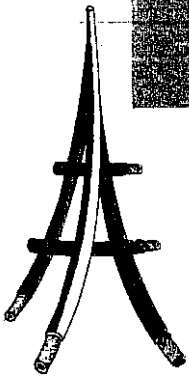




**société des electriciens  
et des electroniciens**

reconnue d'utilité publique par décret du 7 décembre 1986



**Seconde conférence internationale sur les câbles d'énergie à isolant synthétique**  
**Second international conference on polymer insulated power cables**

**Jicable 87**

**Paris-Versailles**  
**21-25 Septembre 1987**

**ATELIER**  
**HT 87**  
**WORKSHOP**

**ACCROISSEMENT DU CHAMP ÉLECTRIQUE DANS LES  
CABLES D'ENERGIE A ISOLANT  
SYNTHETIQUE SOUS TENSION ALTERNATIVE**

**INCREASED ELECTRIC FIELD IN AC POLYMER  
INSULATED POWER CABLES**

ATELIER  
HT 87  
WORKSHOP

ACCROISSEMENT DU CHAMP ELECTRIQUE DANS LES CABLES D'ENERGIE A  
ISOLANT SYNTHETIQUE SOUS TENSION ALTERNATIVE  
INCREASED ELECTRIC FIELD IN AC POLYMER INSULATED  
POWER CABLES

Compte-rendu des travaux de l'atelier tenu à CLAMART  
le jeudi 24 septembre 1987

Minutes of workshop discussions in CLAMART  
thursday september 24th 1987

*Texte bilingue*  
*Bilingual texte*

Comité d'organisation : Présidents : Christian MAYOUX  
Organising Committee : Chairmen Eugène FAVRIE

Secrétaire : Claude CAILLOT  
Secretary

Séance de travail : Président : Gilles BERNARD  
Chairman

Secrétaire : Eugène FAVRIE  
Secretary

Organisation et Synthèse établie par :

Organisation and summary by :

Mrs. CAILLOT & M. G. BERNARD, E. FAVRIE, C. MAYOUX, D. ROY, C. SIMON.

## THE WORKSHOP HT 87 :

The use of polymeric materials for the insulation of high voltage power cables has been accompanied by a trend towards greater service gradients either to improve optimisation or to achieve higher rated voltage levels.

A Workshop organised jointly by ELECTRICITE DE FRANCE, FILERGIE, LES CABLES DE LYON, SILEC, TREFICABLE-PIRELLI - under the aegis of the SOCIETE DES ELECTRICIENS ET DES ELECTRONICIENS - was attended by some 80 experts from 17 countries on Thursday September 24th, 1987. Views, the findings of theoretical and experimental research, the results of experience and operations were all exchanged on the following topic: What conditions govern increased electric field in AC polymer insulated power cables ?

This document comprises:

A - a list of participants

B - the questionnaire used to guide discussions

C - a summary of discussions

D - a detailed report of discussions :

0. Introduction

1. Materials

2. Cables

3. Design - Verification and testing

4. Accessories

5. Operating problems

6. Economic interest

7. Spontaneous contributions outside the questionnaire

8. Conclusion

## L'ATELIER HT 87 :

La mise en oeuvre des matériaux synthétiques pour l'isolation des câbles d'énergie à haute tension s'accompagne d'une tendance vers des gradients de service accrus, soit pour une meilleure optimisation, soit pour atteindre des tensions nominales plus élevées.

Un atelier, organisé conjointement par ELECTRICITE DE FRANCE, FILERGIE, LES CABLES DE LYON, SILEC, TREFICABLE-PIRELLI -sous le parrainage de la SOCIETE DES ELECTRICIENS ET ELECTRONICIENS -a réuni près de 80 experts de 17 pays le jeudi 24 septembre 1987 : Des idées, des résultats d'études théoriques et expérimentales, des résultats d'expérience et d'exploitation ont été échangés sur le thème : Quelles sont les conditions de l'accroissement du champ électrique dans les câbles d'énergie à isolant synthétique sous tension alternative ?

Ce document rassemble :

A - la liste des participants

B - le questionnaire qui a guidé les discussions

C - le résumé des discussions

D - le compte rendu détaillé des discussions :

0. Introduction

1. Les Matériaux

2. Les Câbles

3. Conception, Contrôles et essais

4. Les matériels de raccordement

5. Les problèmes d'exploitation

6. Intérêt économique

7. Contributions spontanées hors questionnaire

8. Conclusion

A. LIST OF WORKSHOP HI 87 PARTICIPANTS

<u>COUNTRY</u>	<u>PARTICIPANT</u>	<u>COMPANY</u>
AUSTRIA	MALIN	KABEL UND DRAHTWERKE
BRASIL	TARALLI	PIRELLI S.A. BRASILEIRA
CANADA	CRINE J.P. HIIVALA L.J. ORTON H.  SAINT ONGE Dr.	IREQ CANADA WIRE AND CABLE BC HYDRO AND POWER AUTHORITY RESEARCH AND DEVELOPMENT DEPARTMENT INSTITUT DE RECHERCHE D'HYDRO QUEBEC
DENMARK	POULSEN S.H.	NKT POWER CABLES
FRANCE	Mrs ALQUIE AUCLAIR H. AUCOURT C. BECKER BERNARD G. Mrs CAILLOT DEJEAN DESCHAMPS L. DORISON E. DRUOT Mrs FALLOU FAVRIE E. FILIPPINI J. JOCTEUR R. LAURENT C. LEPERS LEWINER J. MAYOUX MENGUY C. MIDOZ J. PARASIE PAULIN PORCHERON RIOT ROY SIMON C. TERRAMORSI TOUREILLE A.	ESPCI SILEC EDF CABLERIE DE LENS EDF EDF FILERGIE EDF EDF ATO-CHEM LCIE SILEC CNRS SILEC CNRS EDF ESPCI UNIVERSITE PAUL SABATIER LCIE TREFICABLE PIRELLI LES CABLES DE LYON LES CABLES DE LYON EDF EDF FILERGIE TREFICABLE PIRELLI TREFICABLE PIRELLI UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES
F.R.G.	SCHADLICH WANSER	KABELMETAL ELECTRO GMBH UNIVERSITAT HANNOVER

A. LISTE DES PARTICIPANTS A L'ATELIER HT 87

<u>PAYS</u>	<u>PARTICIPANT</u>	<u>SOCIETE</u>
AUTRICHE	MALIN	KABEL UND DRAHTWERKE
BRESIL	TARALLI	PIRELLI S.A BRASILEIRA
CANADA	CRINE J.P. HIIVALA L.J. ORTON H. SAINT ONGE Dr.	IREQ CANADA WIRE AND CABLE BC HYDRO AND POWER AUTHORITY INSTITUT DE RECHERCHE D'HYDRO QUEBEC
COREE	KOO JA-YOON	KOREA ADVANCED INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
DANEMARK	POULSEN S.H.	NKT POWER CABLES
ESPAGNE	BORRAS FIGUERAS T. MONTEYS J.	SAENGER SA. CONDUCT. ELECTRIC. ROQUE
FRANCE	Mme ALQUIE AUCLAIR H. AUCOURT C. BECKER BERNARD G. Mme CAILLOT DEJEAN DESCHAMPS L. DORISON E. DRUOT Mme FALLOU FAVRIE E. FILIPPINI J. JOCTEUR R. LAURENT C. LEPERS LEWINER J. MAYOUX MENGUY C. MIDOZ J. PARASIE PAULIN PORCHERON RIOT ROY SIMON C. TERRAMORSI TOUREILLE A.	ESPCI SILEC EDF CABLERIE DE LENS EDF EDF FILERGIE EDF EDF ATO-CHEM LCIE SILEC CNRS SILEC CNRS EDF ESPCI UNIVERSITE PAUL SABATIER LCIE TREFICABLE PIRELLI LES CABLES DE LYON LES CABLES DE LYON EDF EDF FILERGIE TREFICABLE PIRELLI TREFICABLE PIRELLI UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

<u>COUNTRY</u>	<u>PARTICIPANT</u>	<u>COMPANY</u>
ITALY	BERTANI FARNETTI F. MADARO METRA P. MOSCA W.	C.E.S.I. S.P.A. ENEL CENTRO DI RICERCA ELETTRICA CEAT CAVI CAVI PIRELLI C.E.S.I. S.P.A.
JAPAN	ASADA Y. HIROTSU K. INAMI MASAMI ISHIBASHI IWATA Z. KIMURA H. NAGASAKI SHOJI NISHINOMA SHINAGAWA SOMA KENICHIRO TAKEHAMA HAGIME YATSUKA K.	FURUKAWA ELECTRIC CO. LTD. SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES MITSUBISHI CABLE INDUSTRIES CO. LTD. TOKYO ELECTRIC POWER CO. FURUKAWA ELECTRIC CO. LTD. FURUKAWA ELECTRIC CO. LTD. SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES FUJIKURA LTD. SHOWA ELECTRIC WIRE & CABLE CO. LTD. HITACHI CABLE LTD. FUJIKURA LTD. SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES
KOREA	KOO JA-YOON	KOREA ADVANCED INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
MEXICO	CANDELARIO C.	CONDUCTORES MONTERREY S.A.
NORWAY	BALOG G.	S.T.K.
THE NEDERLAND	LEUFKENS M. STEENNIS	N K F KABEL B.V. KEMA
SPAIN	BORRAS FIGUERAS T. MONTEYS J.	SAENGER SA. CONDUCT. ELECTRIC. ROQUE
SWEDEN	DELLBY BJORN FARKAS ANDREAS	ASEA KABEL AB NESTE POLYETHENE AB
SWITZERLAND	BIASINTTI G. BLANC J.M. MATEY G. SCHMIDT B.R. SCHWARZ WAVRE J.J.	DATWYLER A.G. CABLERIES ET TREFILERIES DE COSSONAY BP CHEMICALS SA CABLERIES ET TREFILERIES DE COSSONAY CABLERIE DE BRUGG CABLES CORTAILLOD SA
UNITED KINGDOM	GREGORY B. MARSH PAPADOPULOS M.S. ROSEVEAR WILLIAMS	BICC POWER CABLES LTD. BICC POWER CABLES LTD. THE ELECTRICITY COUNCIL ENGINEERING PIRELLI GENERAL PLC. CEGB
U.S.A	BARLOW MORAN JAMES A. SAMM RALPH W. UMPLEBY ZENGER	USI CHEMICALS NOKIA ENGINEERING EPRI ELECTRICAL SYSTEMS DIVISION UNION CARBIDE CORPORATION CABLEC CO.

<u>PAYS</u>	<u>PARTICIPANT</u>	<u>SOCIETE</u>
GRANDE BRETAGNE	GREGORY B. MARSH PAPADOPULOS M.S. ROSEVEAR WILLIAMS	BICC POWER CABLES LTD. BICC POWER CABLES LTD. THE ELECTRICITY COUNCIL ENGINEERING PIRELLI GENERAL PLC. CEGB
ITALIE	BERTANI FARNETI F. MADARO METRA P. MOSCA W.	C.E.S.I. S.P.A. ENEL CENTRO DI RICERCA ELETTRICA CEAT CAVI CAVI PIRELLI C.E.S.I. S.P.A.
JAPON	ASADA Y. HIROTSU K. INAMI MASAMI ISHIBASHI IWATA Z. KIMURA H. NAGASAKI SHOJI NISHINOMA SHINAGAWA SOMA KENICHIRO TAKEHAMA HAGIME YATSUKA K.	FURUKAWA ELECTRIC CO. LTD. SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES MITSUBISHI CABLE INDUSTRIES CO. LTD. TOKYO ELECTRIC POWER CO. FURUKAWA ELECTRIC CO. LTD. FURUKAWA ELECTRIC CO. LTD. SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES FUJIKURA LTD. SHOWA ELECTRIC WIRE & CABLE CO. LTD. HITACHI CABLE LTD. FUJIKURA LTD. SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES
MEXIQUE	CANDELARIO C.	CONDUCTORES MONTERREY S.A.
NORVEGE	BALOG G.	S.T.K.
PAYS-BAS	LEUFKENS M. STEENNIS	N K F KABEL B.V. KEMA
R.F.A.	SCHADLICH WANSER	KABELMETAL ELECTRO GMBH UNIVERSITAT HANNOVER
SUEDE	DELLBY BJORN FARKAS ANDREAS	ASEA KABEL AB NESTE POLYETHENE AB
SUISSE	BIASINTTI G. BLANC J.M. MATEY G. SCHMIDT B.R. SCHWARZ WAVRE J.J.	DATWYLER A.G. CABLERIES ET TREFILERIES DE COSSONAY BP CHEMICALS SA CABLERIES ET TREFILERIES DE COSSONAY CABLERIE DE BRUGG CABLES CORTAILLOD SA
U.S.A	BARLOW MORAN JAMES A. SAMM RALPH W. UMPLEBY ZENGER	USI CHEMICALS NOKIA ENGINEERING EPRI ELECTRICAL SYSTEMS DIVISION UNION CARBIDE CORPORATION CABLEC CO.



## B. QUESTIONNAIRE

### 0. INTRODUCTION

According to our previous survey the materials concerned by the workshop are the following :

- \* low density polyethylene (LDPE)
- \* high density polyethylene (HDPE)
- \* crosslinked polyethylene (XLPE)
- \* ethylene propylene rubber (EPR)

The fields will be considered as high when :

$$G_{\text{Max}} \geq 8 \text{ kV} \times \text{mm}^{-1} \text{ for high rated voltages } (\leq 150 \text{ kV})$$

$$G_{\text{Max}} \geq 12 \text{ kV} \times \text{mm}^{-1} \text{ for extra high voltages } (\geq 150 \text{ kV})$$

Whatever the material, an effort will be done to show the connection between the  $G_{\text{Max}}$  limitation and the existence of impurities or heterogeneities to be defined.

According to the concerned scope the questions we wish to debate are the following :

#### 1 - Materials

- 1.1 What are the characteristics of raw resins ?  
(chemical formula, molecular weight, crystallinity, manufacturing process, catalytic residues...)  
Methods of characterization ?  
Nature of treatment before use ?
- 1.2 What are the associated products to these resins and the reasons for these associations ?
- 1.3 What is the role of impurities and heterogeneities, previously defined, in the limitation of gradients ?  
(Definition of impurities and inhomogeneities, required treatment and preconditioning of the materials...)

ACCROISSEMENT DU CHAMP ELECTRIQUE DANS LES CABLES D'ENERGIE

A ISOLANT SYNTHETIQUE SOUS TENSION ALTERNATIVE

INTRODUCTION

A l'issue de notre précédente enquête il apparaît que les matériaux concernés par l'atelier sont :

- \* le polyéthylène basse densité (PEBD)
- \* le polyéthylène haute densité (PEHD)
- \* le polyéthylène réticulé (PR)
- \* le caoutchouc d'éthylène propylène (EPR)

On considérera que les champs sont élevés lorsque :

$$G_{\text{Max}} \geq 8 \text{ kV mm}^{-1} \text{ pour la haute tension } (\leq 150 \text{ kV})$$

$$G_{\text{Max}} \geq 12 \text{ kV mm}^{-1} \text{ pour la très haute tension } (\geq 150 \text{ kV})$$

On s'efforcera de montrer qu'il existe quel que soit le matériau, un lien entre la limitation de  $G_{\text{Max}}$  et la présence d'impuretés ou d'hétérogénéités que l'on définira.

Selon le domaine concerné les questions que l'on souhaite alors débattre sont les suivantes :

1 - Les matériaux

- 1.1 Quelles sont les caractéristiques des résines de base ?  
(formulation chimique, poids moléculaire, cristallinité, procédés de fabrication, résidus catalytiques...)  
Comment peut-on caractériser ces matériaux ?  
Nature du traitement avant l'utilisation ?
- 1.2 Quels sont les produits associés à ces résines et pour quelles raisons ? (charges, additifs, antioxydants...)  
Quelles doivent être leurs caractéristiques ?  
(Solubilité, diffusivité, compatibilité...)
- 1.3 Dans la limitation des gradients, quel est le rôle des impuretés et des hétérogénéités des matériaux définis précédemment ?  
(Définition des impuretés et des hétérogénéités, traitement et pré-conditionnement des matériaux nécessaires)

1.4 What must be the characteristics of the interfaces between the insulation and the semi-conducting layers for envisaging an increase of the gradient ?

- \* Nature of semi-conducting materials
- \* Electrical characteristics of the semi-conducting materials
- \* Treatment of semi-conducting materials before extrusion
- \* Water content of the semi-conducting materials
- \* Degree of impurities in the semi-conducting layers
- \* Adherence quality between the insulation and the semi-conducting layers
- \* Surface state of the semi-conducting layers and possible adoption of an emission shield etc...

## 2 - Cables

2.1 What is the influence of the conductor structure (stranded, milliken, compacted conductor, conductor with trapezoidal wires, etc...) and of its possible tightness on the ability to operate at high gradients ?

2.2 According to your own experience how do you plan the extrusion line allowing to reach the highest gradient ?  
(Material treatment on line, filtration, arrangement of extruders...)

2.3 What do you recommend to treat the core ?  
(Crosslinking process, cooling, post-treatment...)

## 3 - Design, control and tests

3.1 What is the statistical concept giving the best estimate of the cable's ability to work at high gradient ? (e.g. : Weibull law, or others...)

What are the parameters used and their determination method ?

3.2 Is it necessary to take into account the reliability parameters in order to fit the insulation thickness with regard to the conductor diameter ?

3.3 Is the impulse voltage strength a limiting factor ?

3.4 How do you plan the control on line of a cable with a high operating gradient ?

3.5 How do you plan the defect elimination tests to ensure the cable's reliability without endangering its life duration ?

3.6 Is an after-laying test necessary ? How to perform it ?

1.4 Quelles doivent être les caractéristiques des interfaces isolant - semi-conducteur pour envisager une augmentation du gradient ?

- \* Nature des matériaux semi-conducteurs
- \* Caractéristiques électriques des matériaux semi-conducteurs
- \* Traitements des semi-conducteurs avant extrusion
- \* Teneur en eau des semi-conducteurs
- \* Taux d'impuretés des couches semi-conductrices
- \* Qualité de l'adhérence isolant - semi-conducteur
- \* Etat de surface des semi-conducteurs et adoption éventuelle d'une couche d'émission
- \* Etc...

2 - Les câbles

2.1 Quelle est l'influence de la structure de l'âme du câble (âme câblée, segmentée, rétreinte, à pavés, etc.) et de son étanchéité éventuelle sur les possibilités de travailler à fort gradient ?

2.2 Compte-tenu de votre expérience, comment concevez-vous la ligne d'extrusion permettant d'atteindre le gradient le plus élevé ?  
(Traitement du matériau en ligne, filtration, disposition des extrudeuses...)

2.3 Quel traitement du conducteur isolé préconisez-vous ?  
(Procédé de réticulation, refroidissement, post-traitement...)

3 - Conception, contrôles et essais

3.1 A partir de quel concept statistique peut-on estimer qu'un câble peut fonctionner à gradient élevé? (ex : Loi de Weibull, autres lois...)

Quels sont les paramètres utilisés et leur méthode de détermination ?

3.2 Faut-il tenir compte des paramètres de fiabilité pour ajuster les épaisseurs d'isolation en fonction des diamètres de l'âme du câble ?

3.3 La tenue aux ondes de choc est-elle un facteur limitatif ?

3.4 Comment concevez-vous les contrôles en ligne d'un câble à fort gradient de fonctionnement ?

3.5 Comment concevez-vous les essais de déverminage pour s'assurer de la fiabilité du câble sans mettre en cause sa durée de vie ?

