of HV cables installed up to 1981.

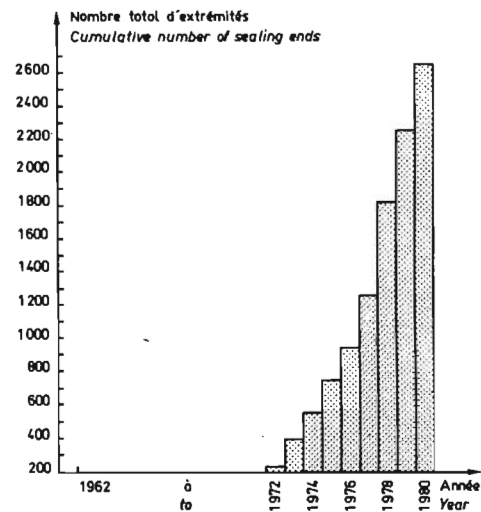


Fig. 21. Nombre total de jonctions de câble HT installées jusqu'en 1981.

Fig. 21. Cumulative number of straight joints installed on HV cables up to 1981.

#### 4.4. Quelques données en haute tension.

Les figures ci-contre illustrent le développement des câbles synthétiques depuis leur apparition en haute tension, à partir de 60 kV (fig. 16, 17, 18, 19, 20 et 21).

Ces figures sont extraites d'un rapport présenté en 1983 au Comité 21 de la CIGRÉ par le groupe de travail chargé de l'étude de ces câbles et résultent d'une enquête effectuée auprès des 23 pays qui sont représentés dans ce comité.

Elles ne couvrent donc pas toutes les réalisations faites par le monde, et en particulier celles destinées à l'exportation par les pays concernés.

Bien qu'incomplètes, elles montrent néanmoins le sens de l'évolution des techniques de câbles jusqu'en 1981.

On peut résumer toutes ces courbes d'un mot: le développement constaté depuis vingt ans a une allure exponentielle.

#### 5. Conclusion.

Ce rapide voyage à travers l'histoire des câbles d'énergie montre que leur technique a été bouleversée par l'apparition après-guerre des matières synthétiques. Les câbles mis sur le marché sont devenus légers, souples, propres et faciles à poser. De plus, l'exploitation des câbles à haute tension a été simplifiée, par rapport aux câbles papier-huile, par la suppression de tout fluide sous pression.

#### 4.4. Some data about high voltage cables.

The figures illustrate the development of extruded polymeric cables since their appearance in high voltage from 60 kV up (fig. 16, 17, 18, 19, 20 and 21).

These figures are extracted from a report presented in 1983 to CIGRÉ Committee 21 by the working group entrusted with the study of these cables; they result from a survey involving the 23 countries represented in this committee.

Therefore, they do not cover all the realizations throughout the world and in particular those achieved by the countries concerned with exportation.

Though incomplete, they show nevertheless the direction of the evolution of the cable techniques until 1981.

All these curves can be summarized in a word: the development observed since 20 years has an exponential aspect.

#### 5. Conclusion.

This rapid trip through the history of power cables shows that their technique was radically changed by the appearance, after the war, of polymeric materials. The cables made available on the market became light, flexible, clean and easy to install. Moreover, the operation of high voltage cables has been simplified with respect to oil-paper cables thanks to the suppression of any fluid under pressure.

Sous tous ses aspects — études, mise au point, fabrication, exploitation — la technique des câbles à isolant synthétique extrudé fait appel à un domaine scientifique de plus en plus large et met en œuvre des technologies et des savoir-faire de plus en plus spécialisés, non seulement pour les réalisations de pointe, mais aussi pour les applications courantes.

Bien entendu, les préoccupations techniques se doublent à chaque pas de considérations économiques, ne serait-ce que du fait de la pression de la clientèle et par le jeu de la concurrence.

L'industrie des câbles apparaît aujourd'hui comme une industrie de production de masse de câbles de spécifications très diversifiées, reposant à la fois sur une bonne connaissance des besoins et sur une recherche technologique toujours en éveil. L'une et l'autre paraissent être bien assurées.

L'exposé précédent donne une idée de l'importance des efforts de recherche-développement faits par les constructeurs.

