

JOURNÉES D'ÉTUDES INTERNATIONALES SUR LES CABLES D'ÉNERGIE A ISOLANT SYNTHÉTIQUE

INTERNATIONAL CONFERENCE ON POLYMER INSULATED POWER CABLES

1 - Résumé des travaux

1 - A compendium

Lucien DESCHAMPS

Président de la Section 11 (Etudes générales)
de la SEE

JICABLE 84, première conférence internationale sur les câbles d'énergie à isolant synthétique, s'est tenue à Versailles du 5 au 10 mars 1984.

Ce document constitue une synthèse des travaux qui ont été présentés au cours de cette conférence.

Les principaux thèmes abordés sont :

- les matériaux et composants des câbles à isolant synthétique ;*
- les câbles et accessoires des réseaux de distribution (BT et MT) et de transport (HT et THT) ;*
- les câbles sous-marins ;*
- les câbles à comportement amélioré au feu.*

Par ailleurs, ce document présente un résumé des travaux d'un atelier (Atelier HT 84), organisé en liaison avec JICABLE sur le comportement à haute température des câbles haute tension à isolant synthétique. Il ressort des discussions de cet atelier qu'une certaine réserve technique et économique apparaît aujourd'hui pour l'utilisation à haute température de ces câbles.

JICABLE 84, which was the first international conference on polymer insulated power cables, took place in Versailles from 5th to 10th of March 1984.

This paper is a synthesis of the works that were presented during the conference. The main topics discussed are:

- materials and components for polymer insulated power cables;
- cables and accessories for LV and MV distribution power systems and HV and UHV transmission power systems;
- submarine cables;
- cables with improved fire behaviour.

Besides, this paper gives a summary of the works undertaken by a workshop (called Workshop HT 84) organized in connection with JICABLE on the behaviour of polymer insulated HV cables at high temperature. From the discussions, it follows that the use of these cables at high temperature must not be envisaged without certain technical and economic reservations.

1. Introduction.

La première conférence internationale sur les câbles d'énergie à isolant synthétique « Jicable 84 », qui a regroupé 538 délégués de 34 pays, s'est déroulée au Palais des Congrès de Versailles du 5 au 10 mars 1984.

(*) Cette manifestation, dénommée Jicable 84, a été organisée par la SEE, la SCI, EDF, le Sycabel, le Gimélec, le Serce et le GIEL, avec le parrainage de la Cigré, du Cired, de la section française de l'IEEE et de l'IEEE Electrical Insulation Society.

L'atelier HT 84 a été organisé conjointement par EDF et les constructeurs CDL, CGF, SILEC, TCP et TJC, avec le parrainage de la SEE.

1. Introduction.

The first international conference on polymer insulated power cables « Jicable 84 », which brought together 538 delegates from 34 countries, took place at the Palais des Congrès in Versailles from 5th to 10th of March 1984.

Jicable 84 provided an opportunity for a broad exchange of information concerning polymer insulated power cables and industrial development at all levels from low voltage to the highest voltages.

Eighty-nine papers were discussed concerning the following topics:

- Materials and components for polymer insulated cables.

Jicable 84 a permis une large confrontation en matière de recherche sur les câbles à isolant synthétique et de développement industriel pour tous les niveaux depuis la basse tension jusqu'aux plus hautes tensions.

Quatre-vingt-neuf rapports ont été présentés et discutés sur les thèmes suivants :

- Matériaux et composants des câbles à isolant synthétique.
- Influence de l'eau sur la tenue diélectrique.
- Câbles isolés basse tension et moyenne tension (1 kV à 30 kV) et matériels de raccordement des réseaux de distribution.
- Câbles isolés haute tension et matériels de raccordement des réseaux de transport.
- Câbles sous-marins.
- Câbles à comportement amélioré au feu pour centrales, postes....

Les travaux ont été introduits par une conférence générale de Robert Arrighi sur l'évolution des techniques de câbles d'énergie. Cette conférence a souligné l'importance croissante du développement des câbles à isolant synthétique par rapport aux différentes autres techniques de câbles jusqu'aux plus hautes tensions (500 kV).

Un résumé des travaux de Jicable 84 est présenté ci-après ainsi que la synthèse d'un atelier sur le comportement à haute température des câbles HT à isolant synthétique organisé à Clamart les 8 et 9 mars 1984 en liaison avec Jicable (Atelier HT 84).

Le recueil des communications à Jicable 84 [2] et la synthèse des Travaux de HT 84 [3] sont disponibles à la SEE ⁽¹⁾.

2. Matériaux et composants des câbles à isolant synthétique.

Les interventions et discussions ont permis de faire le point sur les nouveautés dans le domaine des différents constituants des câbles d'énergie à isolant synthétique : écrans semi-conducteurs, écrans métalliques, matériaux de gainage et isolants électriques.

2.1. Matériaux pour écrans et gainage de câbles.

Un rapport et diverses interventions ont mentionné l'intérêt des écrans constitués de laminés métalliques pour assurer une bonne étanchéité au niveau des gaines. Ils ont notamment montré que les câbles réalisés selon cette technique ne présentaient pas d'arborescences après une longue durée d'utilisation.

Diverses remarques ont été formulées :

— L'adhérence des laminés en aluminium est satisfaisante depuis déjà de longues années, mais celle des laminés en cuivre a été obtenue plus récemment. Une gaine composite comprenant une feuille de plomb a également été présentée.

— Il est recommandé de coller les recouvrements, par exemple avec un adhésif thermofusible, et d'éviter les pressions internes sur le tube.

⁽¹⁾ Les prix de ces documents sont respectivement de 500 F et 50 F.

- Influence of water on dielectric strength.
- Low and medium voltage insulated cables (1 to 30 kV) and accessories for distribution power systems.
- High voltage insulated cables and accessories for transmission power systems.
- Submarine cables.
- Cables with improved fire behaviour for power plants, substations, etc.

The work of the conference began with a general introduction given by Robert Arrighi [1] on the development of power cable techniques. This conference underlined the increasing importance of the development of polymer insulated cables compared with the various other cables techniques, including the highest voltages (500 kV).

A summary of the work undertaken on Jicable 84 is given below, together with a report on a workshop on the behaviour of polymer insulated HV cables at high temperature held at Clamart on the 8th and 9th of March 1984 in conjunction with Jicable (Workshop HT 84).

The proceedings of Jicable 84 [2] and a report on Workshop HT 84 [3] are available at SEE ⁽¹⁾.

2. Materials and components for polymer insulated cables.

The various papers and discussions covered the latest developments in the various component parts of polymer insulated power cables: semi-conducting screens, metal screens, sheathing materials and insulating materials.

2.1. Materials for cable screens and sheaths.

One report and several delegates mentioned the usefulness of screens composed of metal laminates to ensure tightness of sheaths. In particular it was shown that cables produced by means of this technique showed no evidence of «trees» following prolonged use.

Various remarks were made:

— The adherence of aluminium laminates has been satisfactory for several years, but that of copper laminates has only been achieved recently. A composite sheath comprising a sheet of lead was also described.