3.6 Un essai après pose est-il nécessaire ? Comment le réaliser ?

#### 4 - Accessories

- 4.1 What are the accessories technologies suitable for operation under high gradient ?
- 4.2 How do you envisage the mounting of the accessories ?
- 4.3 How do you plan the type tests and control test ?

#### 5 - Operation problems

The increase of the operating field strength is a normal evolution for extra high voltage systems, it is the reason why the following questions are put forward. The possibility to apply high electrical fields will also be considered for lower voltages, drawing up the most specific difficulties.

- \* Higher capacitive current (critical length)
- \* Increasing dielectric losses
- \* Consequences on the thermal behaviour of the cables ;  
Effects on cable components and the ground (under normal load and short-circuit conditions).
- \* Vulnerability of the cable to mechanical stresses during laying and operating.

#### 6 - Economical interest

- 6.1 Do the present operating gradients correspond to the economical optimum ?
- 6.2 How an increase in gradient could involve the cost reduction of the installed cable systems ?  
(Costs of : cable, accessories, transportation and installation, operating).
- 6.3 Do you think there is a market for insulated cables for rated voltages equal and over 375 kV ?

#### 4 - Les matériels de raccordement

4.1 Quelles sont les technologies d'accessoires adaptées à un fonctionnement sous gradient élevé ?

4.2 Comment envisagez-vous la mise en oeuvre de ces accessoires ?

4.3 Concevez-vous les essais de type et de contrôle ?

#### 5 - Les problèmes d'exploitation

L'accroissement du gradient de tension de service est une évolution naturelle pour les liaisons très hautes tensions ; c'est dans cet objectif que l'on évoquera les questions suivantes. On considèrera aussi la possibilité de mettre en oeuvre des champs élevés pour des tensions inférieures, en dégageant les problèmes les plus spécifiques qui en résultent.

\* Courant capacitif plus élevé (longueur critique).

\* Accroissement des pertes diélectriques.

\* Conséquences sur les régimes thermiques des câbles ; effets sur les constituants et le sol (en charge normale et en court-circuit).

\* Vulnérabilité du câble aux sollicitations mécaniques de la pose et de l'exploitation.

#### 6 - Intérêt économique

6.1 Les gradients de service actuels correspondent-ils à un optimum économique ?

6.2 Comment un accroissement des gradients pourrait-il entraîner la réduction du coût des liaisons posées ?  
(Coût du câble - coût des accessoires - coût du transport et de la pose - coût de l'exploitation).

6.3 Existe-t-il un marché pour les câbles isolés de tensions nominales supérieures ou égales à 375 kV ?

SUMMARY

1. MATERIALS

The choice of materials result from a compromise between crystallinity which improves the dielectric strength, and some other characteristics such as the coefficients of diffusion of additives, the ease of processing, etc...

The material properties have to be kept constant within the whole thickness and length of the cables. Besides impurities in the insulation, the diffusion of ionic impurities stemming from the semiconducting materials resistivity does not appear to be a sensitive parameter.

2. CABLES

The conductor construction does not arise important problems concerning high working gradient. In case of segmented conductors, binding of the conductor with a semi-conducting tape offers an efficient solution to keep the segments in position.

For the elimination of impurities, the use of filters is much easier in case of thermoplastic materials than in case of cross-linked materials.

Cooperation between suppliers of raw materials and cable manufacturers is excellent and in some countries, Quality Assurance leads certain manufacturers to envisage a limited filtration at the level of insulation extruders. Japan in particular, explained its doctrine which consists in implementing contaminant-free basic materials.

## C. RESUME DES DISCUSSIONS DE L'ATELIER HT 87

### 1. MATERIAUX

Le choix du matériau résulte d'un compromis entre la cristallinité qui améliore la rigidité diélectrique et certaines caractéristiques comme les coefficients de diffusion des additifs, la facilité de mise en oeuvre, etc...

Il faut arriver à conserver une constance des propriétés du matériau dans l'épaisseur de l'isolant et sur toute la longueur des câbles. En plus des impuretés dans l'isolant, la diffusion d'impuretés ioniques provenant des semi-conducteurs peut être déterminante.

La valeur de la résistivité des semi-conducteurs ne semble pas être un paramètre sensible.

### 2. CABLES

La structure de l'âme ne semble pas poser de problèmes importants sur les possibilités de travailler à fort gradient. Pour les âmes segmentées, un frettage du conducteur par un ruban semi-conducteur constitue une solution efficace pour maintenir les différents segments.

Pour l'élimination des impuretés l'utilisation de filtres est beaucoup plus facile pour les matériaux thermoplastiques que pour les matériaux réticulés.

La coopération entre fournisseurs de matières premières et fabricants de câbles est excellente et même, dans certains pays, l'introduction de l'Assurance Qualité conduit certains constructeurs à envisager une filtration réduite au niveau des extrudeuses d'isolation. Le Japon, en particulier, a expliqué sa doctrine qui consiste à mettre en oeuvre des matériaux de base sans contaminant.



### 3. TESTS AND DESIGN

Weibull's distribution seems to be well admitted for routine tests but seldom used in the design of cables or in the choice of materials.

The voltage impulse withstand is a limiting factor for XLPE ; but it might be due to the testing temperature. D.C. voltage application is not recommended for test after laying ; new testing methods seem to come up from CIGRE.

### 4. ACCESSORIES

For a utilisation at high voltage gradients, only the techniques of moulded and prefabricated accessories are recommended.

The prefabricated equipments are conceivable for gradients at the cable's external shield of 5 kV/mm for the joints and of 6 kV/mm for the terminations.

### 5. OPERATIONAL PROBLEMS

There are no major obstacles for adopting high service voltage gradients ; it can be noted that the increase in the capacitive current may lead to an enlargement of the compensation means.

### 6. ECONOMIC INTEREST

There is no absolute justification to increase the service voltage gradients.

This increase of gradients is rather brought about by the search for higher operating voltages.

-----

### 3. ESSAIS ET CONCEPTION

La distribution de Weibull semble bien admise pour les essais de série mais peu utilisée au niveau de la conception des câbles ou du choix des matériaux.

La tenue aux ondes de choc est un facteur limitatif pour le PRC, mais peut-être est-ce dû à la température d'essai ? Pour les essais après pose le courant continu n'est pas recommandé et de nouvelles méthodes d'essais semblent pouvoir être mises au point dans le cadre de la CIGRE.

### 4. MATERIELS DE RACCORDEMENT

Pour une utilisation à forts gradients seules les techniques d'accessoires moulés ou préfabriqués sont recommandées.

Les matériels préfabriqués sont concevables pour des gradients au niveau de l'écran externe du câble de 5 kV/mm pour les jonctions et de 6 kV/mm pour les extrémités.

### 5. PROBLEMES D'EXPLOITATION

Il n'y a pas d'obstacles majeurs à adopter de forts gradients en exploitation ; on peut noter que l'augmentation du courant capacitif pourrait conduire à un accroissement des moyens de compensation.

### 6. INTERET ECONOMIQUE

Il n'y a pas de justification absolue d'augmenter les gradients de service.

Cet accroissement des gradients est plutôt amené par la recherche de tensions de service plus élevées.

-----

## WORKSHOP HT 87

### D. MINUTES OF DISCUSSIONS

#### INTRODUCTION

Given the current state of the art, manufacturers' knowhow and the findings of research workers, the question is whether it is feasible to produce or to use power transmission polymeric cables for high voltage gradients.

The Scientific Committee, which organised the HV-87 Workshop of high electric fields hoped there would be a free-rolling discussion on this subject plus the presentation of recent results. It was only possible to derive full benefit from these discussions if the essential topics had been suitably prepared. For this reason, full account had been taken of a questionnaire (the details of which are appended), a prior survey with manufacturers and the state of the art.

We should first recall that the values of gradients currently being used in the three principal voltage ranges are :

- 4- 6 kV/mm<sup>-1</sup> for U between 60 and 110 kV
- 8-12 kV/mm<sup>-1</sup> for U between 120 and 245 kV
- 12-15 kV/mm<sup>-1</sup> for U greater than 300 kV

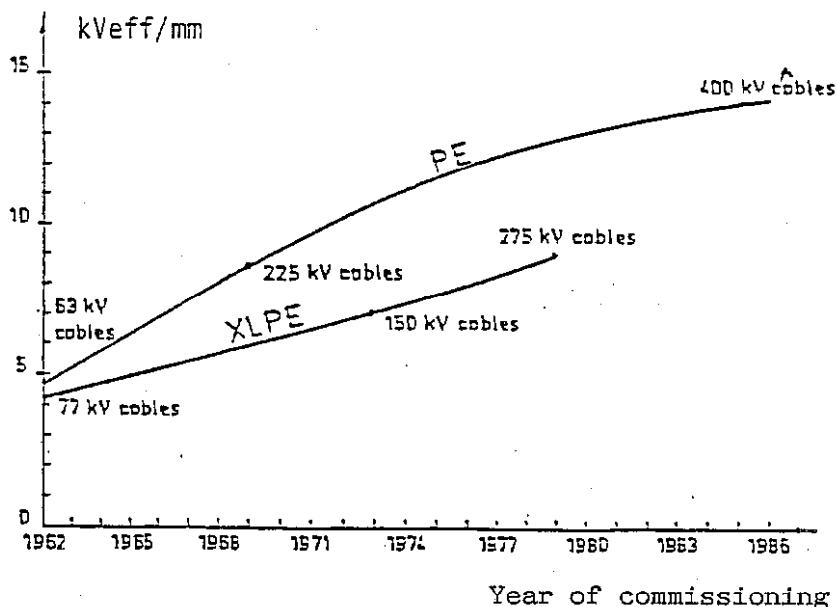


Figure 0 : PE and XLPE HV cables. Increase of permissible voltage gradients by year of commissioning.

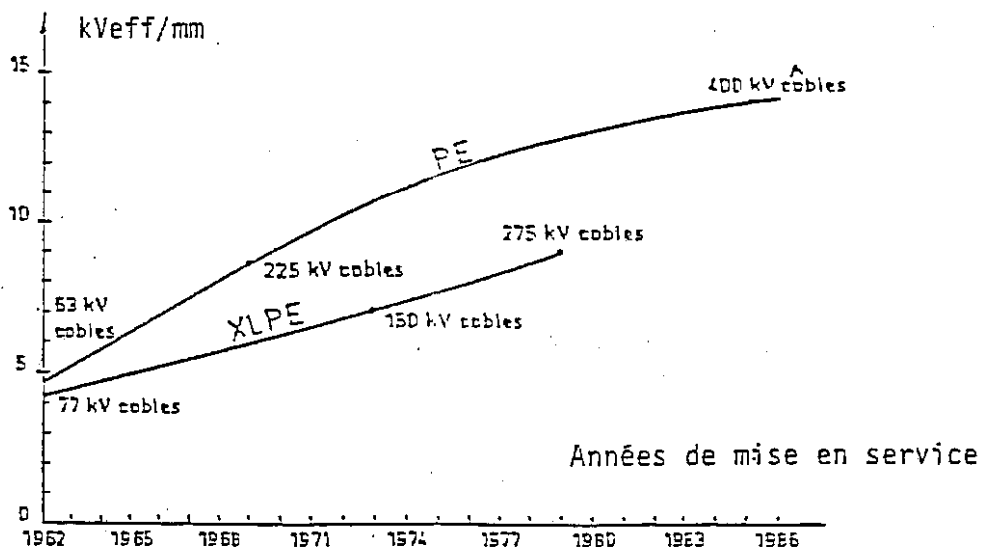
## O. INTRODUCTION

L'état actuel de la technologie, le savoir faire des constructeurs, l'état des connaissances des chercheurs permettent de se demander si l'on peut envisager de fabriquer ou d'utiliser des câbles de transport d'énergie à isolation synthétique pour des gradients de tension élevés.

Le Comité Scientifique organisateur de l'atelier HT-87 sur les champs électriques élevés souhaitait, autour de ce thème, une discussion très libre ainsi qu'une présentation de résultats récents. Cette discussion ne pouvait porter ses fruits, dans le laps de temps d'une seule journée, que si un canevas était préalablement tressé autour de sujets essentiels. C'est la raison pour laquelle une enquête préalable par questionnaire auprès des industriels, ainsi que l'état de l'art ont été pris en compte.

Nous rappelons en effet que les valeurs des gradients actuellement pratiqués dans les trois principales gammes de tension sont :

- \* 4 - 6 kV. mm<sup>-1</sup> pour U compris entre 60 et 110 kV
- \* 8 -10 kV. mm<sup>-1</sup> pour U compris entre 120 et 245 kV
- \* 12-15 kV. mm<sup>-1</sup> pour U supérieur à 300 kV.



**Figure 0** : Câbles haute tension au PE et au PRC. Evolution des gradients de tension admissibles en fonction des années de mise en service.

Moreover, the graph below shows the dynamics of the commissioning of cables between 1962 and 1985, taking account of the maximum possible gradient. It will be noted that over this period, the value rose from 4.5 kV mm<sup>-1</sup> to 13 kV mm<sup>-1</sup> for polyethylene and from 4 kV mm<sup>-1</sup> to 8 kV mm<sup>-1</sup> for PRC.

Analysis of the survey submitted to experts revealed in particular that the limiting factors for the increase of the maximum gradient (G<sub>max</sub>) were :

- \* the dielectric characteristics of the materials used, both with AC and impulse voltage.
- \* impurities of various origins, the term being used in the broadest sense.
- \* cable and accessory interfaces.

The survey also showed that there is a definite range of maximum gradients despite the fact that the experience of the experts questioned was not of the same level, making comparisons difficult.

The mention of these parameters led to a broader discussion on the main topics of the workshop, as follows :

- \* materials
- \* cables
- \* design, verification and testing
- \* connecting equipment
- \* operating problems
- \* economic benefits.

The inclusion of the last topic in the HV-87 Workshop discussions shows that producers of power transmission polymeric cables are prepared to make technological progress while remaining vigilant as to the economic benefits provided.

The following is a report of the main points discussed on each subject, the summary being based on written documents, notes and recordings taken at the time.

## 1. MATERIALS

### 1.1 Characteristics of base resins

The first statement was made by H.KIMURA (J) who stressed that in Japan cross-linked polyethylene was used for its thermal qualities, the base resin being low density polyethylene (LDPE). The structure of this resin is defined jointly by the cable manufacturer and the resin manufacturer, the essential criteria being : extrudability and cross-linking characteristics. Thanks to this cooperation, special efforts were possible to minimise the presence of foreign bodies in order to improve electrical properties.

Par ailleurs, le graphique ci-dessous permet de constater quelle a été la dynamique de la mise en oeuvre des câbles entre 1962 et 1985, en tenant compte du gradient maximum possible. On note ainsi dans cette période de temps, un passage de  $4,5 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$  à  $13 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$  pour le polyéthylène et de  $4 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$  à  $8 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$  pour le polyéthylène réticulé.

L'analyse de l'enquête qui avait été proposée aux experts révèle en particulier que les facteurs limitatifs pour l'augmentation du gradient maximum (Gmax) sont :

- \* les caractéristiques diélectriques des matériaux utilisés, tant sous tension alternative que sous tension de choc,
- \* les impuretés de diverses origines, ce terme prenant son sens le plus large,
- \* les interfaces dans les câbles et les accessoires.

L'enquête a bien montré qu'une gamme de gradients maximums bien définis se dégage, bien que l'expérience des experts interrogés ne soit pas du même niveau, ce qui rend les comparaisons plus difficiles.

L'évocation de ces quelques paramètres a permis d'engendrer un débat plus large sur les grands thèmes de l'atelier qui étaient :

- \* les matériaux,
- \* les câbles,
- \* la conception, les contrôles et les essais,
- \* les matériels de raccordement,
- \* les problèmes d'exploitation,
- \* l'intérêt économique.

La présence du dernier thème dans les discussions de l'atelier HT-87 montre que les constructeurs de câbles de transport d'énergie à isolation synthétique sont prêts à faire progresser leur technologie en gardant le souci de l'intérêt économique de ce progrès.

Le texte qui suit rapporte l'essentiel des échanges qui se sont établis sur chaque sujet, la synthèse ayant été réalisée à partir des textes écrits, des notes et des enregistrements réalisés durant cette journée.

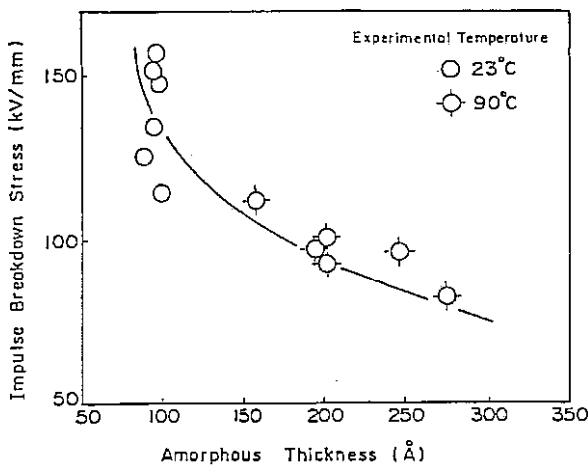
## 1. LES MATERIAUX

### 1.1. Caractérisation des résines de base

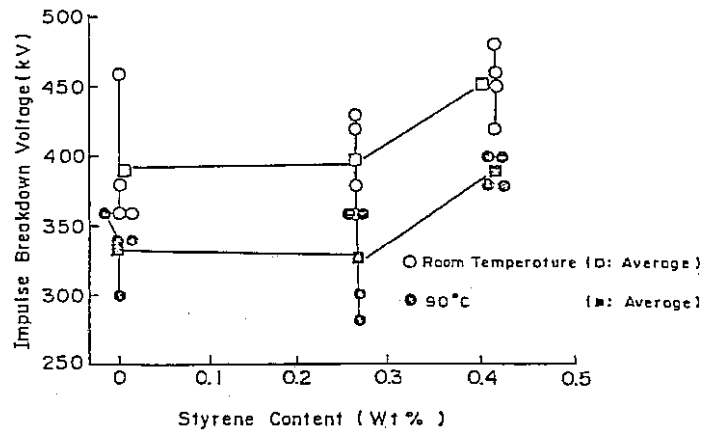
La première intervention est faite par H. KIMURA (J) qui souligne qu'au Japon le polyéthylène réticulé est utilisé à cause de ses qualités thermiques, la résine de base étant un polyéthylène basse densité (PEBD). La structure de cette dernière est définie conjointement par le constructeur de câble et le fabricant de résine, les critères essentiels étant : la faculté d'extrusion et la réticulation. Cette concertation a permis qu'un effort tout particulier soit fait pour minimiser la présence de matières étrangères afin d'améliorer les propriétés électriques.

In this way, for an LDPE with a density ranging from .920 to .925 g.cm<sup>-3</sup>, permissible impurities and their dimensions are : 100 microns (max) for black and metal and 250 microns (max) for amber. With the same aim in mind, studies have recently been conducted on the morphology of XLPE and in the presence of certain functional groups.

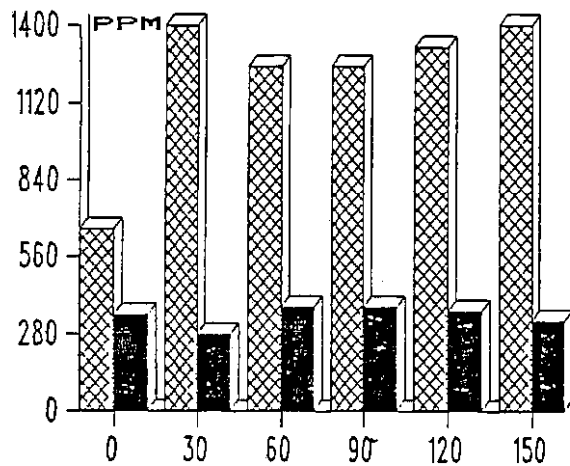
By way of example, H.KIMURA (J) gave the results of impulse breakdown voltage tests vs amorphous thickness for miniature cables (figure 1). Results were also given for identical cables with crosslinked ethylene-styrene copolymer insulation (figure 2).