L'action des utilisateurs est également importante. Les grands distributeurs (CEGB - EDF - ENEL, etc.) et les groupements de distributeurs (EPRI, CRIEPI, VDEW, etc.) participent activement à la définition des besoins de câbles d'énergie pour les réseaux et contribuent à la recherche par la définition de spécifications techniques, de procédures d'essais de qualification, de modes opératoires, etc.

La concertation permanente entre constructeurs et utilisateurs se trouve également assurée par le biais d'instances internationales comme le CIREN et la CIGRÉ. Ainsi, depuis 1967, *Electra*, la revue de la CIGRÉ, a publié 25 études fondamentales et recommandations d'essai relatives aux câbles d'énergie.

Constructeurs et exploitants coopèrent également aux niveaux national et international à la mise en place d'une normalisation qui codifie, à chaque étape, les résultats des études et l'état de la technique. Le Comité d'Etudes 20 de la CEI a produit près de 50 normes internationales et en a une trentaine en projet ou à l'étude. Un travail similaire s'effectue dans beaucoup de pays, à l'échelon national et même à celui de certains distributeurs. Pour sa part, EDF a en catalogue 44 normes d'entreprise concernant les câbles et surtout leurs accessoires et quelque 12 projets à l'étude.

En permettant à tous les intéressés de faire le point sur la technique des câbles à isolant synthétique en ce début de 1984, ces journées internationales « Jicable » s'inscrivent dans le cadre d'une coopération qui s'est montrée jusqu'à maintenant très fructueuse.

Jc suis persuadé que chacun en tirera la conclusion que les câbles synthétiques, bien que déjà parvenus à un degré de fiabilité satisfaisant, sont encore perfectibles et peuvent être utilisés à une plus large échelle qu'actuellement, car il subsiste dans la plupart des pays d'immenses potentialités d'emploi des câbles isolés d'énergie.

Et si l'on me demandait quels seront les câbles de l'an 2000, je dirais volontiers :

« Il y aura sûrement des câbles isolés au papier imprégné d'huile, mais aussi, surtout et partout, des câbles à isolant synthétique ». C'est ce que vous allez montrer au cours de ces journées d'études intensives, pour lesquelles je vous souhaite plein succès.

*In all its aspects — studies, design, manufacture, operation — the technique of extruded polymer insulated cables is based on a scientific field becoming increasingly wide, and on the implementation of technologies and savoir-faire ("know-how's") more and more specialized, not only for most advanced realizations but also for current applications.*

*Of course, technical concerns are doubled at every step by economic considerations, if only because of the goodwill pressure and owing to the competition game.*

*The cable industry is emerging today as a mass-production industry for cables of most diversified designs, based on both a good knowledge of the needs and a technological research on the watch. Both seem to be well ensured.*

*The preceding statement gives an idea about the importance of the research-development efforts made by manufacturers.*

*The user's action is also important. The great utilities (CEGB - EDF - ENEL) and distributor's associations (CRIEPI, EPRI, VDEW...) participate actively in defining the needs of power cables for their networks and contribute to the research work through the definition of technical specifications, qualification testing procedures, codes of practice, etc.*

*Permanent concertation between manufacturers and users is also ensured through the medium of international instances, such as CIREN and CIGRE. So, since 1967, *Electra*, the CIGRE journal, has published 25 fundamental studies and test recommendations relative to power cables.*

*Manufacturers and utilities also co-operate on national and international levels to establish a standardization that codifies, at every step, the results of studies and the state of the art. The IEC Technical Committee 20 has produced nearly 50 international standards and has about thirty standards in project or under study. A similar work is going on in many countries, on the national level and even on that of certain utilities. For its part, EDF has in catalogue 44 company-standards dealing with cables and mainly their accessories, and about 12 projects under study.*

*Enabling everybody concerned to state the position of the polymer insulated cable technique at the beginning of 1984, these international "Jicable" days enter a frame of a cooperation which has proved to be up to now very fruitful.*

*I am sure that everybody will draw the conclusion that polymer insulated cables, though having already reached a satisfactory reliability level, are still perfectible and can be used on a larger scale than at the present time, for there exist in most countries immense potentialities for employing insulated power cables.*

*And if I were asked what kind of cables will be used in the year 2,000, I would readily say:*

*"There will certainly be oil-impregnated paper insulated cables, but also, above all and everywhere, cables with polymeric insulation". It is what you are going to demonstrate in the course of these intensive study days, for which I wish you full success.*