— Covering should be glued for example with a hot melt to avoid the internal pressures acting on the tube.

— Short-circuit withstand strength of the achieved screens depends on the cross section and may be significant.

⁽¹⁾ Prices resp. 500 FF and 50 FF.

— La tenue au court-circuit des écrans réalisés, fonction de la section, peut être importante.

Pour limiter l'induction dans les câbles de télécommunication, il a été mis au point des mélanges de gainage et d'enduction permettant une mise à la terre continue des écrans et armures. Cette technique pourrait être adoptée pour des câbles d'énergie. Les problèmes de réduction ou d'oxydation du carbone ont pu être résolus et le matériau présenté protège efficacement de la corrosion et n'est pas affecté par le séjour dans le sol. Il supporte les pliages et autres contraintes mécaniques. La résistance du revêtement varie peu avec l'élévation de la température et les auteurs du rapport concerné vont en vérifier le comportement lors d'écoulement de courant très importants.

Un rapport a montré que les copolymères à faible teneur en acétate de vinyl — 1,5 à 8 % — se réticulent plus facilement que le polyéthylène (PE), quel que soit le système de réticulation (peroxyde, silane, irradiation haute énergie). Les produits obtenus sont mécaniquement et électriquement convenables pour l'usage en BT, mais aussi pour réaliser des semi-conducteurs. Dans ce dernier cas, la teneur en acétate de vinyl doit être plus importante.

2.2. Matériaux isolants.

Un rapport a comparé, à l'aide de différentes méthodes (spectro-infrarouge, analyse enthalpique différentielle, analyse thermomécanique, microscopie...), des isolants réticulés chimiquement par les procédés « vapeur » et « sec » et par le procédé silane. Des différences entre les matériaux ont été mises en évidence. Selon les auteurs, les propriétés spécifiques de ces matériaux devront être prises en compte pour la définition technologique des câbles.

Dans un autre rapport, il a été montré que l'on pouvait, grâce à des techniques telles que la chromatographie sur gel, la résonance magnétique nucléaire, la calorimétrie différentielle, différencier un polyéthylène qui vient d'être fabriqué d'un polyéthylène vieilli. Toutefois, l'auteur souhaite que ses travaux ne conduisent pas, pour le moment, à des conclusions hâtives.

Par les mêmes méthodes d'analyse de grande sensibilité, un rapport a présenté la constitution d'une « banque de données », avec l'ambition de pouvoir par la suite juger du vieillissement des câbles en service.

Une communication a souligné l'importance des tensions mécaniques internes en fonction des conditions de mise en œuvre des enveloppes isolantes, notamment épaisses.

La réticulation par les silanes a été examinée en faisant appel en particulier à des méthodes rhéologiques et à l'analyse enthalpique différentielle. On a pu expliquer les greffages et réticulations et donner des indications sur les méthodes à retenir pour avoir des résultats satisfaisants. Les possibilités de caractériser la réticulation par les silanes ont été exposées.

2.3. Matériaux isolants pour utilisation en courant continu.

Un rapport a montré que l'incorporation d'une résine ionomère au polyéthylène avant réticulation permettait de diminuer de façon importante l'effet des charges d'espace et d'améliorer la tenue diélectrique en courant continu.

Dans un autre rapport a été examiné le comportement en courant continu du polyéthylène sous fortes pressions.

Mixtures of sheathing and coating have been produced to limit induction in telecommunication cables and these mixtures enable continuous grounding of screens and armours. This technique could be adopted for power cables. The problems of carbon reduction or oxydation have been solved and the material in question provides efficient protection against corrosion and is not affected by surrounding soil. It withstands bending and other mechanical stresses. The resistance of the covering varies very little with temperature rise and the authors of the concerned report intend to check behaviour during very high current flows.

One report showed that copolymers with a low vinyl acetate content (1.5 to 8%) are easier to cross link than the polyethylenes (PE) regardless of the cross-linking system (peroxyde, silane, high energy radiation). The products obtained are mechanically and electrically suitable for use at LV and also for making semi-conducting materials. In the latter case the vinyl acetate content should be higher.

2.2. Insulating materials.

One report used various methods (spectro-infrared, differential scanning calorimetry, thermomechanical analysis, microscopy, etc.) to compare chemically cross-linked insulating materials using the steam and dry processes and the silane process. The differences between the materials were clearly shown. According to the authors, the specific properties of the materials will have to be taken into account for cable design.

Another report showed that using techniques such as gel chromatography, nuclear magnetic resonance and differential calorimetry makes it possible to differentiate between a polyethylene which has just been produced and a polyethylene which has aged. However the author stated that he did not wish his work to be used as a basis for hasty conclusions.

Another report described the preparation of a data bank using the same high sensitivity analysis methods, the aim being to eventually detect the ageing of cables in service.

A further paper underlined the importance of internal mechanical stresses in relation to the conditions governing use of insulations, especially thick insulations.

Cross-linking using silanes was examined by means of rheologic and differential scanning calorimetry. Graftings and cross-linking were explained and indications were given as to the methods to be used in order to obtain satisfactory results. The possibilities of characterizing reticulation by means of silanes were discussed.

2.3. Insulating materials for DC.

A report showed that the incorporation of an ionomeric resin into the PE prior to cross-linking enables significant reduction of space charging effects and improves dielectric strength at DC current.

Another report examined the DC behaviour of PE at high pressures. It emerges from the report that pressure

Il ressort que la pression a un effet favorable sur le gradient de potentiel de claquage lorsque la température est supérieure à 45 °C ; mais cet effet devient défavorable aux plus basses températures. Différentes hypothèses ont été avancées et des essais restent à faire avant de passer à des applications industrielles éventuelles.

2.4. Matériaux isolants pour utilisation aux températures cryogéniques.

La possibilité d'utiliser le polyéthylène réticulé (PR) pour l'isolation des câbles cryogéniques a été examinée. Les résultats sont très favorables sur le plan diélectrique. L'auteur du rapport explique ces caractéristiques par le gel de l'eau et des autres impuretés et l'inhibition de toute réaction chimique.

3. Influence de l'eau sur la pérennité diélectrique de l'enveloppe isolante.

Deux rapports ont traité des problèmes d'arborescences d'eau se développant dans les isolants. La discussion a fait apparaître qu'il fallait distinguer les arborescences de type « nœud papillon » et les arborescences de type « ouvert » (arbustes...), ayant pour origine les interfaces enveloppe isolante/semi-conducteur. La contamination de l'enveloppe isolante par des impuretés contribue à accélérer le développement des arborescences.

Deux rapports indiquent un taux d'humidité relative en dessous duquel les arborescences d'eau ne se développent pas.

Si les études de densité d'arborescences ont porté essentiellement sur les « nœuds papillons », il est reconnu que ce sont les arborescences ouvertes qui sont généralement responsables des claquages. Le mécanisme de passage de l'arborescence électrochimique à l'arborescence électrique avec évolution vers le claquage reste encore très mal connu.