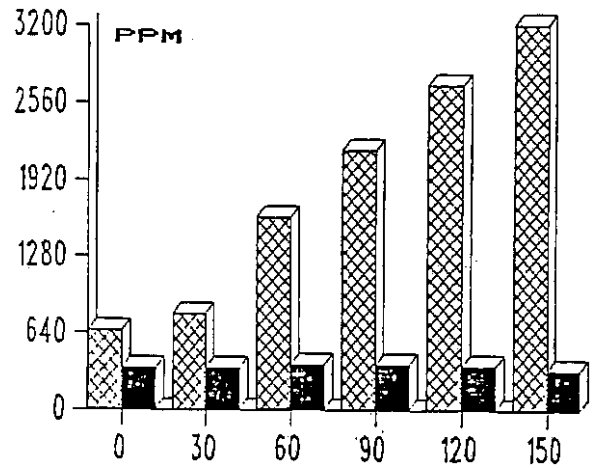
**Figure 1 :** Impulse breakdown voltage vs amorphous thickness of XLPE miniature cables





**Figure 2 :** Impulse breakdown voltage of miniature cables with crosslinked ethylene-styrene copolymer



**Figure 3 :** Sweating of antioxidant vs time (days) at 50°C

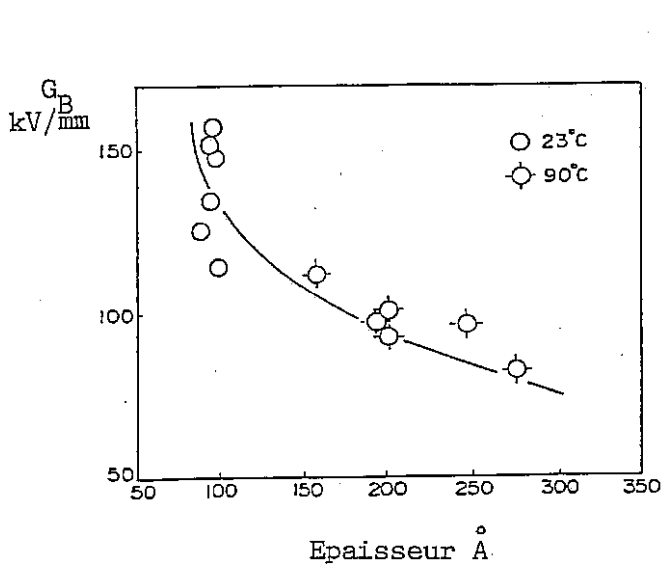


**Figure 4 :** Sweating of peroxyde vs time (days) at 4°C

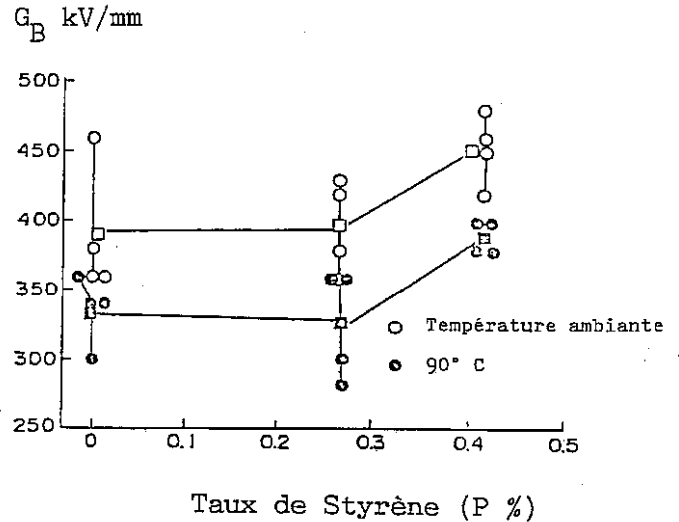
 HOMOPOLYMER  
 MODIFIED COPOLYMER

C'est ainsi<sub>3</sub> que pour un PEBD dont la densité varie entre 0,920 et 0,925 g.cm<sup>-3</sup> les impuretés et leurs dimensions admises sont : 100 µm (max) pour du noir et du métal, 250 µm (max) pour de l'ambre. Dans le même but des études ont été conduites récemment sur la morphologie du PRC et en présence de groupements fonctionnels particuliers.

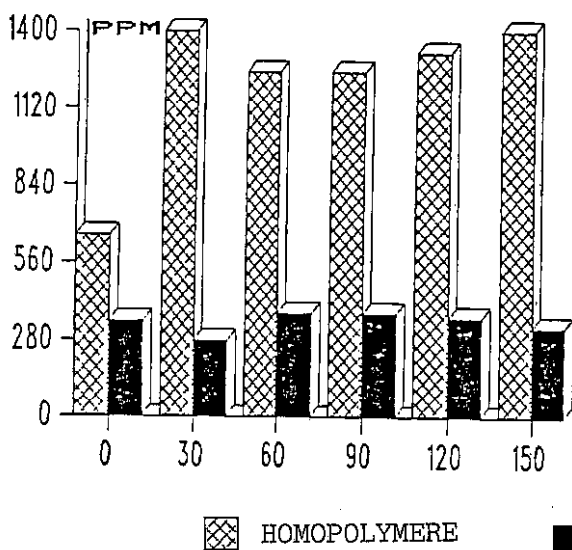
A titre d'exemple H. KIMURA (J) donne les résultats d'essais de claquage sous tension impulsionnelle et cela pour des câbles miniaturisés en fonction de la concentration de la phase amorphe (figure 1). Des résultats sont aussi donnés pour des câbles identiques dont l'isolant est un copolymère d'éthylène-styrène réticulé (figure 2).



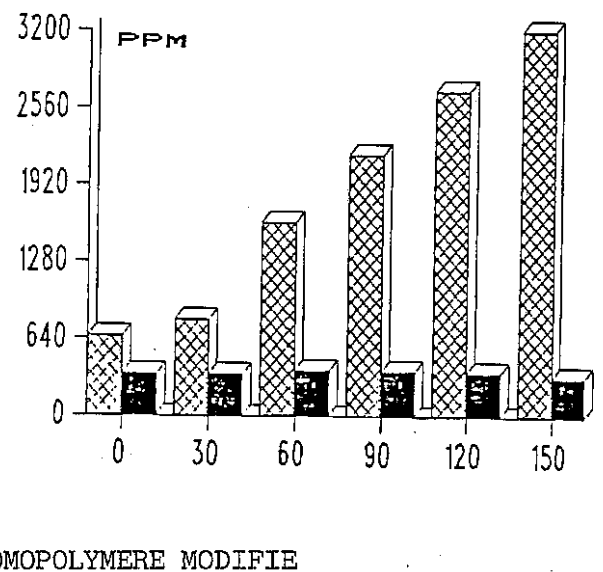
**Figure 1** : Tension impulsionnelle de claquage en fonction de l'épaisseur de la phase amorphe d'un câble miniature au PRC



**Figure 2** : Tension impulsionnelle d'un câble miniature isolé par un copolymère réticulé d'éthylène - styrène



**Figure 3** : Exsudation de l'antioxydant à 50°C en fonction du temps (jours)



**Figure 4** : Exsudation du peroxyde à 4°C en fonction du temps (jours)



According to D. UMPLEBY (US), the addition of polar copolymers might not be necessary. The sweating of peroxydes and additives could be avoided by using the technique practiced by his company, which consisted in coating the base resin with additives. This method of incorporation overcame the problems of outward diffusion. Moreover, the author considered that the adding of polar products involved a decrease in the electric properties of the cable.

## 1.2 Role of impurities and heterogeneousness

In this regard, H. AUCLAIR (F) stated that despite the praiseworthy efforts of raw materials suppliers, the insulating materials used for very high voltages contained variable concentrations of impurities. These might be the result of the manufacturing process or be due to contamination during transport or packaging.

H. ST. HONGE (CN) specified that the amorphous thickness levels shown in figure 1 were calculated on the basis of cristallinity using X-rays, which was confirmed by H. KIMURA (J). The behaviour of the material vs breakdown was similar to that mentioned by H. ST. HONGE in a previous report which brought out the volume effect.

The electric strength of insulation depended on the cristallinity of the PE and therefore on the content of amorphous phase in the polymer, remarked JP. CRINE (CN). This was shown in JICABLE 87 Paper A.9-1, presented by these two discussants. The more cristalline the sample, the greater its electric strength, measured in AC conditions. This author added that cristallinity affected other properties such as additive diffusion and water. As a user, he would prefer manufacturers to supply cables with insulation having the highest possible cristallinity, taking into consideration mechanical strength and, for example, ease of handling of cables.

C. SIMON (F) agreed that PE density, which is an indication of its cristallinity, affects breakdown stress and confirmed the complexity of the problem when account was taken of fabrication : For higher densities, it is more difficult to get homogeneous density (or cristallinity) within the insulation, especially for big thicknesses.

If, asserted R. JOCTEUR (F), one followed the reasoning concerning the relationship between breakdown stress and cristallinity, XLPE cables would be precluded. This factor needed to be taken into account, but was certainly not the only one, thermal strength, for example, being another.

L'adjonction de copolymères polaires n'est peut être pas une nécessité selon D. UMPLEBY (E.U.). L'exsudation des peroxydes et des additifs peut être évitée en utilisant la technologie mise en pratique par sa compagnie et qui consiste en l'enrobage de la résine de base par des additifs. La méthode d'incorporation résout les problèmes de diffusion vers l'extérieur. Par ailleurs, cet auteur considère que l'adjonction de produits polaires entraîne pour le câble une diminution des propriétés électriques.

## 1.2. Rôle des impuretés et des inhomogénéités

A ce propos, H. AUCLAIR (F) dit que malgré les efforts louables des fournisseurs de matières premières, les isolants utilisés en très haute tension contiennent, en quantité variable, des impuretés. Ces impuretés peuvent résulter du procédé de fabrication ou d'une contamination au cours du convoyage ou du conditionnement.

H. ST. ONGE (CN) précise que les épaisseurs de couches amorphes apparaissant sur la figure 1 sont calculées à partir de mesures de cristallinité par rayons X, ainsi que le confirme H. KIMURA (J). Le comportement du matériau vis à vis de la rupture est analogue à celui déjà mentionné par H. ST. ONGE (CN) dans un précédent rapport où est mis en évidence l'effet de volume.

La rigidité diélectrique de l'isolation dépend de la cristallinité du PE et donc de la teneur en amorphe du polymère précise JP CRINE (CN). Cela a été montré dans le papier A.9-1 de JICABLE 87 présenté par ces deux intervenants.

Plus l'échantillon est cristallin et plus la rigidité diélectrique, mesurée en courant alternatif, augmente. Cet auteur ajoute que la cristallinité affecte d'autres propriétés telles que la diffusion des additifs et de l'eau. En tant qu'utilisateur il souhaiterait que les fabricants fournissent des câbles dont l'isolant ait la cristallinité la plus élevée possible en tenant compte des problèmes de tenue mécanique et par exemple de maniabilité des câbles.

C. SIMON (F) reconnaît que la densité du polyéthylène qui est une mesure de sa cristallinité influe sur la tension de rupture et confirme la complexité du problème lorsqu'on veut tenir compte de la mise en oeuvre. Plus la densité est élevée, plus il est difficile d'avoir une densité (ou une cristallinité) homogène dans l'épaisseur, surtout avec les fortes épaisseurs.

Si l'on suivait le raisonnement concernant la relation entre la tension de rupture et la cristallinité on serait conduit à condamner les câbles au polyéthylène réticulé affirme R. JOCTEUR (F). Ce facteur est à prendre en compte mais il n'est sûrement pas le seul, la résistance thermique en est par exemple un autre.

### 1.3 Resin-associated products

G. MATEY (CH) commented on the interest of using copolymers particularly from the standpoint of breakdown and water treeing. Due to their compatibility with additives, XLPEs obtained from base resins containing copolymers offered considerable advantages over their homopolymer equivalents. These arguments are illustrated in the graphs in figures 3 and 4.

Just like surface defects on semiconductor shields, the impurities contained in VHV cable insulation could affect the cable's electric strength if these were not first eliminated by filtering.

According to H. AUCLAIR (F), impurities could be classified in two categories, depending on whether they were conducting or not :

\* non-conducting impurities : these corresponded to particles of pre-crosslinked or calcined polyethylene. The insulating material also contained organic and mineral impurities due to the pollution inherent in the various stages of production. Generally speaking, when they were sufficiently small (i.e. a few hundreds of microns), these non-conducting impurities did not substantially reduce electric strength, providing there is no water in the material. It had been demonstrated that impurities such as amber were the locus of powerful water treeing when water penetrated a live AC cable. It therefore appears to be indispensable to prevent any water penetration of VHV cables.

\* conducting impurities, consisting of metallic particles or fragments of semiconductor compounds, were the essential factor limiting the electric field applicable to VHV cables. By way of example, the curve diagram in figure 5 shows the influence of the length of an impurity, consisting of a metallic needle, on the breakdown gradient. It was important to note that the threshold electric gradient leading to breakdown do not vary with time ; the concept of electric ageing did not seem to apply to these defects.

It should be added that certain additives had a favourable effect on the electric strength of insulating materials, as shown in the curves of figure 6, where we observe an improvement of the order of 30 %.

Numerous additives were capable of providing such improvements, but their effect was of limited duration due to the diffusion process.

The additive used in the insulating material of the 400 kV cable provided a lasting improvement, as could be observed by the curves of figure 6.

### 1.3. Produits associés aux résines

G. MATEY (CH) commente l'intérêt de l'utilisation des copolymères vis à vis en particulier de la rupture et des arborescences d'eau. Les PRC obtenus à partir de résines de base contenant des copolymères offrent un grand avantage sur les équivalents homopolymères à cause de leur compatibilité avec les additifs. Ces arguments sont illustrés par les graphiques représentés aux figures 3 et 4.

Au même titre que les défauts de surface des écrans semi-conducteurs, les impuretés contenues dans l'isolation d'un câble THT, si elles ne sont pas éliminées par une filtration préliminaire, peuvent affecter la rigidité diélectrique du câble.

Selon H. AUCLAIR (F) on peut classer les impuretés en deux catégories selon qu'elles sont ou non conductrices :

\* les impuretés non conductrices : elles correspondent à des particules de polyéthylène pré-réticulé ou calciné. Il existe également dans l'isolant des impuretés organiques et minérales qui résultent d'une pollution inhérente aux différentes étapes de mise en oeuvre. D'une manière générale, ces impuretés non conductrices, lorsqu'elles sont de petites dimensions, c'est à dire de quelques centaines de microns, ne réduisent pas de manière sensible la rigidité diélectrique du câble, à condition qu'il n'y ait pas d'eau dans l'isolant. Il a en effet été démontré que les impuretés, telles que l'ambre, sont le siège d'un fort développement d'arborescences d'eau lorsqu'il y a pénétration d'eau dans le câble placé sous tension alternative. Il apparaît, par conséquent, qu'il est indispensable de prévenir toute pénétration d'eau dans les câbles THT.

\* les impuretés conductrices constituées par des particules métalliques ou des fragments de mélanges semi-conducteurs constituent le facteur essentiel de limitation du champ électrique applicable aux câbles THT. A titre d'exemple, le diagramme de courbes de la figure 5 montre l'influence de la longueur d'une impureté représentée par une aiguille métallique sur le gradient de claquage. A chaque dimension d'impureté conductrice est associé pour un isolant donné un gradient de claquage. Il est important de noter que le gradient électrique seuil conduisant au claquage n'évolue pas dans le temps ; la notion de vieillissement électrique ne semble pas applicable sur ces défauts.

Il faut ajouter que certains additifs ont un effet favorable sur la rigidité diélectrique des isolants, comme le montre les courbes de la figure 6. On observe, dans ce cas, une amélioration de la rigidité de l'ordre de 30 %.

Bon nombre d'additifs apportent une telle amélioration, mais d'un effet limité dans le temps par suite des processus de diffusion.

L'additif utilisé dans l'isolant du câble 400 kV, apporte de manière durable cette amélioration, comme on peut le constater sur les courbes de la figure 6.

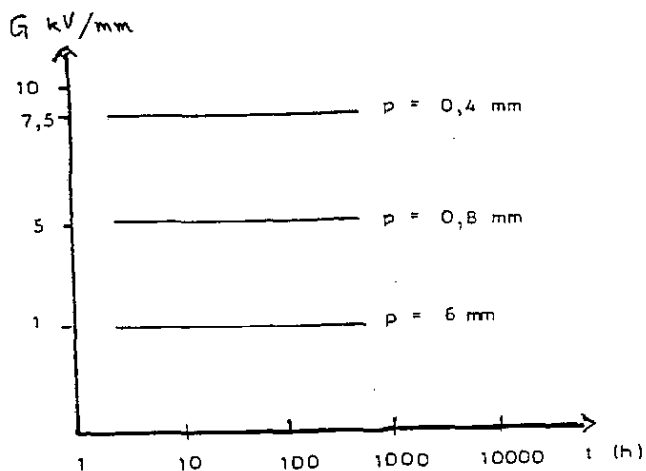


Figure 5 : Needle test on LDPE

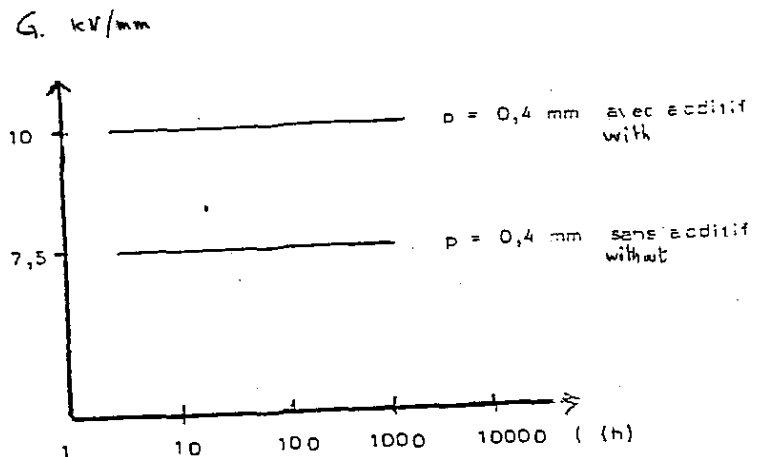


Figure 6 : Needle tests on LDPE with and without additive

The diverse nature of the impurities and their role in the electric strength of insulation was also recognised by D. ROY (F) who cited the following examples :

a) ambers

These were lightly coloured particles frequently visible in XLPE. Two samples of 50 m of cable were selected, one containing no amber, the other 18/cm<sup>3</sup> distributed as follows :

- \* 8 to 20 microns
- \* 4 to 30 microns
- \* 2 to 40 microns
- \* 2 to 50 microns
- \* 2 to 60 microns.