Les électrodes « aiguilles » qui sont utilisées pour étudier en laboratoire les arborescences ne correspondent pas à ce qui se passe en réalité. Elles ont pour seul mérite de permettre de localiser avec précision le point d'apparition des arborescences et de permettre ainsi d'en suivre le développement au microscope.

On a par ailleurs souligné la nécessité de vérifier les éventuelles lois d'accélération des essais afin d'éviter des conclusions erronées.

Une nouvelle méthode de mesure de la croissance des arborescences électrochimiques dans le polyéthylène employant l'analyse par activation neutronique a été présentée.

Dans cinq rapports ont été présentés différents additifs dont l'effet est de rendre l'enveloppe isolante moins sensible au développement des arborescences. Une toute nouvelle méthode mathématique a par ailleurs été proposée pour évaluer la durée de vie d'un câble en environnement humide.

Un rapport traitant de la restauration de la qualité de câbles affectés par l'humidité en les séchant par circulation de gaz sec par l'âme suivie d'une imprégnation par un liquide approprié a donné lieu à une discussion qui a clarifié le phénomène : l'humidité pénètre dans l'enveloppe

has a favorable effect on the breakdown voltage gradient when temperature is greater than 45 °C; however this effect becomes unfavorable at the lowest temperatures. Various hypothesis were put forward and tests remain to be carried out before proceeding with an industrial application.

2.4. Insulating materials for use at cryogenic temperatures.

The possibility of using cross-linked polyethylene for the insulation of cryogenic cables was examined. The results are very favorable from the dielectric point of view. The author's report attributes these characteristics to the freezing of water and other impurities and to the prevention of any chemical reaction.

3. Influence of water on the dielectric strength of the insulation.

Two reports dealt with the problems of water trees developing in the insulation. It emerged from the discussion that a distinction had to be made between « bow tie » type trees and « vented » trees arising from the insulation/semi-conductor interfaces. Contamination of the insulation by impurities accelerates the development of such trees.

Two reports mentioned a relative humidity rate below which water trees do not develop.

Although tree density studies mainly concern « bow tie » trees, it was generally recognized that « vented » trees were mainly responsible for breakdown. The mechanism governing transition of electrochemical treeing to electrical treeing with development to breakdown is still unknown.

The needle electrodes used in laboratories to initiate water trees are not representative of what occurs in reality. Their only merit is that they enable accurate location of the point at which trees appear, thus allowing to follow their development using a microscope.

The need to check any test acceleration law in order to avoid false conclusions was underlined.

A new method for measurement of the growth of electrochemical trees in polyethylene using analysis by neutron activation was presented.

Five reports mentioned various additives whose effect is to make the insulation less sensitive to water tree development. A completely new mathematical method was also proposed for assessing the lifetime of a cable in a wet environment.

Another report dealt with quality restoration of damaged cables due to wet environments by drying out the core using dry gas circulation followed by impregnation with a suitable liquid and this gave rise to a discussion which clarified the phenomenon. The humidity penetrates the insulation from outside but drying out the cable from inside and impregnation will drive the moisture towards the outer layer where it is less dangerous. The water content of the insulation will thus achieve an equilibrium

isolante par l'extérieur, mais le séchage par l'âme et l'imprégnation ont pour effet de repousser l'humidité vers les couches externes où ses effets sont moins dangereux. Il s'établit ainsi un équilibre de la teneur en eau de l'isolation, très inférieure à ce que l'on observe avant le traitement et qui dépend beaucoup de la température du câble. La tenue diélectrique s'en trouve grandement améliorée.

En conclusion des discussions sur ce thème, il apparaît que beaucoup d'études sont menées par différents laboratoires. Les résultats restent toutefois encore très difficiles à interpréter en vue de la présentation d'une théorie synthétique.

Le « danger » de l'arborescence électrochimique reste en particulier à expliquer. Il faut espérer que progressivement, à la suite d'autres réunions, on arrivera à y voir plus clair dans un phénomène qui intéresse au premier chef les exploitants de réseau.

En attendant une meilleure connaissance des mécanismes en jeu, peut-être faut-il, comme l'ont préconisé divers intervenants, éviter que l'eau atteigne l'enveloppe isolante par le choix de technologies de câbles étanches.

4. Câbles et accessoires des réseaux de distribution.

Deux rapports ont été exclusivement consacrés aux réseaux de distribution aériens BT à conducteurs isolés.

Par ailleurs, divers rapports ont fait le point de l'évolution des câbles de distribution souterrains dans divers pays.

On peut relever différents points communs à l'ensemble de ces rapports et en dégager quelques orientations générales ;

- l'utilisation à peu près généralisée comme isolant de base en BT et en MT du PR suivi de loin par l'EPR ;
- une tendance vers le développement des conducteurs aluminium ;
- une simplification de plus en plus grande des accessoires et de leur mise en œuvre.

On peut, de plus, faire les observations suivantes :

4.1. Réseaux BT.

Tous les rapports notent le développement des réseaux aériens à conducteurs isolés qui remplacent progressivement les réseaux à conducteurs nus. Cette nouvelle technique, introduite en France vers 1960, s'est développée ensuite en Belgique, Italie, Espagne et plus récemment en Allemagne. Elle s'applique aux câbles de distribution et de branchement en apportant les avantages suivants :

— *par rapport aux conducteurs nus* : faible réactance, facilité de raccordement sous tension, impossibilité de contacts intempestifs entre parties sous tension, réduction des contraintes mécaniques dues à la neige, suppression des isolateurs ;

— *par rapport au réseau souterrain* : coût d'installation réduit, rapidité et facilité d'intervention ou de raccordement.

Les câbles de distribution sont autoporteurs. Le neutre porteur de 54,6 mm² Al 6101 est d'un emploi généralisé, sauf en Allemagne où le neutre et les trois conducteurs de phase sont identiques et autoporteurs.

at a much lower level than that observed before treatment and which greatly depends on temperature of the cables. Dielectric strength is greatly improved as a result.

In conclusion it appears that many studies on the influence of water are being undertaken by different laboratories. The results however are still very difficult to interpret with a view to the presentation of a synthetic theory.

In particular the «danger» of electrochemical treeing still remains to be explained. It can only be hoped that further meetings will produce a clearer picture of this phenomenon which is of prior importance to utilities.

In the meantime we should perhaps, as suggested by various delegates, prevent water from reaching the insulation by selecting watertight cable technologies.

4. Cables and accessories for distribution power systems.

Two reports were entirely devoted to insulated conductor LV overhead distribution networks.

Various other reports concerned the development of underground distribution cables in various countries.

Various common points emerged from these reports enabling the definition of a few general trends:

- *the almost universal use of XLPE as a basic insulating material for LV and MV cables and to a lesser extent of EPR;*
- *a trend towards the development of aluminium conductors;*
- *the increasing simplification of accessories and of their making.*

In addition, we will make the following comments:

4.1. LV networks.

All the papers mentioned the development of overhead insulated conductor networks which are gradually replacing the bare conducting networks. This new technique was introduced in France in 1960 and subsequently adopted in Belgium, Italy, Spain and more recently in Germany. It applies to power distribution and service cables and offers the following advantages:

— *compared with bare conductors: low reactance, easy live connection techniques, impossibility of inadvertent contacts between live parts, reduction of mechanical stresses due to snow, elimination of insulators;*

— *compared with an underground network: reduced insulation cost, rapidity and ease of connection or intervention.*

Power distribution cables are self-supporting cables. An Al 6101 neutral conductor of 54.6 mm² is widely used, except in Germany where the neutral and the three-phase conductors are identical and self-supporting.

En ce qui concerne les accessoires, on note une orientation vers les manchons de jonction à sertir préisolés en fabrication et les connecteurs de dérivation à perforation d'isolant. Les pinces d'ancrage utilisent des systèmes à coincement conique avec coins isolants.

Les spécifications techniques ne sont pas encore très homogènes entre elles. Il serait souhaitable qu'elles soient mieux harmonisées.

4.2. Réseaux MT.

Des divers rapports et interventions, on peut retenir, pour la constitution des nouveaux câbles, la généralisation d'écrans semi-conducteurs extrudés sous et sur l'isolation. L'écran sur l'isolation est généralement du type pelable à froid, sauf en Allemagne où la mise au point d'outils adéquats pour la préparation des extrémités élimine l'exigence de pelabilité.

Pour l'écran métallique extérieur, il n'apparaît pas d'unité de vue entre les différents pays. On rencontre le ruban aluminium contrecollé, les fils et les rubans de cuivre. Les écrans en fils permettent des courants de défaut à la terre plus importants. Les écrans minces, en hélice ou longitudinaux, ne sont utilisables que sur les réseaux où les courants de défaut à la terre sont limités : il peut être nécessaire de les mettre en parallèle avec l'armure du câble ou avec un conducteur de terre séparé.

Protection extérieure : certains pays hésitent à abandonner l'armure en fils d'acier ou en feuillards. La gaine de protection extérieure est généralement en PVC. Toutefois, en Allemagne, il a été utilisé du PE en gainage.

Le choix du PR ou de l'EPR pour l'enveloppe isolante est motivé par des considérations de tenue à température de service élevée, égale à 90 °C. D'après certains auteurs, cette température permet d'approcher au plus près la section économique en exploitation. Ces isolants autorisent des surcharges occasionnelles portant la température jusqu'à 120 °C pendant quelque temps et 250 °C sur âme en court-circuit. Le PR est plus souvent retenu que l'EPR.

Aucune évolution importante des matériaux isolants n'est actuellement prévisible tant en BT qu'en MT. Il est seulement question du PE réticulé par silane, qui est une variante du PR habituel réticulé par peroxyde. L'intérêt de ce nouveau matériau se situerait surtout au niveau des équipements de production. En ce qui concerne les comportements comparés des polyéthylènes réticulés par silane ou par peroxyde, des investigations plus étendues, particulièrement en exploitation, seraient nécessaires pour se faire une opinion précise.

Le risque de propagation longitudinale de l'eau est combattu au niveau de l'écran métallique par l'emploi des produits souples et élastiques ou de poudres gonflant à l'eau. Pour l'instant, pas de développement d'âmes conductrices étanches : il est vrai que l'emploi de matières d'étanchéité à ce niveau pourrait amener des risques nouveaux de migration et d'expansion de la matière sous l'effet de la chaleur. De plus l'incidence économique serait défavorable.

En ce qui concerne les accessoires, la tendance est à la simplification et à la facilité de mise en œuvre par le développement :

— des raccords à poinçonnage profond ;

As far as the accessories are concerned the trend is towards crimp connecting sleeves pre-insulated during the manufacturing process and towards branching and insulation piercing service connectors. The anchoring parts make use of wedges with insulated linings.

The various technical specifications available are not as yet in complete agreement with each other and require standardization.

4.2. MV networks.

The various reports and discussions concerning composition of the new cables showed that extruded semi-conducting screens both below and above the insulation are in general use. The screen on the insulation is generally of the easily removable type except in Germany where the design of suitable tools for preparation of terminations makes such a requirement unnecessary.

For the outer metallic shield there is no unanimous agreement between the various countries. The various systems used include aluminium tapes, copper wires and copper tapes. Use of wire screens enables higher earth fault currents. Thin screens either longitudinal or helical can only be used on networks where earth fault currents are limited: it may be necessary to place them in parallel with the cable armour or with a separate earth conductor.

External protection: certain countries are reluctant to abandon the use of steel wire tape armours. The outer protective sheath is generally a PVC jacket. However PE sheathing is used in Germany.

The choice of XLPE or EPR is motivated by considerations on the capacity of withstanding an operating temperature as high as 90 °C. According to some authors this temperature enables the closest possible approach to an economic cross-section during operation. These insulating materials allow for occasional overloads with temperature increasing to 120 °C for some time and 250 °C on a conductor under short-circuit conditions. XLPE is more often used than EPR.

No significant development of insulating materials is at present foreseeable for either LV or MV. The only possibility is that of silane XLPE which is a variant of the usual peroxyde XLPE. The advantage of this new type of material would mainly apply to production equipment. Concerning the behaviour of silane or peroxyde XLPE further extensive study is required, particularly during operation, before an opinion can be given.

The risk of longitudinal propagation of water along the metal screen is being countered by use of flexible or elastic products or by use of a powder which swells in water. For the time being there is no development of watertight conductors. It is true that the use of sealing materials in this case would introduce new risks of material migration and expansion under the influence of heat and in addition the economic repercussions would be unfavorable.

Regarding accessories the trend is to simplification and ease of use by the development of:

— deep indent crimping connections;

— terminations using field grading devices;

— des extrémités utilisant des répartiteurs de champ ;
— des jonctions faisant appel à des matériaux préfabriqués moulés ou thermorétractables.

On a enfin examiné les essais à faire subir aux accessoires de câbles, soit pour leur mise au point en laboratoire, soit in situ après leur mise en service. Dans le premier cas, des essais de vieillissement avec cycles thermiques et courts-circuits peuvent sembler très sévères mais permettent de garantir une bonne fiabilité en service, même en cas de montage défectueux. Pour les essais après pose, les méthodes à courant continu sont abandonnées dans les postes au profit de mesures du taux de décharges partielles.

5. Câbles et accessoires des réseaux haute tension et très haute tension.

5.1. Câbles haute et très haute tensions.

L'utilisation de câbles à isolant synthétique est maintenant largement développée dans de nombreux pays jusqu'aux hautes tensions.

Au Japon, des câbles synthétiques 66 kV sont largement utilisés depuis 1971, des câbles 154 et 275 kV commencent à être utilisés et des câbles 500 kV sont en essai.

En France, des câbles thermoplastiques sont employés en 63 et 90 kV depuis 1961 et en 225 kV depuis 1969. Le niveau 400 kV a été atteint et sera développé industriellement en 1985.