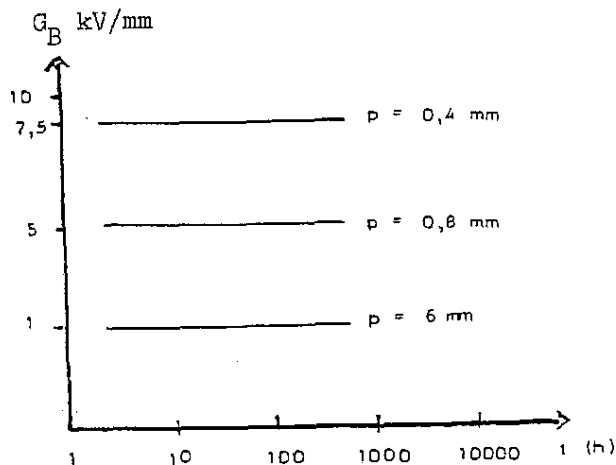
The two cables were stressed at a voltage such that the internal gradient rose to 25 kV/mm with thermal cycling (8 hours heating - 4 hours cooling). The test had now been under way for 18 000 hours and was still continuing, no cable having shown any defects.

We therefore concluded that ambers had no influence on the electric strength of XLPE insulation.

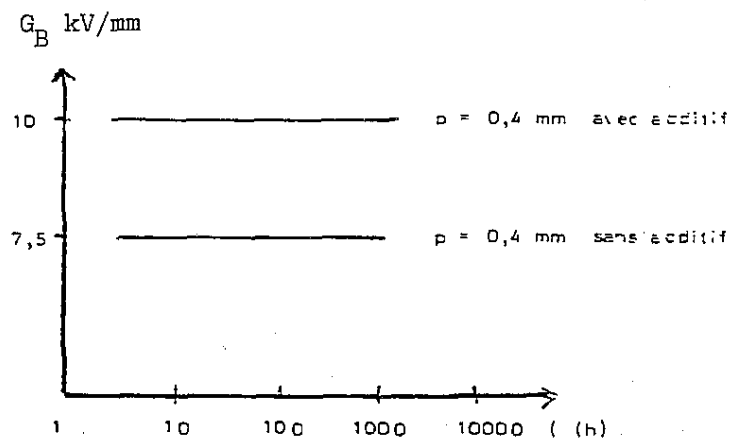
b) Peroxyde not having reacted

Various blends had been prepared with peroxyde concentrations varying from 1.5 % to 2.5 % and cables were made with these.

Vulcanisation was performed for the peroxyde thus consumed to remain at a level of 1.5 %, thus leaving a variable quantity of additive which had not reacted. This quantity was determined by measuring the decomposition energy H of peroxyde (DSC), as shown in figure 7.



**Figure 5 :** Essais à l'aiguille sur PEBD



**Figure 6 :** Essais à l'aiguille sur PEBD avec et sans additif

La diversité dans la nature des impuretés et leur rôle sur la tenue des isolants est aussi reconnue par D. ROY (F) qui donne les exemples suivants :

a) Les ambres

Ce sont des particules légèrement colorées souvent visibles dans le PRC. Deux échantillons de câble de 50 mètres ont été sélectionnés, l'un ne contenant pas d'ambre, l'autre en comportant  $18/\text{cm}^3$  réparties de la manière suivante :

- \* 8 de 20  $\mu\text{m}$
- \* 4 de 30  $\mu\text{m}$
- \* 2 de 40  $\mu\text{m}$
- \* 2 de 50  $\mu\text{m}$
- \* 2 de 60  $\mu\text{m}$ .

Les deux câbles ont été soumis à une tension qui portait le gradient interne à 25 kV/mm avec cycles thermiques (8 heures chauffage - 4 heures refroidissement). L'essai dure depuis 18000 heures et est toujours en cours, aucun des câbles n'ayant présenté de défaillance.

Nous concluons donc que les ambres n'ont pas d'influence sur la tenue électrique des isolants PRC.

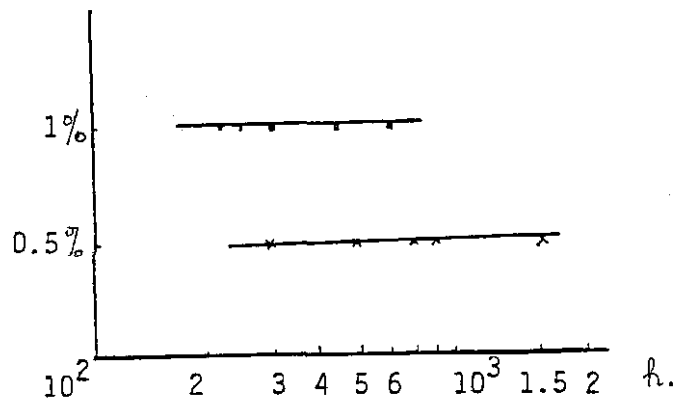
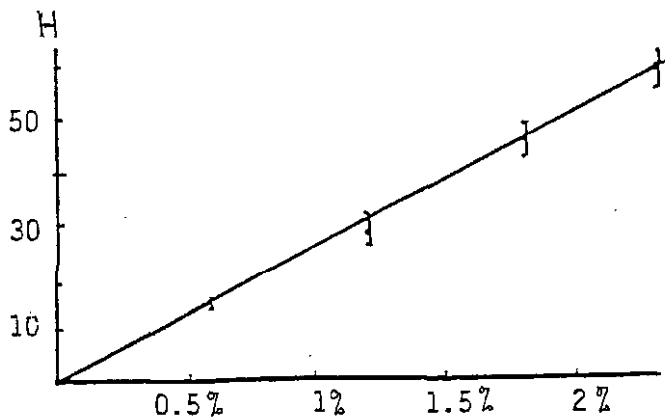
b) Le peroxyde n'ayant pas réagi

Différents mélanges ont été préparés avec des taux de peroxyde variables de 1,5 à 2,5 % et des câbles réalisés avec ceux-ci.

La vulcanisation a été conduite pour que le peroxyde consommé soit toujours de 1,5 % ce qui laissait une quantité variable d'additif n'ayant pas réagi. Cette quantité a été déterminée par mesure de l'énergie de décomposition  $\Delta H$  du peroxyde (DSC), comme le montre la figure 7.

decomposition energy H  
(J/g)

% residual peroxyde



peroxyde level

time (h)

Figure 7 - Calibration of decomposition energy vs peroxyde level

Figure 8 - Failure of cables containing peroxyde

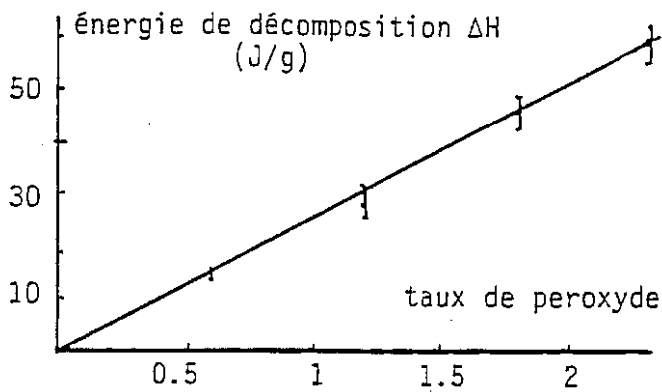
It can be seen from figure 8 that additives, particularly peroxyde not having reacted, have an extremely deleterious effect on electric strength.

five 20 m test samples received a gradient at the conductor of 7 kV/mm :

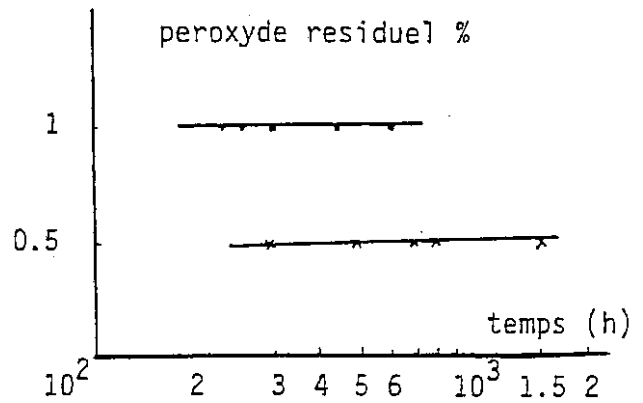
- \* 5 with no free peroxyde
- \* 5 containing 0.5 % of non-reacted peroxyde
- \* 5 containing 1 % of non-reacted peroxyde.

When a circulation current raised conductor level to 80°C, failure of cables containing non-reacted peroxyde occurred very rapidly, whereas the normally manufactured cable, containing no perceptible peroxyde had no failures over the entire 3-year test period.

According to JP. CRINE (CN), however, there were far more impurities than foreseen in cable insulation. These metallic impurities were generally readily ionisable and therefore became dangerous for the cable by reducing its electric strength. At the same time, the presence of water would induce the dissolution of some of these impurities and this chemical transformation would modify the overall pH thus facilitating the growth of certain defects. Generally speaking, it could be considered that metals, particularly transition metals, were oxydation catalysts. This was thus an indirect effect of the presence of metallic traces in the insulation.



**Figure 7** : Etalonnage de l'énergie de décomposition en fonction du taux de peroxyde



**Figure 8** : Rupture des câbles renfermant du peroxyde

On voit d'après la figure 8 que des additifs et notamment le peroxyde n'ayant pas réagi ont un effet très nocif sur la tenue électrique.

Des éprouvettes de 20 mètres au nombre de 5 furent soumises à un gradient à l'âme de 7 kV/mm :

- \* 5 sans peroxyde libre,
- \* 5 renfermant 0,5 % de peroxyde n'ayant pas réagi,
- \* 5 renfermant 1 % de peroxyde n'ayant pas réagi.

Un courant de circulation portait l'âme à 80°C, le claquage des câbles renfermant du peroxyde n'ayant pas réagi intervient très rapidement alors que le câble fabriqué normalement, qui ne renfermait plus de peroxyde décelable, n'a pas eu de défaillance durant toute la période d'essai de trois ans.

Mais il y a beaucoup plus d'impuretés que prévu dans l'isolation des câbles affirme J.P. CRINE (CN). Ces impuretés métalliques ou non, sont en général facilement ionisables et deviennent donc dangereuses pour le câble dont elles abaissent la rigidité diélectrique. Par ailleurs, la présence d'eau va entraîner la dissolution de certaines de ces impuretés et cette transformation chimique va changer le PH de l'ensemble et faciliter la croissance de certains défauts. D'une manière générale on peut considérer que les métaux et surtout ceux de transition sont des catalyseurs d'une oxydation. Il s'agit donc là d'un effet indirect de la présence de traces métalliques dans l'isolant.



R. JOCTEUR (F) emphasised that the amounts of water in the material were small : < 20 ppm in LDPE and around 100 or 1000 ppm in XLPE, dependent on whether it had been produced by the dry process or by steam. The question therefore was to determine the threshold level where the process was triggered. JP. CRINE (CN) replied that 100 ppm was perfectly tolerable but that the problem arose for the steam-process cable. L. MAYOUX (F) felt that it was the type of interface that determined the manner in which the system behaved. The concept of interface, in the macroscopic sense, was defined for example when considering the frontier between the semiconductor and the insulation and in the microscopic sense when one realised that in these materials an amorphous phase is close to a cristalline phase. Laboratory experimentation had consisted of studying the behaviour of LDPE with an AC voltage applied by tip to plane electrodes system, it being possible to replace the metallic tip by a liquid. The samples studied were observed through an optical microscope, the voltage at which the first fracture in the polymer being recorded. It was possible to impregnate the polymer with various gases. The classification of measured voltage was the following :

Air (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>) < NG < SF<sub>6</sub> < H<sub>2</sub>O < Lx (NG = series of neutral gases, Lx = series of acid or alkaline liquids). This remained true as long as the electrode-polymer interface can be considered chemically pure ; any chemical imperfection modified this classification.

Mrs B. FALLOU (F) recalled H.KIMURA's findings in his A.7-3 Paper at JICABLE 87 in which it appeared that the number of bow-tie tree was less when the humidity level increased, which correlated with the findings just mentioned. It should however be pointed out that the material studied here was a blend of copolymers. H.KIMURA et al (J) specified in their written document that voids were minimised and protrusions eliminated : Specific formulations had been adopted for semiconductor materials, plus simultaneous 3-layer extrusion and dry processing. Between 1974 and 1984, the number of impurities in the basic LDPE had been lowered by a factor of over 1000 in Japan. This progress was due to close cooperation between resin producers and the manufacturer which, according to S. NAGASAKI (J), appeared to be the major difference between Europe, the United States and Japan.

P.P. LEUFKENS (NL) considered that impurities would penetrate the cable during extrusion and would thus probably be located in the middle of the insulation ; thus H. AUCLAIR's test was not particularly representative. If high permittivity particles were present in the insulation, they could be far more dangerous than well-coated conducting particles along the equipotentials.

R. JOCTEUR (F) pointed out that the needle test was intended to characterise - or to classify - materials and that a large number of defects could not be coated. This was the case for metallic flakes, the role of which had been clearly revealed by the tests. H. TAKEHANA (J) considered, however, that the two modes of breakdown, in an XLPE cable and in the needle test, were very different given the configuration of the electrodes.

R. JOCTEUR (F) souligne que les quantités d'eau dans le matériau sont faibles : < 20 ppm dans le PEBD, environ 100 à 1000 ppm dans le PRC selon qu'il a été fabriqué par une méthode sèche ou vapeur. On peut alors se demander à partir de quel taux le processus va se déclencher. JP CRINE (CN) répond alors qu'on peut bien vivre avec 100 ppm mais que le problème se pose pour le "câble-vapeur".

C. MAYOUX (F) pense que la nature des interfaces détermine le mode d'évolution du système. La notion d'interface au sens macroscopique est définie par exemple lorsqu'on considère la frontière entre le semi-conducteur et l'isolant, au sens microscopique lorsqu'on réalise que dans les matériaux considérés une phase amorphe est près d'une phase cristalline. Des expériences de laboratoire ont consisté à étudier le comportement du PEBD sous champ électrique alternatif avec un système d'électrodes pointe-plan, la pointe métallique pouvant être remplacée par un liquide quelconque. Les éprouvettes étudiées étant observées à l'aide d'un microscope optique on enregistre la tension à laquelle apparaît la première fracture au sein du polymère, celui-ci peut être imprégné de différents gaz. Le classement des tensions mesurées s'établit comme suit :

Air (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>) < NG < SF<sub>6</sub> < H<sub>2</sub>O < Lx (NG = série des gaz neutres, Lx = série de liquides acides ou basiques). Ceci demeure vrai tant que l'interface électrode-polymère peut être considérée comme chimiquement pure, toute imperfection chimique due à une réaction modifie ce classement.

Mme B. FALLOU (F) rappelle les résultats de H. KIMURA dans son papier A7-3 de JICABLE 87 où il apparaît que le nombre d'arborescences du type noeud-papillon est moins important lorsque le taux d'humidité est accru, ce qui irait dans le sens des résultats évoqués précédemment. Il faut cependant préciser que le matériau étudié ici est un mélange de copolymères. H. KIMURA et al (J) précisent dans leur document que l'on a minimisé les cavités et éliminé les protrusions. Des formulations spécifiques ont été adoptées pour les matériaux semi-conducteurs ainsi qu'une extrusion simultanée et réticulation par voie sèche de trois couches. Le nombre d'impuretés dans le PEBD de base a été abaissé au Japon, dans un rapport supérieur à 1000 entre 1974 et 1984. Ce progrès est dû à une étroite collaboration entre le fabricant de résine et le constructeur, ce qui apparaît être à S. NAGASAKI (J) la grande différence entre l'Europe, les Etats-Unis et le Japon.

P.P. LEUFKENS (NL) considère que les impuretés pénétreront dans le câble au cours de l'extrusion, de sorte qu'elles seront probablement situées au milieu de l'isolation ; aussi l'essai de H. AUCLAIR n'est-il peut être pas tellement représentatif. Si des particules de permittivité élevée sont dans l'isolation, elles peuvent être beaucoup plus dangereuses que des particules conductrices bien enrobées qui sont le long des équipotentielles.

R. JOCTEUR (F) précise que l'essai à l'aiguille est destiné à caractériser voire à classer les matériaux et qu'un grand nombre de défauts peuvent ne pas être enrobés, ce fut le cas de paillettes métalliques dont le rôle a été bien révélé par l'essai. Mais H. TAKEHANA (J) pense pour sa part que les deux modes de rupture, dans un câble au PRC et dans le test à l'aiguille, sont très différents compte-tenu de la configuration des électrodes.

C. LAURENT (F) recalled that his ageing studies on LDPE, HDPE and XLPE had shown that the formation of a space charge was one essential reason of the deterioration of the structure of a dry material under AC conditions. Assuming a service gradient of around  $10 \text{ kV} \times \text{mm}^{-1}$ , it was necessary to reduce structural inhomogeneities and the presence of impurities liable to induce electric field amplification factors of about 10. This being so, the carrier injection threshold using a metallic electrode would have to be of the order of  $1 \text{ MV} \times \text{cm}^{-1}$ . It was therefore essential to take care that the interfaces should have as low an injectability factor as possible. In the low field range, carrier recombination phenomena could be radiating, as was shown on laboratory samples or observed by J. DENSLEY et al. (CN) on cable segments. Energy dissipation could be absorbed by molecules of the insulation itself or by those of the gas dissolved in the polymer. If this gas contained oxygen, dissociative reactions could propagate and lead to deterioration.

In the light of these experiments, excited state inhibitors could be considered, anti-u.v., as advocated by the Canadian team quoted above or saturation of the insulation structure by an inert gas.

#### 1.4 Characteristics of the interfaces

R. JOCTEUR (F) asked whether the use of high permittivity products, recommended by the United States in the past, was still being applied. J.A. MORAN Jr (USA) replied that one manufacturer used these materials with XLPE, both as a shield and within the insulation jacket in intermediary positions, probably in order to facilitate multi-pass extrusion.

According to G. MATEY (CH), high permittivity products did exist and experience seemed to show that the role of layers made with these products was in line with theoretical forecasts and that the reliability of these cables was increased.

P. DEJEAN (F) pointed out that the use of such products could induce a gain inside the cable but a loss outside, thus complicating the situation for the accessories ; under certain conditions an external layer could be considered.

H. TAKEHANA et al (J) listed the essential characteristics of the semiconductor material, laying particular stress on surface uniformity. The factors liable to affect uniformity were essentially : the compound formulation and the resultant carbon black contamination, a fabrication process using 3-layer coextrusion, for example. According to P. METRA (I), it was necessary to test the performance of the semiconductor shield associated with the insulation system, using measurement of impulse voltage strength, thus obtaining the results for two components at the same time.

C. LAURENT (F) rappelle que ses études de vieillissement conduites sur du PEBD, PEHD ou PRC ont montré que la formation d'une charge d'espace est une raison essentielle de la dégradation de la structure du matériau, sec, sous tension alternative. En supposant un gradient de service de l'ordre de  $10 \text{ kV} \times \text{mm}^{-1}$ , il est nécessaire de réduire les hétérogénéités de structure et la présence d'impuretés qui peuvent entraîner des coefficients d'amplification de champ électrique de l'ordre de 10. On est alors conduit au seuil d'injection de porteurs par une électrode métallique qui est de l'ordre de  $1 \text{ MV} \times \text{cm}^{-1}$ . Il faut donc veiller à rendre les interfaces les moins injectantes possibles.

Dans le domaine des champs faibles les phénomènes de recombinaison de porteurs peuvent être radiatifs comme cela est montré sur des éprouvettes de laboratoire ou comme l'ont observé J. DENSLEY et al. (CN) sur des portions de câbles. La dissipation d'énergie peut être absorbée par les molécules de l'isolant lui même ou celles du gaz dissous dans le polymère. Si ce gaz contient de l'oxygène des réactions de dissociation peuvent se propager et conduire à la dégradation.

Fort de ces expériences on peut envisager des inhibiteurs d'états excités, des anti u.v. comme l'a préconisé l'équipe canadienne citée ci-dessus ou une saturation de la structure de l'isolant par un gaz inerte.

#### 1.4. Caractérisation des interfaces

R. JOCTEUR (F) demande si l'utilisation de produits à haute permittivité préconisée par le passé aux Etats-Unis est aujourd'hui effective. JA MORAN Jr (E.U.) répond qu'un fabricant utilise de tels matériaux avec le PRC, à la fois comme écran et au sein de l'enveloppe isolante dans des positions intermédiaires, vraisemblablement pour faciliter une extrusion en passages multiples.

Selon G. MATEY (CH), les produits à haute permittivité existent et l'expérience semble démontrer que le rôle des couches réalisées à partir de ces produits correspond aux prévisions théoriques et que la fiabilité des câbles en est accrue.

P. DEJEAN (F) fait remarquer que l'utilisation de tels produits peut conduire à un gain à l'intérieur du câble mais à une perte à l'extérieur, compliquant ainsi la situation pour les accessoires ; on peut envisager dans certaines conditions une couche extérieure.

H. TAKEHANA et al (J) énumèrent les caractéristiques essentielles du matériau semi-conducteur en insistant en particulier sur l'uniformité de surface. Les facteurs pouvant affecter cette uniformité sont essentiellement : la formulation du composé et la contamination en noir de carbone qui peut en résulter, le procédé de mise en oeuvre par exemple par une coextrusion en trois couches. Selon P. METRA (I), il est nécessaire de tester les performances de l'écran semi-conducteur associé à l'ensemble de l'isolation, à l'aide de la mesure de la tenue en tension impulsionnelle, ce qui permet d'obtenir en même temps les résultats pour les deux composants.

## 2. CABLES

### 2.1. Influence of cable conductor and its watertightness

Conductors are composed of layers, either concentric or segmented along the cross-section ; their structure does not appear to raise any special problems as to gradient limitations.

According to K. SOMA (J), in the case of segmented conductors it was accepted that the semiconductor layer should fill the interstitial space between the segments ; banding of the conductor by semiconductor tape was an effective solution to maintain the various segments.

Industrial experience of water-tight conductors for HV and VHV cables was limited and for this reason it was not possible to provide any fresh information.

### 2.2. Design of extrusion line

The electric performance of a cable was closely related to the dimensions of voids and impurities in the insulation and to that of protrusions at insulation-semiconductor interfaces.

#### 2.2.1 Voids

R. JOCTEUR (F) stressed that for thermoplastic materials such as low or high density polyethylene, the fabrication conditions adopted were capable of avoiding the presence of voids in the insulation.

With crosslinked materials, such as XLPE or EPR, crosslinking processes by dry curing had enabled considerable reductions in voids when compared to steam crosslinking (P. DEJEAN (F), H. TAKEHANA (J)). In the case of XLPE, several authors considered voids of around 30 microns to be acceptable for gradients of around 10 - 15 kV/mm.

#### 2.2.2 Impurities

The presence of impurities in the insulation was probably one of the essential problems to be solved in order to increase cable operating gradients. This being so, the topic gave rise to a lengthy debate.

## 2. LES CABLES

### 2.1. Influence de l'âme du câble et de son étanchéité

Les conducteurs sont à couches concentriques ou segmentés suivant la section ; leur structure ne semble pas poser de problèmes particuliers en ce qui concerne la limitation des gradients.

Selon K. SOMA (J), pour les conducteurs segmentés il est admis que la couche semi-conductrice remplisse les interstices entre les segments ; un frettage du conducteur par des rubans semi-conducteurs constitue une solution efficace pour maintenir les différents segments.

L'expérience industrielle des conducteurs étanches pour les câbles haute tension et très haute tension est limitée ; pour cette raison, aucun élément nouveau n'a pu être apporté.

### 2.2. Conception de la ligne d'extrusion

Les performances électriques d'un câble sont étroitement liées aux dimensions des vacuoles et des impuretés dans l'isolant ainsi qu'à celles des protrusions aux interfaces isolant - semi-conducteur.

#### 2.2.1. Vacuoles

R. JOCTEUR (F) souligne que pour les matériaux thermoplastiques comme le polyéthylène basse densité ou le polyéthylène haute densité, les conditions de fabrication adoptées permettent d'éviter la présence de vacuoles au sein de l'isolant.

Avec les matériaux réticulés tels que le PRC ou l'EPR les procédés de réticulation par voie sèche ont permis de réduire considérablement les dimensions des vacuoles comparativement à la réticulation dans la vapeur d'eau (P. DEJEAN (F) H. TAKEHANA (J)). Dans le cas du PRC plusieurs auteurs considèrent que des vacuoles de 30  $\mu\text{m}$  environ sont acceptables pour des gradients de l'ordre de 10 - 15 kV/mm.

#### 2.2.2. Impuretés

La présence d'impuretés dans l'isolant est, vraisemblablement, l'un des problèmes essentiels à résoudre pour augmenter les gradients de fonctionnement des câbles ; par conséquent, ce sujet a été longuement débattu.

Naturally, filtering did not provide absolute security for string-shaped impurities (D. ROY (F)).

For C. SIMON (F), fine filtering at 50 microns, followed by filtering at 80 microns made it possible to reduce filtering traces that were found in insulation and which were inhomogeneities.

### 2.2.3 Protrusions

The problem of the quality of semiconductors and the insulation-semiconductor interface had been examined under the "MATERIALS" chapter.

Regarding the design of XLPE insulation lines, there appeared to be a degree of consensus for an extruder layout enabling the use of a triple head or for two heads in tandem (single head for the internal semiconductor plus double head for the insulation and the semiconductor) specially designed tooling improved material flow in the extruder heads (P. DEJEAN (F)) and contributed to the achievement of good quality insulation-semiconductor interfaces.

So-called extra smooth semiconductor blends had appeared on the market a few years ago ; these limited protrusions, thus making it possible to increase service gradients.

It should also be recalled that the use of acetylene black instead of carbon black of the "stove" type induced a most significant reduction of contamination (J.P. CRINE (CDN)).

### 2.3 Treatment recommended for insulated conductors (crosslinking, cooling, post-treatment...)

Dry method crosslinking processes were the only ones taken into consideration for cables operating at the gradients concerned.

Crosslinking temperatures should not be excessive (G. MATEY (CH)) and crosslinking in oil was one solution enabling temperatures to be limited (C. SIMON (F)).

High mechanical stressing could originate within the insulation if special precautions were not taken to control crosslinking and cooling temperatures. This occurred especially in cases of large cross-section cables with high insulation thickness and could affect the electric performance (P. METRA (I)).

The degassing of XLPE cables was necessary to eliminate certain volatile byproducts associated with the decomposition of peroxyde (methane... ) or the crosslinking process (nitrogen... ) ; dicumyle peroxyde is generally used as a crosslinking agent and acetophenone, a decomposition byproduct of this peroxyde having a beneficial effect on the electric performance of cables, remains in sufficient quantities in the insulation (H. AUCLAIR (F)).

Bien sûr la filtration n'est pas une sécurité absolue pour les impuretés filiformes (D. ROY (F)).

Pour C. SIMON (F) une filtration fine à 50 µm suivie d'une filtration à 80 µm permet de réduire les traces de filtres que l'on rencontre dans les isolations et qui sont des hétérogénéités.

### 2.2.3. Protrusions

Le problème de la qualité des semi-conducteurs et de l'interface isolant - semi-conducteur a été examiné dans le chapitre "MATERIAUX".

En ce qui concerne la conception des lignes d'isolation PRC, il semble qu'il y ait un certain consensus pour une disposition des extrudeuses permettant l'utilisation d'une tête triple ou de deux têtes en tandem (tête simple pour le semi-conducteur interne + tête double pour l'isolant et le semi-conducteur externe) (P. DEJEAN (F)).

Des outillages particulièrement étudiés améliorent l'écoulement des matériaux dans les têtes d'extrusion (P. DEJEAN (F)) et contribuent à l'obtention d'interfaces isolant - semi-conducteur de bonne qualité.

Des mélanges semi-conducteurs dits extra-lisses sont apparus sur le marché il y a quelques années et permettent de limiter les protrusions, d'où une possibilité d'augmenter les gradients de service.

Il faut également rappeler que l'utilisation de noir d'acétylène au lieu de noir de carbone de "type four" conduit à une réduction extrêmement significative de la contamination (J.P. CRINE (CDN)).

### 2.3. Traitement préconisé pour le conducteur isolé

(Procédé de réticulation, refroidissement, post-traitement...)

Les procédés de réticulation par voie sèche sont les seuls à être pris en considération pour les câbles fonctionnant aux gradients considérés.

Les températures de réticulation ne doivent pas être excessives (G. MATEY (CH)) et la réticulation dans l'huile est une solution qui permet de limiter ces températures (C. SIMON (F)).

Des contraintes mécaniques élevées peuvent prendre naissance au sein de l'isolant si l'on ne prend pas de précautions particulières pour contrôler les températures de réticulation et de refroidissement ; ceci se produit notamment dans le cas de câbles de fortes sections avec des épaisseurs d'isolant importantes et peut affecter leurs performances électriques (P. METRA (I)).

Le dégazage des câbles à isolation PRC est nécessaire pour éliminer certains sous-produits volatils liés à la décomposition du peroxyde (méthane, ...) ou au procédé de réticulation (azote, ...) ; le peroxyde de dicumyle est généralement utilisé comme agent de réticulation et l'acétophénone, sous-produit de décomposition de ce peroxyde, dont l'effet est bénéfique sur les performances électriques des câbles, reste en quantité suffisante dans l'isolant (H. AUCLAIR (F)).



Thermoplastic materials (low and high density polyethylene) facilitated filtering (R. JOCTEUR (F) - H. SCHADLICH (D)) ; with crosslinkable materials, filtering was considerably more difficult and XLPE was therefore at a disadvantage compared to polyethylene for operations at high gradient of the order of 15 kV/mm (R. JOCTEUR (F)).

With low density polyethylene, it was possible to limit the maximum diameter of spherical impurities to 50 microns (H. AUCLAIR (F)), while for XLPE these values could not be achieved.

The elimination of impurities within the cable insulation could be achieved by two different, complementary methods :

- \* the use of particularly clean materials,
- \* filtering at insulation extruder level.

According to S. NAGASAKI (J) and H. TAKEHANA (J), close cooperation between manufacturers of raw materials and cable suppliers had made it possible to introduce a system of quality assurance for the raw materials which appeared to be more developed in Japan than elsewhere. This has led some manufacturers to consider that filtering of XLPE when extruding cables was not a fundamental problem (G. BALOG (N) - S. NAGASAKI (J)).

It should also be emphasised that the achievement of distinctly improved purity of materials in all countries was subordinated to the systematic setting up of quality assurance procedures (PH. DRUOT (F) - A. FARKAS (S) - G. MATEY (CH) - D. UMPLEBY (USA)) which made it possible to limit the impurities concentration in base resins.

Special attention should be paid to materials handling and transport systems (M. LEUFKENS (NL)) to avoid introducing impurities prior to extrusion.

However, for the majority of participants, it would appear that the use of filters during extrusion was necessary despite the considerable improvement of materials purity in recent years. For EPR, the filter problem was more complex than for XLPE and, naturally, than for thermoplastics (J.J. WAVRE (CH)).

There was a minimum dimension for filter mesh interstices which should not be exceeded in order to limit extrusion pressure and not to reduce productivity excessively (PH. DRUOT (F)).

The problem of impurities being fundamental for the electric strength of insulation, it was vital to have the cleanest possible material at the outset. For H. AUCLAIR (F) and R. JOCTEUR (F), crosslinkable materials should be extruded at reduced temperature due to the presence of peroxyde, which made filtering difficult. To attain the polyethylene filtering level, XLPE might possibly be extruded using two extruders in series, the first being used for high temperature filtering of the base resin and the second for actual extrusion with a cooling and peroxyde injection device placed between the two. According to J.A. MORAN (USA), this process was not being employed in industry, but there were no technological reasons preventing its use.

Les matériaux thermoplastiques (polyéthylène basse densité et polyéthylène haute densité) permettent une filtration facile (R. JOCTEUR (F) - H.SCHADLICH (D)) ; avec les matériaux réticulables cette filtration est beaucoup plus difficile et, de ce fait, le PRC est handicapé par rapport au polyéthylène pour un fonctionnement à un gradient élevé de l'ordre de 15 kV/mm (R. JOCTEUR (F)).

Avec le polyéthylène basse densité il est possible de limiter le diamètre maximal des impuretés sphériques à 50 µm (H. AUCLAIR (F)) alors que pour le PRC, on ne peut pas atteindre ces valeurs.

L'élimination des impuretés au sein de l'isolant du câble peut s'obtenir par deux voies différentes et complémentaires:

- \* utilisation de matériaux particulièrement propres,
- \* filtration au niveau de l'extrudeuse d'isolation.

Selon S. NAGASAKI (J) et H. TAKEHANA (J), une coopération étroite entre fournisseurs de matières premières et constructeurs de câbles a permis l'introduction d'un système d'assurance qualité pour les matériaux de base qui semble plus développé au Japon que dans les autres pays. Ceci conduit certains constructeurs à considérer que la filtration du PRC au moment de l'extrusion des câbles n'est pas un problème fondamental (G. BALOG(N) - S. NAGASAKI (J)).

De plus, il faut souligner qu'une nette amélioration de la pureté des matériaux dans tous les pays est liée à une mise en place systématique de procédures d'assurance qualité (PH. DRUOT (F) - A. FARKAS (S) - G. MATEY (CH) - D. UMPLEBY(USA)) qui permettent de limiter le taux d'impuretés dans les résines de base.

Une attention particulière doit être portée sur les systèmes de manutention et de convoyage des matériaux (M. LEUFKENS (NL)) pour ne pas introduire d'impuretés avant leur extrusion.

Cependant pour une majorité de participants, il semble que l'utilisation de filtres en cours d'extrusion soit nécessaire bien que la pureté des matériaux se soit considérablement améliorée au cours des dernières années. Pour l'EPR le problème des filtres est plus complexe que pour le PRC et, bien sûr, que pour les matériaux thermoplastiques (J.J. WAVRE (CH)).

Il existe pour les filtres une dimension minimale des vides de mailles à ne pas dépasser afin de limiter la pression d'extrusion et de ne pas réduire la productivité de manière excessive (PH. DRUOT (F)).

Le problème des impuretés étant fondamental pour la tenue diélectrique des isolants, il est indispensable d'avoir au départ le matériau le plus propre possible. Pour H. AUCLAIR (F) et R. JOCTEUR (F) les matériaux réticulables doivent être extrudés à température réduite à cause de la présence de peroxyde ce qui rend la filtration difficile. Pour atteindre le niveau de filtration du polyéthylène, on peut imaginer pour le PRC une extrusion avec deux boudineuses en série : la première assure la filtration de la résine de base à haute température et la seconde permet l'extrusion proprement dite avec un dispositif de refroidissement et d'injection de peroxyde entre les deux. Selon J.A MORAN (USA) ce procédé n'est pas utilisé industriellement mais, du point de vue technologique, rien ne s'y oppose.

### 3. DESIGN, VERIFICATION AND TESTING

#### 3.1 Statistical concepts on which selection of operating gradients is based

Weibull's double distribution, in time and in field, is generally considered a basis for the selection of acceptable operating gradients. Opinions vary only as to the processes used to determine the parameters of these distributions and, hence, the results of the selection.

\* F. FARNETTI (I) described the methods currently practiced by ENEL (Italy) :

Type approval of cables and selection of dimensions were made for EPR-insulated cables, generally used on the basis of the parameters evaluated in the study of dummy cables made with the same materials as the actual cables and on the same facility, simply checking that they belong to the family in the case of cables of the final dimensions.

This viewpoint was supported by P. METRA (I), who stressed the necessity of a final check on actual cables, and by J.A. MORAN (USA), who counselled that this method be used with some precaution.

\* E. DORISON (F) stated that the dimensional choices recognised by EDF and the tests performed were all based on WEIBULL's distribution. Standard EDF HN 33 S 51 used WEIBULL's distribution to define series tests with parameters guaranteed by manufacturers for the various insulations utilised. This approach had been validated by EDF's favourable experience.

\* H. TAKEHANA (J) presented the method of choice used in Japan and which differed somewhat from the methods described previously :

- . The reasoning was based on the "mean" field value and not on maximum field value.
- . The reasoning was applied successively to problems of AC electric strength and impulse voltages and the thickness adopted was the maximum calculated with the two methods.
- . The method introduced duration, uncertainty and temperature factors.

When applied to XLPE, the method was based on a cable life expectancy of 30 years.

### 3. CONCEPTION, CONTROLES et ESSAIS

#### 3.1. Les concepts statistiques sources de choix des gradients de fonctionnement

La loi double de WEIBULL, en temps et en champ, est généralement considérée comme une base permettant de conduire au choix des gradients de fonctionnement acceptables. Les avis et les opinions ne divergent que dans les processus de détermination des paramètres donc, dans les résultats de ces choix.

\* F. FARNETI (I) expose les pratiques en cours à ENEL (ITALIE) :  
L'homologation des câbles et les choix dimensionnels s'effectuent pour les câbles isolés à l'EPR, généralement utilisés à partir de paramètres évalués dans l'étude de maquettes de câbles, réalisés avec les mêmes matériaux et sur la même installation que les câbles réels, avec une simple vérification d'appartenance à la famille, sur les câbles de dimensions définitives. Ce point de vue est soutenu par P. METRA (I) qui insiste sur la nécessité du contrôle final sur les câbles réels, et par J.A. MORAN qui incite à une certaine prudence dans l'application de cette méthode.

\* E. DORISON (F) indique que les choix dimensionnels reconnus par EDF, ainsi que les essais pratiqués, sont fondés sur la loi de WEIBULL. La Norme EDF HN 33 S 51, utilise cette loi pour définir des essais de série avec des paramètres garantis par les fournisseurs, pour les différents isolants utilisés. Cette démarche est validée par l'expérience favorable d'EDF en la matière.

\* H. TAKEHANA (J) présente la méthode de choix usitée au Japon, qui diffère quelque peu des méthodes précédentes :

- . Le raisonnement est fait en valeur "moyenne" du champ et non en valeur de champ maximal.
- . Le raisonnement est appliqué successivement aux problèmes des tenues en alternatif et en ondes de choc et on retient l'épaisseur maximale calculée par ces deux méthodes.
- . La méthode introduit des coefficients de durée, d'incertitude et de température.

La méthode, appliquée au PRC (XLPE), est basée sur une espérance de vie des câbles de 30 ans.

This was expressed in the form :

$$e = \frac{U}{ED} \cdot K1 \cdot K2 \cdot K3$$

where :

- . U was the voltage applied :  $\frac{V}{\sqrt{3}}$  in AC, or the required level (BIL) of impulse voltage.
- .  $E_D$  was the permissible mean field (AC or impulse)
- . K1 was a coefficient taking account of duration (30 years AC, repeated impulses).
- . K2 was an uncertainty coefficient.
- . K3 was a thermal coefficient.

Thickness e was calculated with AC and with impulse voltage, the thickness adopted being the larger of the two.

\* Determination of parameters was effected as follows :

. Determination of  $E_D$

- The mean field had been adopted for  $E_D$  because experience had shown that this factor remained constant when the ratio of outer and inner insulation diameters was within the 0.3 to 0.7 range (contrary to what occurs for maximum and minimum fields at electrode interfaces).