En Suisse et en Suède, des câbles à isolant EPR et PR sont largement utilisés jusqu'à 150 kV.

Jusqu'à maintenant ces câbles n'ont pas posé de problèmes.

La nature de l'enveloppe isolante varie d'un pays à l'autre : le PR est le matériau le plus largement employé jusqu'à 150 kV. Au-delà on utilise depuis 1969 le polyéthylène basse densité (PEBD) et plus récemment le polyéthylène haute densité (PEHD). Le développement du PR en 275 kV commence.

L'EPR est utilisé par certains fabricants de câbles jusqu'à 150 kV en raison de ses propriétés spécifiques : flexibilité, bonne résistance aux décharges partielles et à la température. Le niveau de tension maximal envisageable sera toutefois limité par les pertes diélectriques (225 kV ?).

Les câbles très haute tension actuels comportent généralement un écran étanche à l'eau. D'après une intervention, cette étanchéité n'est peut être pas essentielle car le comportement de câbles à isolant PR âgés sans gaine étanche a été trouvé correct.

5.2. Accessoires pour câbles haute tension.

La fabrication des accessoires, notamment des jonctions, semble une tâche difficile. Apparemment le problème est résolu jusqu'à 225 kV pour le polyéthylène (850 jonctions en service) et jusqu'à 150 kV pour le PR (100 jonctions en service) et l'EPR.

En ce qui concerne les boîtes d'extrémité, un système original combinant les avantages d'une couche à résistance non linéaire avec ceux de couches de permittivité élevée a été présenté. La couche résistante, qui conviendrait très

— joints resorting to prefabricated molded or shrinkable materials.

Finally the tests applying to cable accessories were discussed both from a point of view of laboratory design or for in situ testing following commissioning. In the first case ageing tests with short-circuit and thermal cycles may seem extremely rigorous; however they guarantee reliability even when assembly is incorrect. As regards after laying tests DC methods have been rejected in substations in favor of partial discharge measurements.

5. High voltage cables and accessories.

5.1. High voltage cables.

The use of polymer insulated cables is now common in many countries even for high voltages.

In Japan 66 kV polymer insulated cables have been widely used since 1971, 154 and 275 kV cables are starting to be used and 500 kV cables are being tested.

In France thermoplastic cables have been used at 63 kV and 90 kV since 1961 and at 225 kV since 1969. The 400 kV level has been reached and will be developed industrially in 1985.

In Switzerland and Sweden EPR and XLPE insulated cables are widely used up to 150 kV.

These cables have caused no problems up to now.

The type of insulation varies from one country to another: XLPE is the most widely used material up to 150 kV. Above this voltage LDPE has been used since 1969 and more recently HDPE has been used. The development of XLPE at 275 kV is starting.

EPR is used by certain cable manufacturers up to 150 kV owing to its specific properties: flexibility, good resistance to partial discharges and to temperature. The maximum permissible voltage level is however limited by dielectric losses (225 kV ?).

The present very high voltage cables normally include a watertight screen. Following one contribution, this watertightness is perhaps not essential since the behaviour of old cables without impervious jackets seems correct.

5.2. HV cable accessories.

The manufacture of accessories and in particular joints is a difficult process. Apparently the problem has been solved up to 225 kV for polyethylene (850 joints in service) and up to 150 kV for XLPE (100 joints in service) and EPR.

Insofar as concerns the termination boxes, a new system combining the advantages of a non-linear resistance type layer with those of high permittivity levels was presented. The resistant layer which is highly suitable for medium

bien aux tensions moyennes, serait parcourue en haute tension par un courant trop intense de nature à provoquer une instabilité thermique. La répartition capacitive introduite par les couches à forte permittivité régularise la répartition du potentiel en limitant le courant dans la partie résistive. La discussion a fait apparaître que ce progrès se traduit par la disparition du risque d'instabilité thermique.

Après avoir rappelé les résultats obtenus en service sur un grand nombre de boîtes d'extrémité à déflecteurs en élastomère prémoulé à remplissage d'huile, un exposé a présenté les perfectionnements apportés aux cônes de contrainte visant à augmenter la marge de sécurité au montage et autorisant de légers glissements sur le câble sans affecter les performances. Les tolérances de serrage permettent de faire face aux variations habituelles du diamètre des câbles.

Une nouvelle génération d'extrémités 225 kV prémoulées en élastomères a été présentée. Le réglage de la pression du déflecteur sur le câble est assuré par une pièce de maintien isolante à ressorts. Cette extrémité a l'originalité de pouvoir fonctionner sous pression de 3,5 bars de SF₆, aussi bien avec porcelaine de type extérieur qu'en cellule blindée sans porcelaine.

Un exposé a fait le point des connaissances théoriques et expérimentales du dimensionnement des jonctions à permutation d'écran et précisé le dimensionnement énergétique des parafoudres suivant le type de montage adopté. Les calculs donnent des solutions précises de tenue aux chocs de foudre et de manœuvre.

Enfin un exposé a présenté l'état de l'art dans le domaine de l'essai après pose des liaisons de câbles à isolant synthétique, qui a pour objectif essentiel de vérifier la bonne exécution des accessoires. Les auteurs ont montré l'inefficacité des essais à courant continu, l'irréalisme des essais sous tension alternative — qui nécessitent des transformateurs ou des inductances de dimensions inutilisables en pratique — et l'intérêt d'utiliser des ondes oscillantes. Le vieillissement éventuel provoqué par ces ondes est à l'étude; ce programme devrait rapidement aboutir à un procédé de contrôle après pose efficace et de mise en œuvre aisée.

6. Câbles sous-marins.

Trois rapports ont été présentés dont deux portaient sur des câbles sous-marins moyenne tension et le troisième sur un câble haute tension à courant alternatif 138 kV destiné à une application dynamique en eau profonde.

En ce qui concerne les câbles moyenne tension, la discussion a porté sur les différences de conception :

- Pour les technologies non étanches présentées dans un rapport, il convient selon les auteurs de faire appel à un matériau à haute résistance aux arborescences dues à l'eau, en présence d'eau sous pression. De bonnes formulations d'EPR permettent d'atteindre cet objectif.
- L'autre rapport présentait un câble à isolant PR rendu étanche radialement par un écran métallique et longitudinalement par bourrage de l'âme conductrice à l'aide d'un matériau thermodurcissable à deux composants. Les essais

voltages, would be crossed at high voltage by too high a current causing thermal instability. The capacitive distribution introduced by high permittivity layers regularizes the potential distribution thus limiting the current in the resistive part. The discussion which followed showed that this feature would eliminate the risk of thermal instability.

After having recalled the results obtained in service conditions with a great number of oil field premolded elastomer stress grading device terminations a paper was given concerning the latest features incorporated in stress cones designed to increase the safety margin on assembly and permitting slight drifts on a cable without affecting performances. The tightening tolerances are designed to cope with the usual variations in cable diameter.

A new generation of 225 kV premolded elastomer terminations was presented. Adjustment of the deflector pressure on the cable is by means of a spring insulating piece. This termination has the advantage of operation at a pressure of 3.5 bars SF₆, both with external type porcelain and in metal clad cell, in this case without porcelain.

A paper was given concerning experimental and theoretical sizing of sheaths permutation joints and this paper indicated the power sizing of lightning arresters depending on the type of connections used. The calculations provide accurate solutions for lightning impulse and transient states due to switching operation and to faults.

Finally a paper was given concerning the state of the art in the field of after laying tests of cable links, the main aim of which is to check the correct execution of accessories. The authors showed the inefficiency of DC testing, the irrelevance of AC tests, which require transformers or inductors of a practically unusable size, and the advantage of using oscillating waves. The eventual ageing caused by these waves is being studied; this program should shortly result in an efficient after laying test procedure and easier use.

6. Submarine cables.

Three papers were given, two of which concerned MV submarine cables and the third a HV AC cable of 138 kV intended for dynamic application in deep water.

The discussion concerning medium voltage cables was based on the differences in design:

- *For nonwatertight technologies presented in one report the authors used a material which has a high resistance to water trees in the presence of water under pressure. Good EPR formulations make this an achievable aim.*
- *The other report concerned a XLPE insulated cable rendered watertight radially by a metal screen and longitudinally by filling of the conductor with a dual component thermohardening material. Watertightness tests on this cable have been carried out at a pressure of 20 bars.*

d'étanchéité de ce câble ont été effectués sous une pression de 20 bars.

Enfin un troisième rapport a décrit le dimensionnement, la fabrication et les essais d'un câble sous-marin 138 kV à isolant PR. Ce câble est destiné à relier une plate-forme OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) au continent par des fonds marins pouvant atteindre 1 500 à 2 000 m.

7. Câbles à comportement amélioré au feu.

La demande de câbles à comportement amélioré au feu a largement augmenté dans le monde entier. Une certaine unanimité existe en ce qui concerne les exigences fondamentales demandées à ces matériels :

- propagation limitée du feu ;
- formation limitée de fumées ;
- corrosivité réduite des gaz d'incendie ;
- toxicité réduite des gaz d'incendie.

Depuis 1975, de nombreux essais ont été imaginés afin de mieux connaître le comportement des câbles électriques vis-à-vis de l'incendie. L'expérience acquise à la suite des sinistres survenus dans des installations industrielles a montré la nécessité de mettre au point des essais plus représentatifs de la réalité et de prendre en compte d'autres paramètres tels que la constitution des nappes de câbles, l'opacité, la corrosivité et la toxicité des fumées dégagées. Ces essais, largement décrits au cours de la réunion, sont encore trop nombreux pour approcher une même réalité. Toutefois, un certain consensus apparaît en vue de favoriser une normalisation internationale, notamment dans le cas d'essais effectués sur nappes de câbles.

Les utilisateurs se trouvent cependant confrontés à la représentativité de ces essais face à la conception de leur installation et à la nécessité de mesurer leurs exigences par rapport aux risques encourus et au coût des installations.

Les constructeurs auront besoin d'essais simples, dits essais de routine à échelle réduite permettant de contrôler la qualité et l'homogénéité de leurs fabrications. Certains ont été présentés (indice limite d'oxygène, four CSTB...), mais dans ce domaine aussi le besoin d'une normalisation internationale apparaît.

Une nouvelle génération de câbles dits à « comportement amélioré au feu » a été mise au point. Les mélanges utilisés ne comportent pas d'halogènes et l'ignifugation est réalisée par une charge d'alumine trihydratée qui libère de l'eau sous l'action de la chaleur. Les résines de base utilisées sont des EPDM ou des copolymères EVA. Ces matériaux permettent de réduire très fortement l'opacité, la toxicité et la corrosivité des fumées dégagées lors de leur combustion. Toutefois, l'indice d'oxygène limite, qui peut être très élevé (supérieur à 40) à la température ambiante, diminue fortement au-delà de 250 °C en raison du dégagement de l'eau contenue dans la charge. Afin de remédier à l'insuffisance de tenue diélectrique de ce type de mélange, les isolations de câbles peuvent être réalisées selon la technique de la double couche, la sous-couche étant constituée de matériaux ayant de bonnes propriétés électriques telles que le polyéthylène réticulé.

Ces nouveaux types de mélange peuvent être mis en œuvre selon plusieurs techniques : réticulation chimique

Finally a third report described the sizing, production and tests carried out on a 138 kV XLPE insulated submarine cable. This cable is intended to link an ocean thermal energy conversion (OTEC) platform to the main land across sea bed depths up to 1,500 to 2,000 m.

7. Cables with improved fire behaviour.

The demand for cables with improved fire behaviour has greatly increased throughout the world. There is a certain unanimity concerning the basic requirements for this type of material:

- limited fire propagation;
- limited smoke formulation;
- reduced corrosivity of fire gases;
- reduced toxicity of fire gases.

Various tests have been designed since 1975 in order to improve our knowledge on the behaviour of electrical cables with relation to fire. The experience acquired as a result of accidents occurring in industrial plants have shown the necessity to develop tests which reflect the real situation and take into account other parameters such as the composition of cable layers, the opacity, corrosivity and toxicity of the smoke released. These tests which were extensively described during the course of the meeting are still too numerous to be able to reflect the real situation. However a certain consensus appeared for international standardization at least for tests carried out on grouped cables.

The users are however faced with the problem of the representativity of these tests with respect to their installation and the need to measure their requirements according to the risks run and the cost of the installations.

Manufacturers will require simple tests or «reduced scale routine tests» in order to check the quality and homogeneity of their production. Some tests of this type were described (oxygen limit index, CSTB furnace, etc.), however the need for international standardization is becoming obvious in this field as well.

A new generation of cables known as «cables with improved fire behaviour» has been developed. The mixtures used do not include halogens and fire proofing is achieved by a trihydrated alumina filler which releases water under the action of heat. The basic resins used are EPDM or EVA copolymers. These materials enable a considerable reduction in opacity, toxicity and corrosivity of the smoke released during their combustion. However the limit oxygen index which may be very high (greater than 40) at ambient temperature falls off considerably beyond 250 °C because of the release of water contained in a filler. In order to overcome the poor dielectric strength of this type of mixture, cable insulation can be achieved using the double coating technique with the sublayers made up of materials with good electrical characteristics such as XLPE.

The new types of mixture can be implemented by means of several techniques: conventional chemical cross-linking, cross-linking by means of silanes, irradiation cross-

classique, réticulation par les silanes, réticulation par irradiation ou thermoplastiques non réticulés, chaque solution présentant des avantages et des inconvénients.

Le polyéthylène chlorosulfoné, matériau halogéné et soufré, permet aussi de résoudre les problèmes de certains utilisateurs grâce à l'amélioration apportée aux formulations pour obtenir une bonne résistance au feu en réduisant les dégagements de fumées et de gaz acides.