For the radial and longitudinal dimensions of the cable considered, the value of  $E_D$  was obtained from a Weibull distribution of the following type :

$$F(E) = 1 - \exp \left\{ - (E - E_L) / E_0 \right\}^b$$

Where :

- $E_L$  was an observed, descriptive parameter of cable quality but considered to be of no physical significance
- $E_0$  was a scale parameter.
- b was the scatter parameter.

Elle s'exprime sous la forme :

$$e = \frac{V}{E_D} \times K1 \times K2 \times K3.$$

où :

- . V est la tension appliquée :  $\frac{V}{\sqrt{3}}$  en alternatif ; ou le niveau requis (BIL) en ondes de choc.
- .  $E_D$  est le champ moyen admissible (alternatif ou choc).
- . K1 est un coefficient tenant compte de la durée (30 ans en alternatif, répétition des chocs).
- . K2 est un coefficient d'incertitude.
- . K3 est un coefficient thermique.

On calcule l'épaisseur (e) en alternatif et l'épaisseur (e) en choc, l'épaisseur retenue est la plus grande des deux.

\* La détermination des paramètres s'effectue de la manière suivante :

. Détermination de  $E_D$

\* On a choisi, pour  $E_D$ , le champ moyen parce que l'expérience a montré que ce facteur demeurerait constant quand le rapport des diamètres, sous et sur l'isolant, variait de 0,3 à 0,7 (contrairement à ce qui se passe, pour les champs maximaux et minimaux, aux interfaces des électrodes).

\* La valeur de  $E_D$  s'obtient, pour les dimensions radiales et longitudinales du câble considéré, à partir d'une loi de WEIBULL du type :

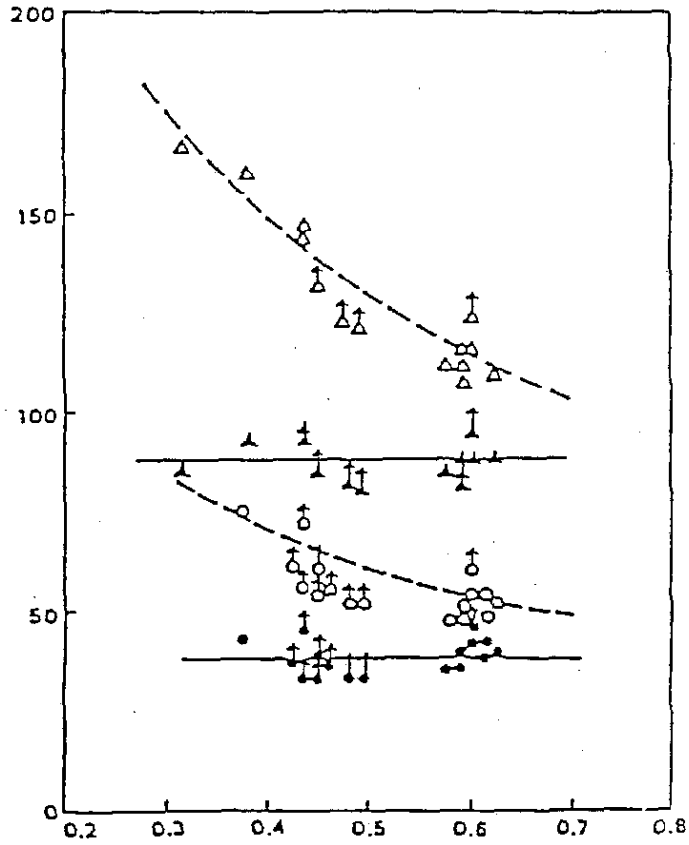
$$F(E) = 1 - e^{-\left[\frac{(E-EL)}{E_0}\right]^b}$$

Où :

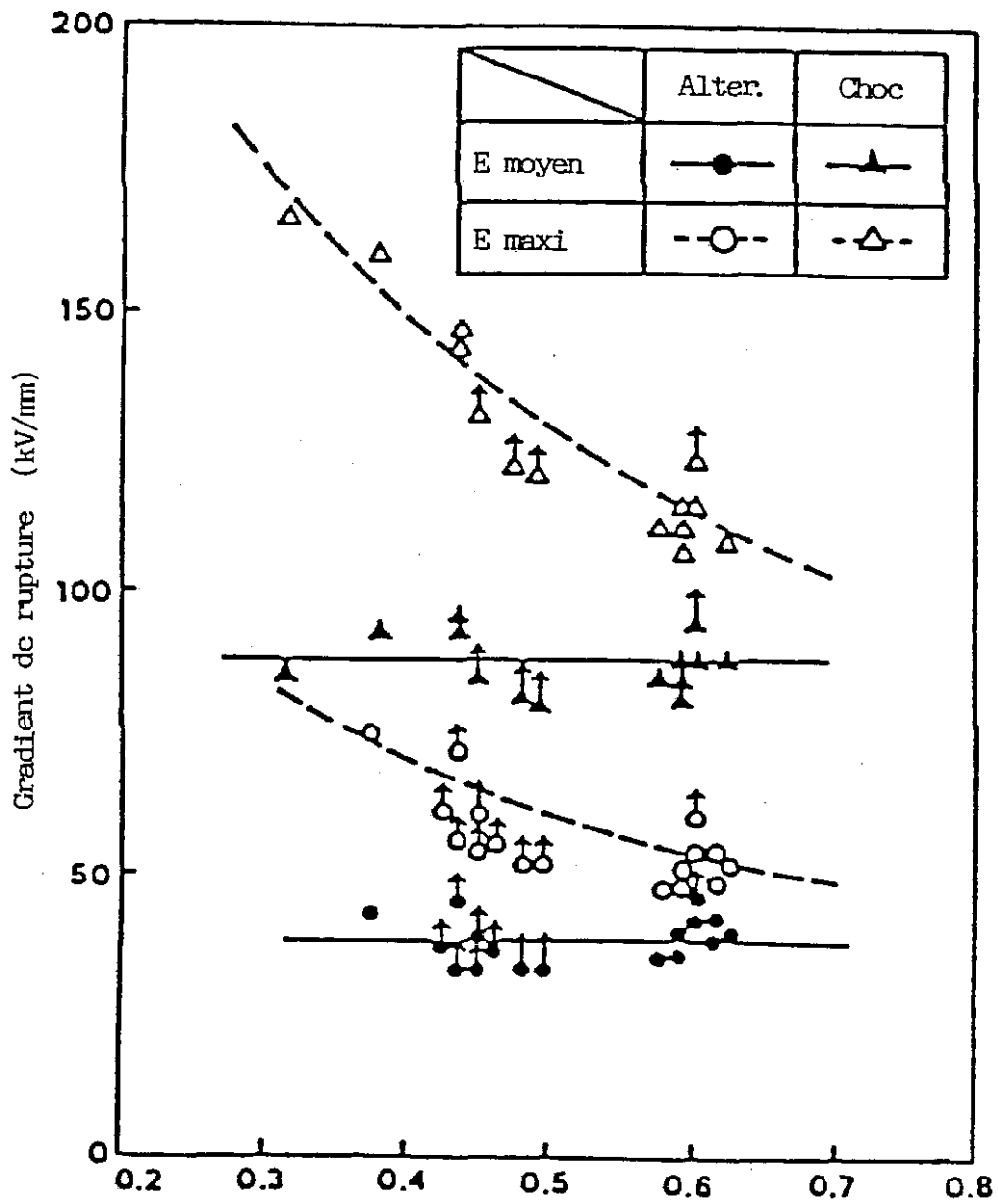
- \* EL est un paramètre observé et descriptif de la qualité du câble, mais considéré comme sans réelle signification physique.
- \*  $E_0$  est le paramètre d'échelle.
- \* b est le paramètre de dispersion.

/	AC	Impulse
Mean E	—●—	—▲—
Max E	-○-	-△-

Failure gradient  $kV/mm$



**Figure 9** : Failure gradient of XLPE insulated cables ((154/275 kV) versus  $d1/d2$ .



**Figure 9** : Gradient de rupture des câbles isolés au PRC (154/275 kV) en fonction de  $d1/d2$ .



E was measured for the most recent cable series in thicknesses ranging from 19 to 35 mm by a very slow ramping test, from which it was possible to deduce the values of  $E_L = 35$  kV/mm for AC and 75 kV/mm for impulse voltages.

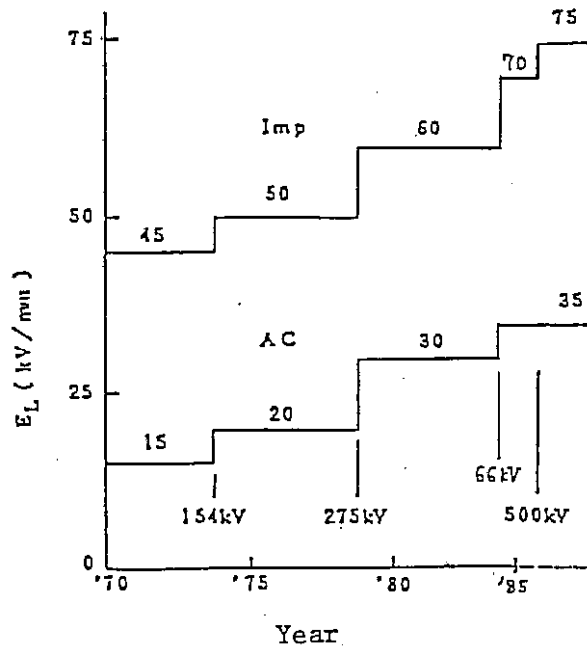


Figure 10 : Variations of test field.

E est mesuré pour les séries de câbles les plus récentes, dans une gamme d'épaisseurs de 19 à 35 mm, par un essai de montée en paliers très longs, d'où l'on déduit des valeurs de EL = 35 kV/mm en alternatif et 75 kV/mm en ondes de choc.

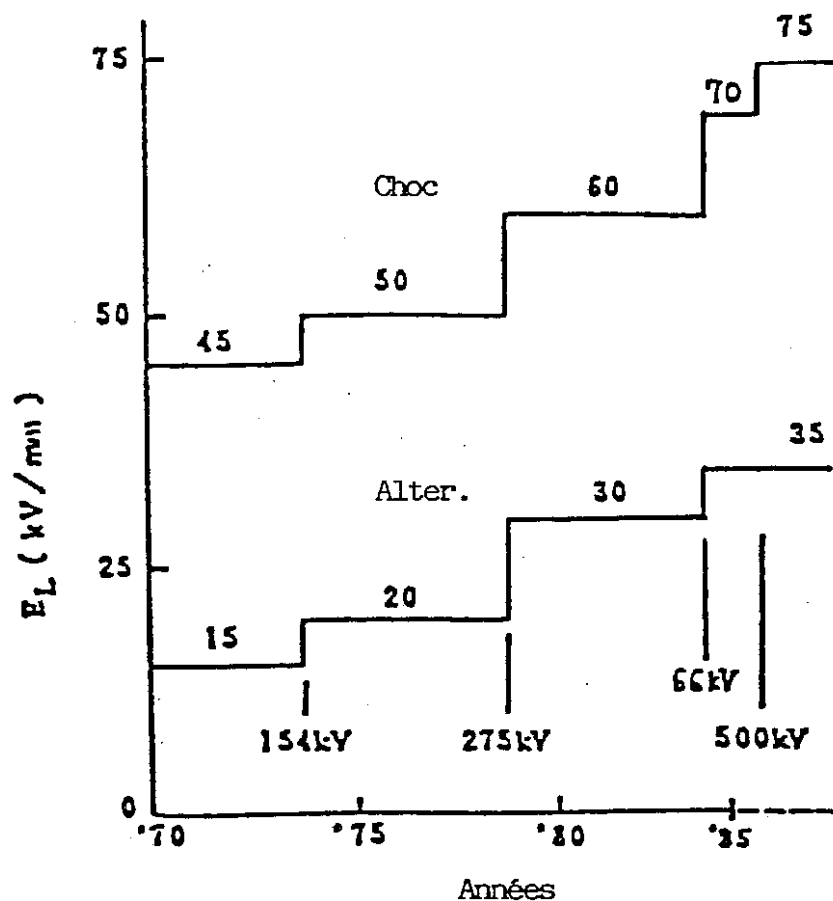
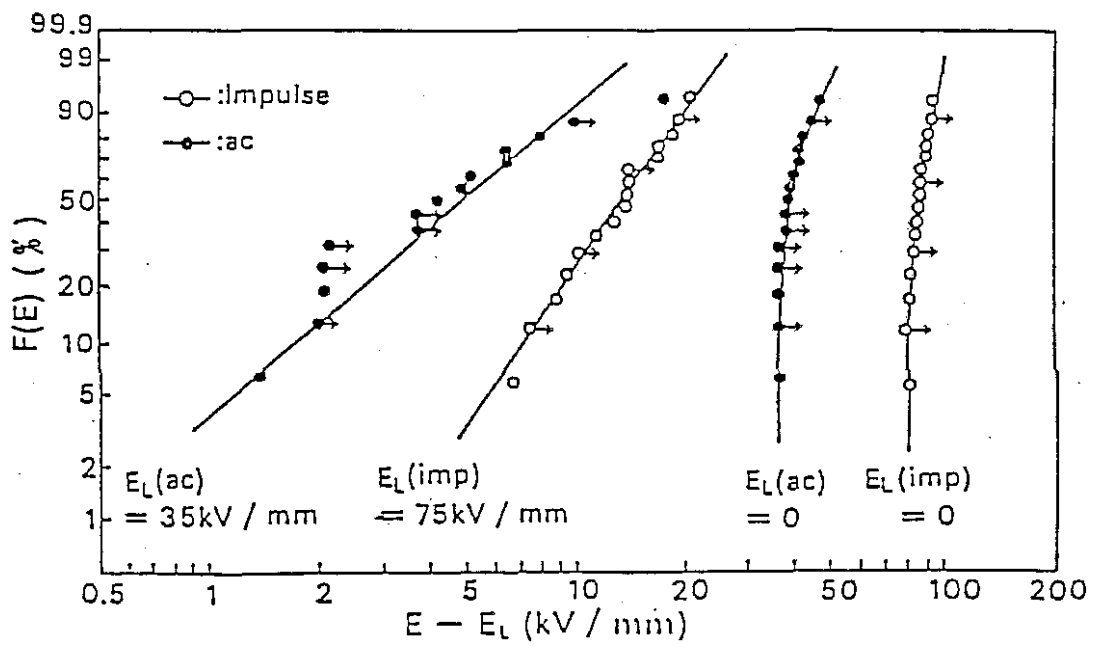
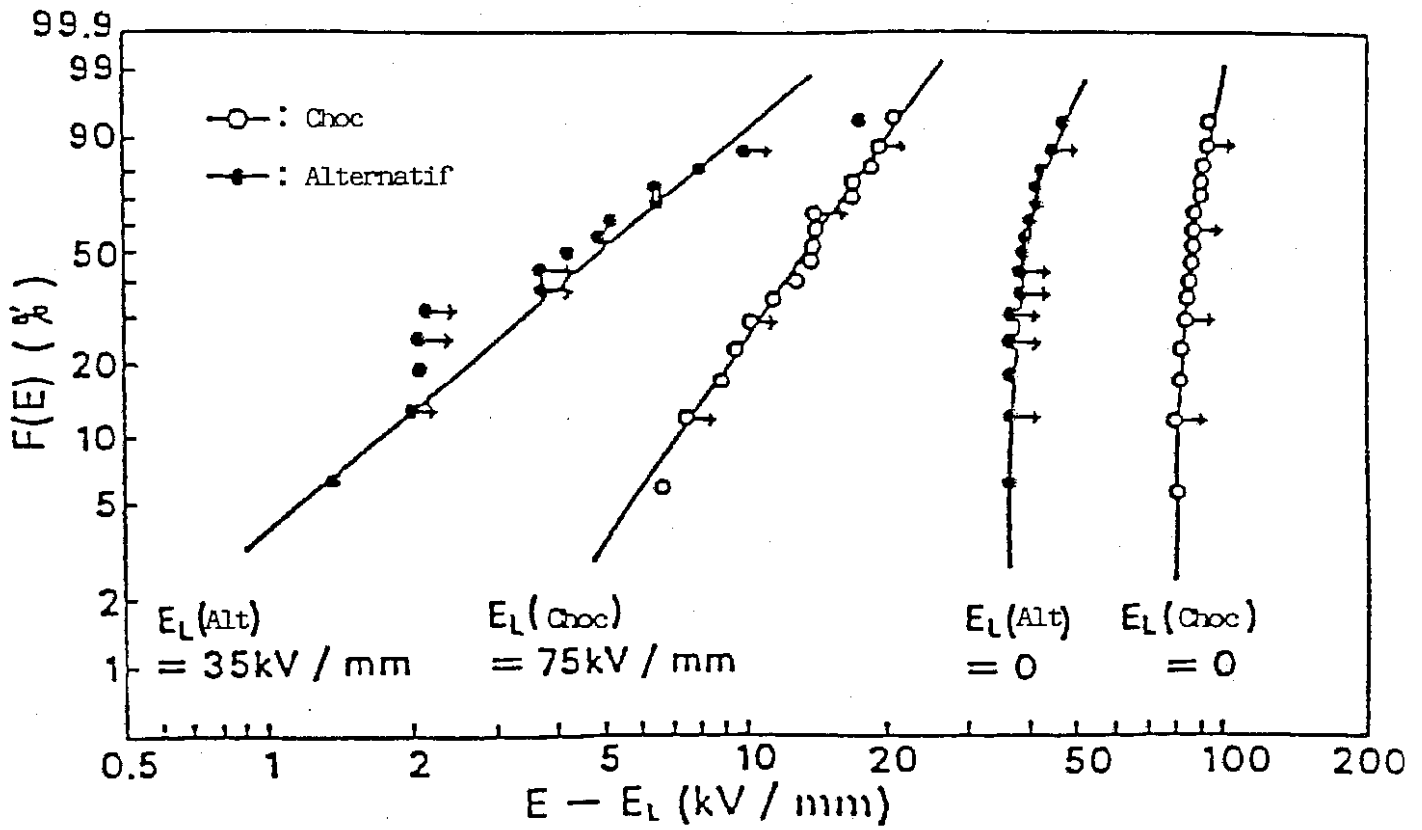


Figure 10 : Variation du champ d'essai.



**Figure 11** : Weibull Graph of breakdown fields on XLPE 19 to 35 mm cables.

(Mean field U/e, dry crosslinking).



**Figure 11** : Graphique de WEIBULL des champs de rupture sur câbles PRC à isolation de 19 à 35 mm.

(Champ moyen  $\frac{V}{e}$ , réticulation à sec).

. Détermination of K1

K1 was determined with AC from the U/Time characteristics of XLPE cables of the following type :  $t \times V^n = \text{cste}$

To calculate K1, the following formula was used :

$$K1 = \frac{(t_o)^{1/n}}{(t_w)}$$

Where :

- $t_o$  = expected service life of 30 years.
- $t_w$  = duration of test (1 h)
- $n$  = life coefficient, determined on the basis of the following figure.

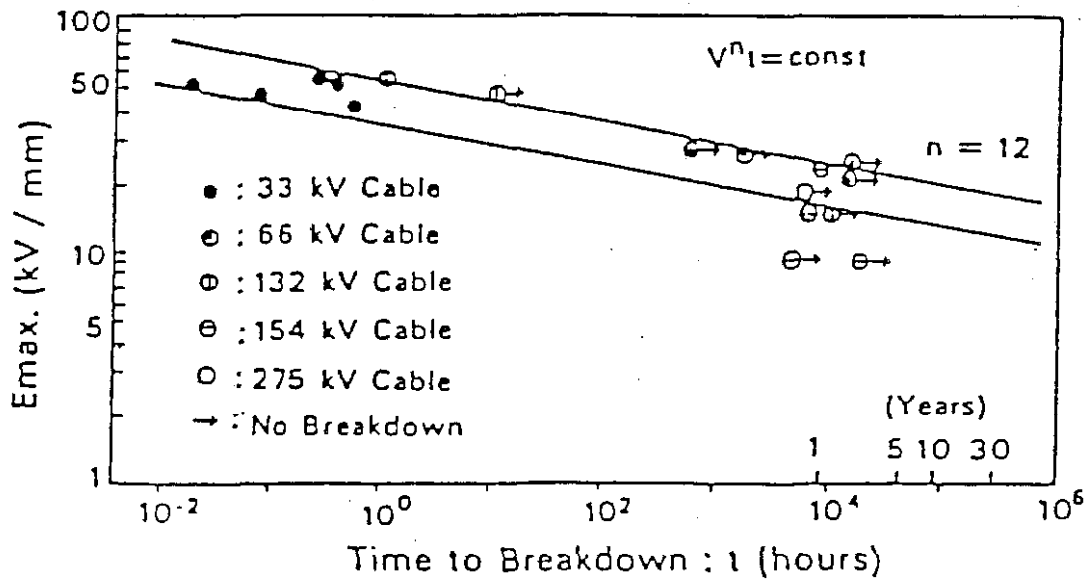


Figure 12 : Time vs. Voltage Characteristics on XLPE cables.

. Détermination de K1

K1 se détermine, en alternatif, à partir de la caractéristique V/Temp<sup>n</sup> des câbles PRC du type  $t \times V^n = \text{cste.}$

On utilise, pour le calcul de K1, la formule :

$$K1 = \frac{(t_0)^{\frac{1}{n}}}{(t_w)}$$

Où :

- $t_0$  est la durée de vie attendue de 30 ans.
- $t_w$  la durée d'application d'essai (1 h).
- $n$  le coefficient de vie, déterminé à partir de la Figure ci-après.

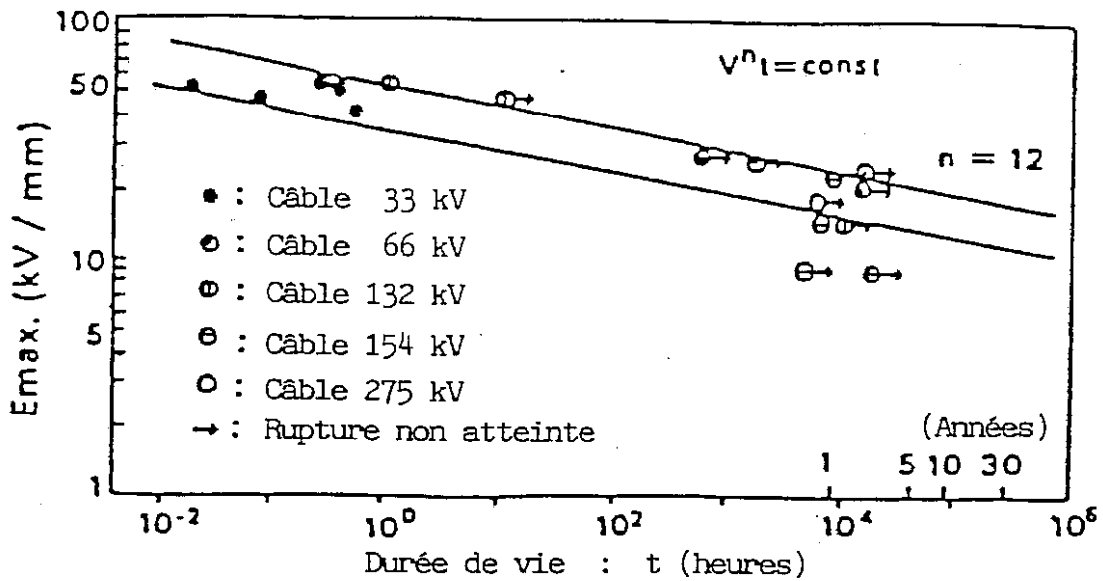


Figure 12 : Caractéristiques Temps-Tension sur câbles PRC.

n = 9 was selected for cables of up to 275 kV  
 n = 12 was selected for 500 kV cables

The calculated value of K1 for impulse voltages could not be obtained in the same manner, because ageing was not discernable. K1 was taken as 1.1 to take account of uncertainties, such as the superimposition of impulse voltages on AC.

. Determination of K2

K2 was a coefficient taking account of uncertainty factors and set at 1.1 for both AC and impulse voltages.

. Determination of K3

K3 was a temperature coefficient which may be determined on the basis of the experimental findings described in the following figures, such as breakdown voltage at ambient temperature and at 90°C, the service temperature.

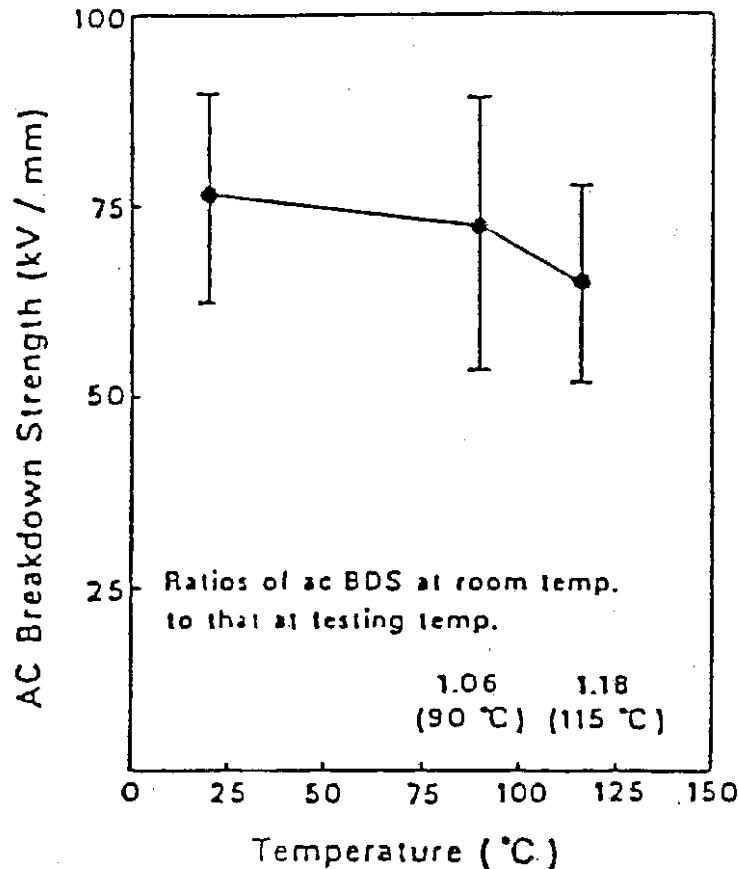


Figure 13 : Influence of temperature on XLPE cable failure gradient with AC (ACFG)

Impulse failure gradient (kV/mm)

On choisit :

$n = 9$  pour les câbles jusqu'à 275 kV.

$n = 12$  pour les câbles 500 kV.

La valeur de  $K_1$  calculée est de 4 ( $n = 9$ ) pour les câbles jusqu'à 275 kV et 2,83 ( $n = 12$ ) pour les câbles 500 kV.

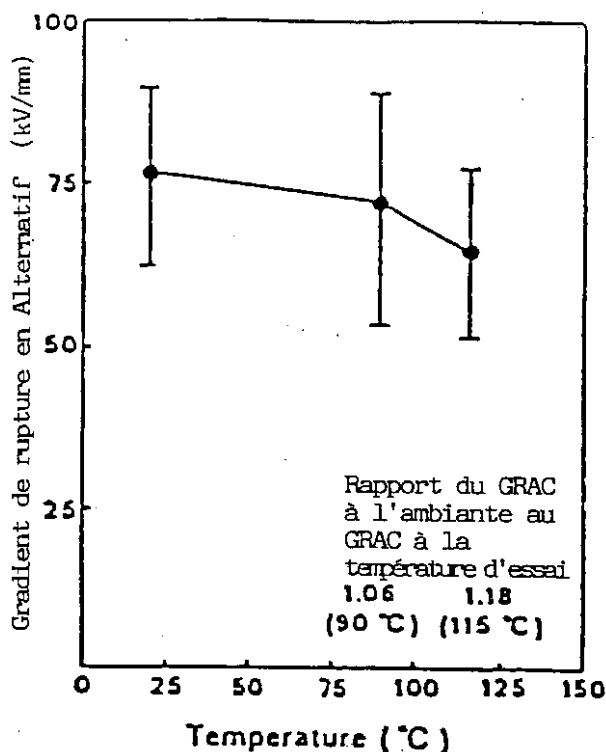
La détermination de  $K_1$ , pour les ondes de choc, ne peut se faire de la même façon, car le "vieillissement" n'est pas décelable. On choisit  $K_1 = 1,1$  pour tenir compte des incertitudes, comme la superposition des chocs sur l'alternatif.

. Détermination de  $K_2$

$K_2$  est un coefficient tenant compte de facteurs d'incertitudes et pris égal à 1,1 en alternatif et en ondes de choc.

. Détermination de  $K_3$

$K_3$  est un coefficient de température que l'on peut déterminer à partir d'essais expérimentaux décrits sur les Figures ci-après, comme le rapport des tensions de claquage à l'ambiante et à 90°C, température de service.



**Figure 13** : Influence de la température sur le gradient de rupture des câbles PRC en courant alternatif (GRAC).



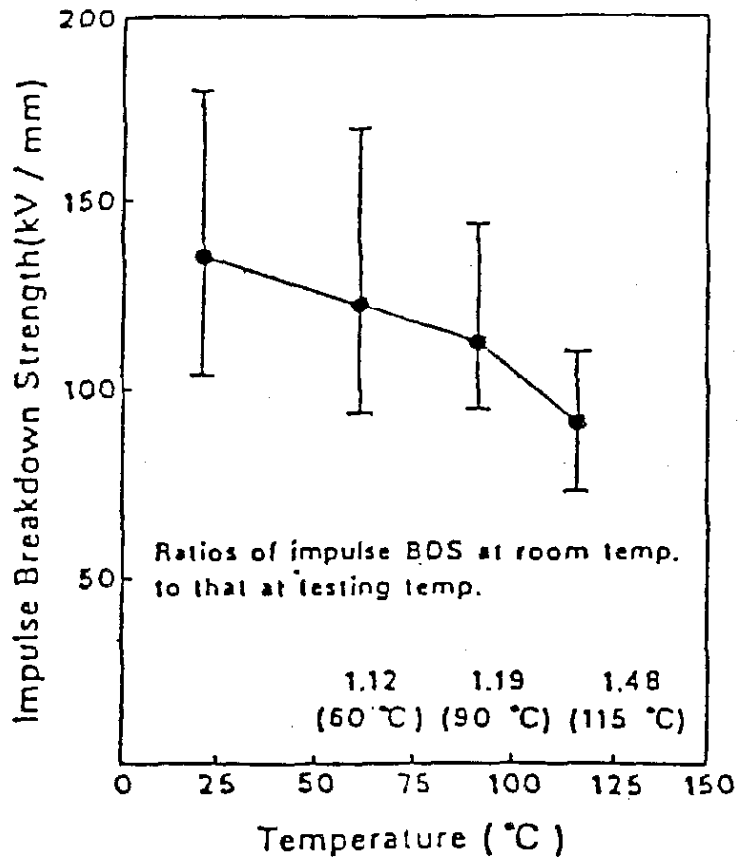
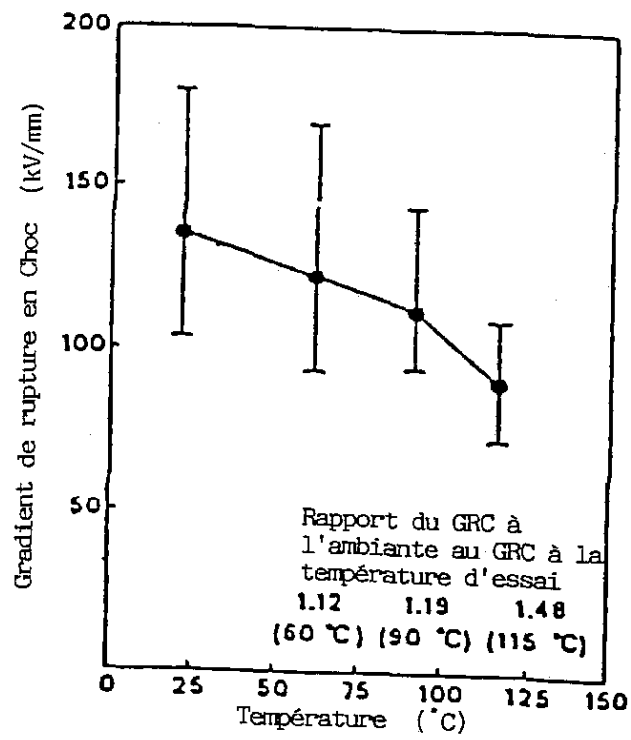


Figure 14 : Influence of temperature on XLPE cable failure gradient with Impulse voltages (IFG)



**Figure 14** : Influence de la température sur le gradient de rupture en Choc des câbles.

For AC K3 was taken to equal 1.1 and with impulse voltages 1.25 (up to 275 kV) and 1.2 (500 kV cables).

This discrepancy between K3 values for AC or impulse voltages evidenced a certain degree of weakness on the part of XLPE during impulse voltage testing.

This phenomenon, sometimes attributed to the 90°C service temperature selected for XLPE (at this temperature a substantial portion of crystallites have been transformed into the molten phase), was the basic reason for considering that impulse strength might constitute a limiting factor to gradient growth (Point 3.3).

### 3.2 Adjustment of thickness with conductor diameter

The Workshop provided no answer to this question.

### 3.3 Is impulse strength a limiting factor ?

In his statement, H. TAKEHANA (J) had shown the method used in Japan, consisting in the separate calculation of one thickness for AC strength and another for specified impulse strength. Both calculations were based on a common method but used different systems of parameters, after which the larger of the two values was chosen for the cable.

On the basis of impulse failure gradient values measured for 8 mm (120 kV/mm) and 18 mm (113 kV/mm) XLPE cables, H. SCHAEDELICH (FRG) showed that the "safety" impulse voltages that he would adopt - in order to comply with EDF Standards (1250 kV for the 1050 laid down by HN 33 S 51) - were more stringent goals than was required with AC. He therefore considered that for XLPE impulse strength was effectively a limiting factor.

He had conducted his measurements at 95°C, applying series of 3 alternate impulses (3 positive and 3 negative), beginning with a voltage level of half the expected value and ramping voltage step by step.

P.P. LEUFKENS (NL) shared this view. In as much as impulse strength decreased with temperature, this was a limiting factor which assumed considerable importance with high service temperatures. Thus XLPE (service temperature 90°C) was at a disadvantage compared to LDPE (service temperature 70°C).

On choisit en alternatif  $K_3 = 1,1$  et en choc  $K_3 = 1,25$  (jusqu'à 275 kV) et 1,2 (câbles 500 kV).

Cette différence des valeurs de  $K_3$ , entre alternatif et chocs, met en évidence une certaine faiblesse du PRC à l'essai d'ondes de choc.

Ce phénomène, parfois attribué à la température de service de  $90^\circ\text{C}$  choisie pour le PRC (et à laquelle une part notable de cristallites est passée à l'état fondu), est à l'origine de l'avis selon lequel la tenue en choc peut être une limitation à la croissance des gradients (Point 3.3).

### 3.2. Ajustement des épaisseurs avec les diamètres sur conducteurs

L'Atelier n'a pas fourni de réponse à cette question.

### 3.3. La tenue aux ondes de choc est-elle un facteur limitatif ?

H. TAKEHANA (J) a montré, par son exposé sur la méthode utilisée au Japon, qu'il convenait de calculer séparément une épaisseur "pour la tenue en alternatif" et une épaisseur "pour la tenue au choc spécifiée", calculs basés sur une méthode commune, mais avec des systèmes de paramètres différents, et de choisir - pour le câble - la plus grande de ces deux valeurs.

H. SCHAEGLICH (FRG) montre, à partir de valeurs de gradients de claquage au choc mesurés sur des câbles PRC de 8 mm (120 kV/mm) et de 18 mm (113 kV/mm) d'épaisseurs, que les tensions de choc de "sécurité" qu'il s'imposerait - pour satisfaire aux Normes EDF (1250 kV pour 1050 kV exigée de la HN 33 S 51) - constituent des objectifs plus sévères que ceux que requiert la tenue en alternatif. Il estime donc que, pour le PRC, la tenue au choc constitue un facteur limitatif.

Il a réalisé ses mesures à  $95^\circ\text{C}$ , en appliquant des séries de 3 chocs alternés (3 chocs+ et 3 chocs-), en partant d'une tension égale à la moitié de la valeur attendue et en montant la tension par paliers.

P.P. LEUFKENS (NL) partage ce point de vue. La tenue au choc qui décroît avec la température est un facteur limitatif d'autant plus important que la température de service est élevée. Le PRC (service à  $90^\circ\text{C}$ ) est donc désavantagé par rapport au PEBD (service  $70^\circ\text{C}$ ).

E. FAVRIE (F) indique que, pour le PEBD, c'est la tenue en alternatif seule qui constitue le facteur limitatif.

Sur les câbles 225 kV, le contournement d'extrémités (sans claquage du câble) intervient à 1350 kV dans l'essai EDF à 10 chocs alternés à chaud. Le gradient est alors de 100 kV/mm.

Les câbles 400 kV supportent, sans difficulté, l'essai en 10 chocs alternés à  $75^\circ\text{C}$ , jusqu'à la tension spécifiée de 1425 kV.

A l'ambiante, on constate - sur ces câbles - un contournement sans claquage à 1800 kV (gradient 110 kV/mm).

E. FAVRIE (F) stated that for LDPE the sole limiting factor was AC strength : On 225 kV cables flashover at the ends (not accompanied by cable breakdown) occurred at 1350 kV in the EDF test consisting of 10 alternate impulses at service temperature. In this case, the gradient was 100 kV/mm. 400 kV cables withstood the 10 alternate impulse test at 75°C with no problems up to the specified voltage of 1425 kV. At ambient temperature, flashover was observed on these cables with no breakdown at 1800 kV (gradient : 110 kV/mm). For long impulses (250/2500 microseconds), the results were satisfactory at 1300 kV or 80 kV/mm.

J.A. MORAN (USA) stated that this impulse test at service temperature was a considerable stress for XLPE. Tests had been performed in the USA at 130°C (permissible temperature for overload). The results needed to be further discussed and to be rationalised.

C. AUCOURT (F) made a statement on the possible influence in this field of the conductivity of semiconductor blends. At the 10<sup>-3</sup> SIE-MENS level, the permissible level for the IEC, a far from negligible HF dielectric field appeared (15 % of the interface field) within the semiconductor due to the high frequency components of the impulse.

This study took no account of conductivity variations of this type of conductive blend with the electric field (Comment by C. SIMON (F)).

#### 3.4 Design of online control

This point is combined with the following one.

#### 3.5 Design of debugging test without endangering reliability

E. DORISON (F) presented the current EDF view.

The quality and reliability of cables are dependent on the size of impurities in the insulation and therefore on the filtering process. For LDPE a gradient of 30 kV/mm with AC should not be exceeded.