De nombreux essais comparatifs ont été effectués par des utilisateurs afin de tester la validité des solutions proposées. Les résultats obtenus, que ce soit sur les matériaux constitutifs, sur les câbles en essai de laboratoire ou sur les nappes de câbles en grandeur nature, ont montré que les câbles à « comportement amélioré au feu », en particulier ceux sans halogènes, apportaient une plus grande sécurité dans les installations électriques. Ces matériaux ont toutefois un prix de revient plus élevé.

Enfin, un sujet porteur d'avenir a été évoqué : la modélisation par ordinateur du comportement au feu d'installations complexes dont la représentativité n'est pas assurée aujourd'hui par les essais proposés. Cette action donnerait toute sa justification aux efforts entrepris pour définir un certain nombre d'essais normalisés au niveau international.

8. Présentation de matériels. Visites techniques.

Parallèlement aux conférences et discussions :

- une présentation de matériels (matériaux de base, câbles, accessoires, matériels de pose...) a été organisée dans le Palais des Congrès de Versailles ;
- une quinzaine de films, vidéo ou diaporamas sur des thèmes variés (matériaux, montage, pose...) ont été présentés.

Enfin, huit visites techniques ont permis aux délégués de découvrir des installations d'essais et des réalisations industrielles mettant en œuvre des câbles à isolant synthétique.

9. Atelier HT 84 : « Utilisation à haute température des câbles HT à isolant synthétique ».

L'emploi de certains matériaux synthétiques comme le polyéthylène réticulé peut inciter aujourd'hui à faire fonctionner les câbles HT à une température élevée, en régime permanent et en régime temporaire. Ceci pose un certain nombre de problèmes qui ont été examinés au cours de l'atelier organisé à Clamart les 8 et 9 mars 1984.

Soixante-dix experts de douze pays ont participé aux travaux de l'atelier HT 84.

9.1. Comportement des matériaux.

Une large discussion a porté sur le comportement des matériaux isolants avec la température :

- Au-delà de 90 - 100 °C, les isolants PR, chargés ou non, et EPR sont susceptibles de se déformer sous l'action de contraintes externes en raison de leurs modifications structurales. Dans le cas du PR, on observe une déformation résiduelle si la contrainte externe reste appliquée à l'isolant

linking or nonreticulated thermoplastics, each solution having advantages and disadvantages.

Chlorosulfonated polyethylene which is a halogenated material also overcomes certain user problems by improved formulations giving good fire resistance while reducing the release of fumes and acid gas.

Various comparative tests have been carried out by users in order to assess the validity of the solutions proposed. The results obtained whether on the component materials or on cables under laboratory test conditions or on full scale cable groups show that cables with improved fire behaviour, in particular those without halogens afford greater security of the electrical installations; the cost of these materials is higher.

Finally a future bearing topic was discussed: computer modelling of the fire behaviour of complex installations for which representativity cannot be assured using the tests available today. Modelling of this type would fully justify the efforts made towards a definition of a number of internationally standardized tests.

8. Equipment presentation. Technical visits.

In parallel with the conferences and discussions:

- a presentation of equipments (basic materials, cables, accessories, installation equipments) was given in the Palais des Congrès at Versailles;
- some fifteen films, videos or slide shows were given on various topics (materials, connection, installation, ...).

Finally eight technical visits enabled the delegates to familiarize themselves with test installations and industrial applications using polymer insulated cables.

9. Workshop HT 84: High temperature use of polymer insulated high voltage cables.

The use of certain synthetic materials such as XLPE may well lead certain users to operate HV cables at high temperature either continuously or temporarily. This sets a number of problems which were examined during the workshop held at Clamart on the 8th and 9th of March 1984.

Seventy experts from twelve countries took part in the work of workshop HT 84.

9.1. Behaviour of materials.

A broad discussion took place on the behaviour of insulating materials with respect to temperature:

- Both 90 to 100 °C EPR and XLPE insulating materials whether charged or not are likely to become deformed under the effects of external stresses producing structural modifications. In the case of XLPE residual deformation is observed if the external stress remains applied to insu-

pendant le refroidissement. Dans le cas de l'EPR, cette rémanence est très faible.

- En ce qui concerne la tenue diélectrique, les résultats présentés ont montré qu'il y avait une diminution très importante des performances du PR entre 20 °C et 90 - 100 °C, puis une stabilisation au-delà de 110 °C. Selon diverses interventions, ces évolutions sont expliquables par l'évolution de la structure du PR.

- L'évolution des caractéristiques des mélanges semi-conducteurs avec la température fut très controversée, tandis que le rôle de l'interface semi-conducteur isolant a été largement souligné.

9.2. Comportement des câbles.

Diverses lignes directrices se sont dégagées des discussions :

- Les caractéristiques diélectriques des câbles dépendent bien entendu de leur constitution et diffèrent ainsi sensiblement des résultats obtenus sur matériaux. Diverses interventions ont montré que :

- la tension de claquage en courant alternatif variait peu avec la température ;

- la tension de claquage en onde de choc de foudre décroissait avec la température avec accélération de cette décroissance vers 100 °C.

- Les comportements thermomécaniques radial et longitudinal ont été analysés :

- en raison de la très forte expansion du PR, un matelas souple doit être interposé entre l'enveloppe isolante et la gaine extérieure. Différentes solutions ont été présentées : écran semi-conducteur cannelé, matelas compressif... ;

- les contraintes thermomécaniques longitudinales importantes en régime de surcharge (quelques daN/mm² de section de l'âme conductrice) peuvent conduire à des efforts de compression latéraux dans les coudes ou dans les sections droites au niveau de flambages locaux de plusieurs centaines de daN (suivant la température et la section). Différents essais ont été proposés pour tenter d'étudier le comportement des câbles en simulant ces effets. L'essai thermomécanique proposé par le groupe de travail CIGRÉ 21.09 a fait notamment l'objet d'une discussion. Il a généralement été jugé intéressant, mais il devrait pouvoir être amélioré pour mieux simuler les contraintes latérales.

- Le phénomène de retrait longitudinal a également fait l'objet d'une discussion. Ce phénomène, aujourd'hui mieux compris et contrôlé, s'accroît au voisinage de la température de fusion cristalline de l'isolant. Le retrait intervient essentiellement au niveau des accessoires. Il doit donc y avoir compatibilité entre le retrait inévitable du câble et la technologie de l'accessoire associé.

Les accessoires, en particulier les jonctions, sont des points singuliers des liaisons dont les limites thermiques admissibles peuvent constituer des butées plus contraignantes que celles des câbles.

9.3. Comportement des câbles installés.

De l'échange d'informations concernant les contraintes d'installation et de fonctionnement, il ressort que peu d'études ont été entreprises sur le sujet. Deux expérimentations importantes ont toutefois montré qu'au-delà de

lating material throughout cooling. In the case of EPR this remanence is very low.

- As for dielectric strength the results showed that there was a considerable fall off in performances of XLPE between and 20 °C and 90 to 100 °C followed by stabilization above 110 °C. According to several delegates these changes can be explained by the evolution of the structure of XLPE.

- The changes in characteristics of semi-conductor mixtures with temperature was a very controversial subject while the semi-conductor / insulation interface part was stressed by many delegates.

9.2. Behaviour of cables.

Various guidelines emerged from the discussions:

- The dielectric characteristics of cables depend of course on their composition and differ considerably from the results obtained on materials. Various experiments showed that:

- the AC breakdown voltage varies little with temperature;

- the lightning impulse wave breakdown voltage decreases with temperature with acceleration of this decrease towards 100 °C.

- Radial and longitudinal thermomechanical behaviour was analyzed:

- owing to the high expansion of XLPE, a cushion must be inserted between the insulation and the outer jacket. Different solutions were proposed: ribbed semi-conductor screen, compressive mat, etc.;

- the high longitudinal thermomechanical stresses in the overload conditions (several daN/mm² of conductor cross-section) can lead to lateral compression stresses in curves or in straight sections resulting in local buckling of several hundreds of daN (depending on the temperature and the cross-section). Various tests were proposed with the aim of studying the behaviour of cables by simulating these effects. The thermomechanical test proposed by the CIGRE working group 21.09 was especially discussed. It was generally deemed to be interesting and was considered worthy of improvement with regard to simulation of lateral stresses.

- The longitudinal shrinkage phenomenon was also discussed. This phenomenon which is nowadays much better understood and controlled is accentuated around the crystalline melting point of the insulating material. The shrinkage phenomenon affects mainly the accessories. There must therefore be compatibility between the inevitable cable shrink and the associated accessory technology.

Accessories and in particular joints are specific points whose permissible thermal limits are obstacles which may well prove higher to overcome than those of the cables themselves.

9.3. Behaviour of installed cables.

From the exchange of information concerning installation and operating constraints it emerged that very few studies have been undertaken on the subject. Two important experiments have however shown that beyond

105 °C de sérieuses déformations apparaissent sur des câbles PR pouvant entraîner d'importantes détériorations (en particulier avec des câbles à écran métallique rubané).

Une température élevée de fonctionnement ou de surcharge nécessite des dispositifs de pose sophistiqués. Certaines solutions ont été présentées.

9.4. Problèmes d'exploitation.

Il a été admis de façon unanime qu'une température d'interface câble - environnement de 50 à 60 °C était une valeur limite supérieure au-delà de laquelle des phénomènes d'assèchement du sol peuvent apparaître.

Il a été confirmé qu'une meilleure utilisation des câbles passe par une connaissance plus précise de leur comportement en régime de surcharge. Un certain nombre d'utilisateurs ont fait état d'installations prototypes, contrôlées par ordinateur, permettant de connaître les possibilités de surcharge en temps réel.

9.5. Intérêt économique.

D'une manière générale, les calculs économiques ne peuvent prendre parfaitement en compte tous les éléments du problème. En particulier, ils ne prennent pas en compte le coût de l'indisponibilité qui résulterait d'une augmentation de température. Il ne faut donc pas vouloir en tirer de conclusions précises et définitives. Cependant, certains résultats de calcul montrent que l'exploitation de câbles à une température de régime permanent supérieure à 80 ou 90 °C n'est probablement pas économique dans la plupart des cas, comparativement à une augmentation de section de l'âme. Toutefois, une exploitation à plus haute température peut, dans des conditions particulières, s'avérer être économiquement justifiée.

La solution du doublement de la liaison, nettement plus coûteuse, offre cependant l'avantage d'améliorer la fiabilité du réseau.

9.6. Conclusion.

En conclusion, il n'apparaît pas que le vieillissement thermique des matériaux soit le phénomène limitatif de la température d'utilisation des câbles. Leur comportement thermomécanique et le coût des pertes interviennent en premier pour fixer la température maximale admissible. Les participants ont été très réservés, pour des raisons à la fois techniques et économiques, sur l'intérêt d'utiliser les câbles à haute température. Par exemple, dans le cas des câbles à isolant PR, des températures limites de 90 °C en régime permanent et de 105 °C en régime de surcharge ont été recommandées par la plupart des experts.

10. Jicable 87.

Jicable 84, première réunion internationale spécifiquement consacrée aux câbles à isolant synthétique, a proposé à 538 délégués une analyse assez complète des problèmes actuels posés par cette technique.

105 °C considerable deformation appears on XLPE cables which can lead to serious damage (in particular with metal strip type screened cables).

A high operating temperature or overload requires sophisticated installation devices. Certain solutions were described.

9.4. Operation problems.

It was generally agreed that a cable/environment interface temperature of 50 to 60 °C was an upper limit value beyond which ground drying phenomena might appear.

It was confirmed that improved use of cables was linked to a more accurate knowledge of their behaviour in the overload conditions. A number of users described computer controlled prototype installations indicating the overload possibilities in real time.

9.5. Economic benefits.

Generally speaking economic calculations cannot completely take into account all aspects of the problem. In particular they do not take into account the cost of the unavailability which would come about as a result of an increase in temperature. Accurate and final conclusions cannot therefore be expected. However certain results show that operation of cables at steady state temperature greater than 80 or 90 °C is probably not economic in most cases when compared with an increase in cross-section of the conductor. However operation at a higher temperature may in certain cases prove economically justified.

The solution of doubling the link which is much more costly does however offer the advantage of improving network reliability.

9.6. Conclusion.

In conclusion it does not appear that thermal ageing of materials is the controlling factor in the operational temperature of cables. Their thermomechanical behaviour and the cost of losses are the first considerations when defining the maximum permissible temperature. For example in the case of XLPE insulated cables limit temperatures of 90 °C at steady state operation and 105 °C at overload conditions were recommended by most of the experts.

10. Jicable 87.

Jicable 84 which was the first international meeting specifically devoted to polymer insulated cables offered 538 delegates a fairly complete review of the problems at present posed by this technique.

Les perspectives d'évolution et d'utilisation de ces câbles sont très larges et de nombreux participants à ces journées ont souhaité que cette manifestation soit à nouveau organisée dans l'avenir.

Afin de répondre à ce vœu, les organisateurs de Jicable envisagent une nouvelle réunion à Paris vers octobre 1987.

Rendez-vous donc à Jicable 87.

The future prospects for development and use of these cables are considerable and many delegates expressed a wish for another conference to be organized in the future.

In order to meet this request the organizers of Jicable are planning another meeting in Paris for October 1987.

Rendez-vous at Jicable 87.

Bibliographie.

[1] ARRIGHI (R.); Du papier imprégné aux isolants synthétiques dans les câbles d'énergie. JICABLE 84 - Exposé d'introduction, 18 pages (dans ce numéro).

[2] JICABLE 84; Journées d'études internationales sur les câbles d'énergie à isolant synthétique. Recueil des communications, 544 pages.

[3] Workshop HT 84; Synthèse des travaux. SEE, 8-9 mars 1984, 44 pages.