Taking this as a basis, cable evaluation involved the statistical interpretation of failures occurring at a gradient below this danger level. Short tests at very high levels should be rejected since they failed to reveal defects which developed slowly.

Apart from qualification testing, EDF checked debugging and quality evaluation levels simultaneously, based on Weibull's distributions (HN 33 S 51), giving a 2.5 % client risk, the quality level adopted by EDF.

The test, which lasted .1 hour at 2.2 U<sub>0</sub>, allowed a maximum of 3 failures for 18 km of cable.

This approach had been validated by experience.

There was no requirement for the measurement of partial discharges.

En ondes longues (250/2500  $\mu$ s), les résultats sont satisfaisants à 1300 kV, soit 80 kV/mm.

J.A. MORAN (U.S.A) indique que cet essai de choc à chaud constitue une contrainte très importante pour le PRC. Des essais ont été entrepris aux U.S.A. à 130°C (température admise pour la surcharge). Les résultats doivent en être rediscutés et une rationalisation est nécessaire.

C. AUCOURT (F) expose une réflexion sur l'influence que peut avoir, dans ce domaine, la conductivité des mélanges semi-conducteurs. Au niveau de  $10^{-5}$  SIEMENS, valeur admissible selon la CEI, il apparaît -du fait des composantes haute fréquence du choc - un champ diélectrique HF non négligeable (15 % du champ d'interface) à l'intérieur du semi-conducteur. C'est peut-être l'origine du claquage.

C. SIMON (F) fait remarquer que cette étude ne tient pas compte de la variation de conductivité de ce type de mélange conducteur avec le champ électrique.

#### 3.4. Conception du contrôle en ligne

Cette question a été traitée avec la suivante.

#### 3.5. Conception de l'essai de déverminage sans mettre en cause la fiabilité

\* E. DORISON (F) expose le point de vue actuel d'EDF.

La qualité et la fiabilité des câbles sont liées à la taille des impuretés de l'isolant et, donc, à la filtration effectuée. Pour le PEBD, il existe un gradient à ne pas dépasser, qui est - en courant alternatif - de 30 kV/mm.

A partir de là, l'évaluation des câbles passe par des interprétations statistiques de claquages obtenus à un gradient inférieur à ce gradient maximal de danger. On rejettera les essais courts à très haut niveau qui ne révèlent d'ailleurs pas les défauts à évolution lente.

Hors procédure de qualification, EDF procède donc à un contrôle simultané de déverminage et d'évaluation du niveau de qualité, basé sur les lois de WEIBULL (HN 33 S 51), conduisant à 2,5 % de risques Clients, au niveau de qualité choisi par EDF.

L'essai, fixé à 1 heure à 2,2 U<sub>0</sub>, conduit à accepter au maximum 3 claquages pour 18 km de câble.

La démarche est validée par l'expérience.

Il n'y a aucune exigence de mesure de décharges partielles.

C. SIMON (F), referring to his JICABLE Communication (A7-1), explained that the knowledge being currently acquired of the existence of determinable gradient thresholds beyond which the representative parameters of breakdown distribution (WEIBULL) are seriously modified, urged that the use of high fields be limited in debugging and reliability control testing applied to cables.

Despite its relatively high cost (due to the consumption of test samples required for its determination), the threshold field characteristic of the interfaces of a given cable category was well worth determining and using.

Based on his own research work, C. LAURENT (F) explained the possible cause of deterioration occurring in the insulation and arising in the interface beyond a certain field threshold :

- . Multiplication of the field at the level of interface defects.
- . Injection of carriers.
- . Recombination of carriers with luminescence and energy emission in various forms.
- . Deterioration of molecules by this energy in the presence of various additives, mainly oxygen.
- . Irreversible damage to the insulation.

A. TOUREILLE (F) pointed out the ongoing development of a measurement method for space charges by propagation of thermal flow, applicable to cables and probably usable for the detection of a phase in the deterioration process.

H. TAKEHANA (J) presented the tests developed so far in Japan : Apart from conventional testing (insulation, resistance, capacitance), all XLPE cables manufactured underwent test voltage and partial discharge testing in accordance with predetermined cycles.

Test voltage  $V_2$  was determined by the formula :

$$V_2 = (E_0 / \sqrt{3}) \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3$$

Where :

- .  $E_0$  was maximum service voltage for the equipment.
- .  $K_1$  was a multiplying coefficient.
- .  $K_2$  was a safety coefficient equal to 1.1 to take account of transport and laying hazards.
- .  $K_3$  was a temperature coefficient for AC (equal to 1.1).

The value of  $K_1$  varied with voltage level, test duration being generally 10 minutes.

The values of  $K_1$  and  $K = K_1 \times K_2 \times K_3$  are given in the following table :

- \* C. SIMON (F), faisant référence à sa conférence JICABLE (A7-1), expose que la connaissance que l'on acquiert actuellement, de l'existence de seuils de gradients déterminables - à partir desquels les paramètres représentatifs des distributions de claquages (WEIBULL) sont gravement perturbés, incite à limiter l'usage des champs forts dans les essais de déverminage et de contrôle de fiabilité à appliquer aux câbles.

Malgré son coût relativement élevé, du fait de la consommation d'éprouvettes nécessaires à sa détermination, le champ de seuil caractéristique des interfaces d'une catégorie de câble mérite d'être déterminé et exploité.

- \* C. LAURENT (F) expose, à partir de ses recherches, ce que peut être la cause de la dégradation survenant (au-delà d'un certain seuil de champ) à l'isolant à partir d'une interface :

- . Multiplication du champ au droit des défauts d'interface.
- . Injection de porteurs.
- . Recombinaison des porteurs avec luminescence et émission d'énergie sous formes diverses.
- . Dégradation des molécules par cette énergie, en présence d'additifs divers, principalement de l'oxygène.
- . Lésion irréversible de l'isolant.

- \* A. TOUREILLE (F) indique la mise au point, en cours, d'une méthode de mesure de charges d'espace, par propagation de flux thermique, applicable aux câbles et pouvant, probablement, être utilisée pour la détection d'une phase de ce processus de dégradation.

- \* H. TAKEHANA (J) expose les essais mis au point au Japon, à ce jour.

Tous les câbles PRC fabriqués subissent, outre les essais classiques (isolement, résistance, capacité), des essais à tension d'épreuve et des essais de décharges partielles, selon des cycles bien déterminés.

La tension d'épreuve  $V_2$  est déterminée par la formule :

$$V_2 = (E_0/\sqrt{3}) \times K_1 \times K_2 \times K_3$$

Où :

- .  $E_0$  est la tension maximale subie en service par l'équipement.
- .  $K_1$  est un coefficient multiplicateur.
- .  $K_2$  est un coefficient de sécurité égal à 1,1 pour tenir compte des vicissitudes de transport et de pose.
- .  $K_3$  est un coefficient de température pour le courant alternatif (égal à 1,1).

La valeur de  $K_1$  change avec le niveau de tension, la durée d'essai est généralement de 10 minutes.

Les valeurs de  $K_1$  et de  $K = K_1 \times K_2 \times K_3$  sont données par le tableau ci-après :



AC TESTING

Rated voltage (kV)	Maximum system voltage E <sub>0</sub> (kV)	Insulation thickness (mm)	Grounding system	K <sub>1</sub>	K	AC Testing			Service field	
						Voltage (kV)	Max field (kV/mm)	AV field (kV/mm)	E max	E av (**) (kV/mm)
66	69	9 - 11 (*)		2.0	2.42	97	10.0-17.3	8.82-10.8	4.11-7.09	3.62-4.43
77	80.5	11 - 13 (*)	Earthed via an impedance	2.0	2.42	115	10.5-18.0	8.85-10.5	4.24-7.26	3.58-4.23
154	161	23		2.0	2.42	225	12.9-19.3	9.78	5.32-7.96	4.04
275	287.5	27		1.52	1.84	310	15.7-19.7	11.5	8.41-10.6	6.15
500	550	32	Solidly earthed	1.11	1.34	430	21.0-22.9	13.4	15.5-16.9	9.92

(\*) Insulation thickness depends on Utilities Standards

(\*\*) The average field is the ratio between rated earthing voltage and insulation thickness

ESSAIS EN COURANT ALTERNATIF

Tension spécifiée (kV)	Tension maximale du réseau E <sub>0</sub> (kV)	Epaisseur d'isolation (mm)	Système de mise à la terre	K <sub>1</sub>	K	Essai en Courant Alternatif			Champ de service	
						Tension (kV)	Champ maxi (kV/mm)	Champ moyen (kV/mm)	E maxi	E moyen (**) (kV/mm)
66	69	9 - 11 (*)	A mise à la terre à travers une impédance	2.0	2.42	97	10.0-17.3	8.82-10.8	4.11-7.09	3.62-4.43
77	80.5	11 - 13 (*)		2.0	2.42	115	10.5-18.0	8.85-10.5	4.24-7.26	3.58-4.23
154	161	23		2.0	2.42	225	12.9-19.3	9.78	5.32-7.96	4.04
275	287.5	27	Mise à la terre directe	1.52	1.84	310	15.7-19.7	11.5	8.41-10.6	6.15
500	550	32		1.11	1.34	430	21.0-22.9	13.4	15.5-16.9	9.92

(\*) L'épaisseur d'isolation dépend des Normes des Utilisateurs.

(\*\*) Le champ moyen est le rapport entre la tension spécifiée à la terre et l'épaisseur d'isolation.

The partial discharge test consisted of 3 phases :

Two of these phases, the first and the third, were intended to ensure that the cable had no ionising defects at a voltage level 1.3 times the normal voltage  $E_0/\sqrt{3}$  and that the cable has not been damaged by the AC test. Both phases 1 and 3 last around 1 minute, discharges being detected at a low level.

The second phase is performed at test voltage and is intended to ensure the absence of danger of the testing level and of the discharge test N° 1. This phase lasts 10 minutes, like the voltage test.

The Table below summarises these tests :

**PARTIAL DISCHARGE TEST VOLTAGES**

Rated voltage (kV)	Applied voltages (kV)			Permissible partial discharge value (PC)		
	1st phase	2nd phase	3rd phase	1st phase	2nd phase	3rd phase
66	52	97	52	5	30	5
77	61	115	61	5	30	5
154	120	225	120	5	30	5
275	220	310	220	30	30	30
500	415	430	415	30	30	30

\* L'essai de décharges partielles est un essai en 3 phases.

Deux de ces phases, la première et la troisième sont destinées à s'assurer que le câble n'a pas de défauts ionisants à une tension de 1,3 fois la tension simple  $E_0/\sqrt{3}$  et que le câble n'a pas été endommagé par l'essai d'épreuve en courant alternatif. Ces phases 1 et 3 ont une durée de l'ordre de la minute, la détection des décharges s'effectue à faible niveau.

La seconde phase s'effectue au niveau de tension d'épreuve et a pour but de s'assurer de l'absence de danger du niveau d'épreuve et de l'essai de décharge N° 1. Cette phase dure 10 minutes, comme l'essai d'épreuve.

Le tableau ci-dessous résume ces essais :

TENSIONS D'ESSAI DE DECHARGES PARTIELLES

Tensions spécifiées (kV)	Tensions appliquées (kV)			Niveau maximal de décharges admissible (pC)		
	1ère phase	2ème phase	3ème phase	1ère phase	2ème phase	3ème phase
66	52	97	52	5	30	5
77	61	115	61	5	30	5
154	120	225	120	5	30	5
275	220	310	220	30	30	30
500	415	430	415	30	30	30

AC and impulse breakdown tests are conducted on samples at voltages which are the product of average permissible fields for AC and impulse voltage, i.e. 35 kV/mm and 75 kV/mm for insulation thicknesses as defined in 3.1.

These test levels are shown in the table below for each category of cable :

VOLTAGE TESTS ON CABLE SAMPLES

Rated voltage (kV)	Maximum system voltage E <sub>0</sub> (kV)	AC (*) (kV)	BIL (kV)	V IMP (**) (kV)
66	69	195	350	535
77	80.5	225	400	610
154	161	450	750	1135
275	287.5	805	1050	1590
500	550	1090	1550	2260

(\*) Applied for 1 hour

(\*\*) By steps of 3 negative impulses

The Japanese practice of performing the impulse test in three negative impulses only should be noted since it explains the absence of flashover at the voltage levels practiced.

\* Les essais, sur échantillons, s'effectuent en alternatif et en choc à des tensions qui sont le produit des champs moyens admissibles en alternatif et en choc, soit 35 kV/mm et 75 kV/mm, par les épaisseurs d'isolant telles que définies en 3.1.

Ces niveaux d'essais figurent, pour chaque catégorie de câbles, au tableau ci-dessous :

TENSIONS D'ESSAI SUR ECHANTILLONS

Tension spécifiée (kV)	Tension maximale du réseau E <sub>0</sub> (kV)	V Alternatif (*) (kV)	Niveau de choc requis (kV)	V Choc (**) (kV)
66	69	195	350	535
77	80.5	225	400	610
154	161	450	750	1135
275	287.5	805	1050	1590
500	550	1090	1550	2260

(\*) Appliqué durant 1 heure.

(\*\*) Par paliers de trois chocs négatifs.

On notera la pratique japonaise de l'essai de choc, en 3 chocs négatifs seulement, qui explique l'absence de contournement au niveau de tension pratiqué.

### 3.6 Necessity and modalities of the after-laying test

An after-laying test was recognised to be necessary by all discussants, but their opinion as to its nature and level of severity differed considerably, particularly since the test applied both to cables and to accessories.

H. AUCLAIR (F) considered that in case of defects due to laying or assembly, this defect concerned first and foremost the outer jacket of the cable and that a DC sheath test therefore revealed poor assembly : If the sheath was sound, no further testing was required. If it was not sound, expert examination was necessary.

As to jointing defects, a DC test (3 to 5 U<sub>0</sub>) could be used. This test was not altogether satisfactory and a CIGRE Working Group had been entrusted with an investigation leading to proposals : WG 21-09 had launched a study based on the oscillating waves method and the conclusions were due in 18 months time.

C. AUCOURT (EDF), who contributes to the work of CIGRE WG 21-09, gave details of the oscillating waves method. The cable was charged with DC voltage and discharged into a self-inductance. Three types of defect had been tested successfully. The breakdown level was close to that observed at 50 Hz with 50 impulses, equivalent to about 5 minutes. Scatter obtained for oscillating wave breakdown was slight. The risk of deterioration introduced was unknown and was to be investigated. On greater lengths the wave would be distorted due to circuit capacitance; however, according to F. FARNETTI (I), this phenomenon was of little importance for links from 1 to 10 km. It might prove necessary to reduce the wave frequency.

For J. BECKER (B), the DC test destroyed accessories of older systems and should therefore be reserved exclusively for entirely new links.

S. NAGASAKI (J) explained the controls effected in Japan, where the after-laying test was a "legal" test.

### 3.6 Nécessité et mode de réalisation de l'essai après pose

Un essai, après pose, est reconnu comme nécessaire par l'ensemble des intervenants, mais les avis sur sa nature et son niveau de sévérité sont assez différents, ce d'autant plus que l'essai s'applique aux câbles et à leurs accessoires.

\* H. AUCLAIR (F) pense que, s'il y a eu un défaut de pose ou de montage, ce défaut affecte d'abord et principalement la gaine extérieure du câble et que, donc, un essai de gaine en courant continu est révélateur d'un mauvais montage.

Si la gaine est saine, aucun autre essai n'est nécessaire.

Si elle ne l'est pas, une expertise s'impose.

Pour ce qui concerne les défauts de raccordement, un essai en courant continu (3 à 5 U<sub>o</sub>) peut être utilisé. Cet essai ne donne pas toute satisfaction et un Groupe de Travail CIGRE a été chargé d'enquête et de proposition. Ce GT 21-09 a lancé une étude (fondée sur la méthode des ondes oscillantes), dont les conclusions sont attendues dans 18 mois.

\* C. AUCOURT (F), qui contribue aux Travaux du Comité CIGRE 21-09, donne des précisions sur la méthode des ondes oscillantes. Le câble est chargé en courant continu et déchargé dans une self. Trois types de défauts ont été testés avec succès. Le niveau de claquage est voisin du niveau de claquage à 50 Hz, et 50 chocs équivalent à peu près à 5 minutes.

La dispersion obtenue, dans les claquages en ondes oscillantes, est faible.

Le risque de dégradation introduit n'est pas connu et va faire l'objet d'investigations.

Sur de très grandes longueurs, l'onde, du fait de la capacité du circuit, peut se déformer ; mais, selon F. FARNETTI (I), ce phénomène joue peu pour des liaisons de 1 à 10 km. Il faudrait peut-être réduire la fréquence de récurrence d'onde.

\* Pour J. BECKER (B), l'essai en courant continu est un essai tout à fait destructeur pour les accessoires de réseau anciens et doit donc être réservé aux liaisons intégralement neuves.

\* S. NAGASAKI (J) expose le contrôle réalisé au Japon, où l'essai après pose est un essai "légal".



This test, which lasted 10 minutes, is performed with AC current at a voltage :

$$VF_{ac} = E_o \times U, U \text{ being a multiplier}$$

or in DC at double voltage :

$$VF_{dc} = 2 \times VF_{ac}$$

The value of U depended on cable series and on the operating mode of the system. This value was presented in the following Table :

AFTER-LAYING TESTS

Rated Voltage (kV)	Maximum system voltage E <sub>o</sub> (kV)	U	AC Withstand voltage VF <sub>ac</sub> (kV)	DC Withstand voltage VF <sub>dc</sub> (kV)
66	69	1.1	75.9	151.8
77	80.5	1.1	88.6	177.1
154	161	1.1	177.1	354.2
275	287.5	0.72 (0.64*)	207 (184*)	414 (368*)
500	550	0.72 (0.64*)	396 (352*)	792 (704*)

(\*) This voltage is only applied to cables installed in substations when the neutral point is grounded directly

Other tests can be required by utilities to ensure the absence of defects on completed cable systems :

- (1) DC leakage current measurement
- (2) Partial discharge test
- (3) Dielectric dissipation measurement
- (4) Insulation resistance test etc.

L'essai, d'une durée de 10 minutes, est réalisé en courant alternatif à une tension :

$$V_{FAC} = E_0 \times U \quad \text{où } U \text{ est un multiplicateur}$$

ou en courant continu à tension double :

$$V_{FDC} = 2 \times V_{FAC}$$

La valeur de  $U$  dépend des séries de câbles et du mode de fonctionnement du réseau. Cette valeur est exposée au Tableau ci-après :

ESSAIS APRES POSE

Tension spécifiée (kV)	Tension maximale du réseau $E_0$ (kV)	$U$	Essai en Courant Alternatif $V_{FAC}$ (kV)	Essai en Courant Continu $V_{FDC}$ (kV)
66	69	1.1	75.9	151.8
77	80.5	1.1	88.6	177.1
154	161	1.1	177.1	354.2
275	287.5	0.72 (0.64*)	207 (184*)	414 (368*)
500	550	0.72 (0.64*)	396 (352*)	792 (704*)

\* Cette tension n'est appliquée qu'aux câbles posés dans des postes, quand le point neutre est directement à la terre.

D'autres essais peuvent être demandés par les utilisateurs pour s'assurer de l'absence de défauts sur liaisons en place :

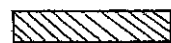
- (1) Mesure de courant de fuite.
- (2) Essai de décharges partielles.
- (3) Mesure des pertes diélectriques.
- (4) Résistance d'isolement, etc...

Some specifications require additional tests, the entire problem having been presented in JICABLE 87 Document A10.

The results obtained were excellent for 66 kV cables, where no defects were recorded for DC testing.

This was not the case when old 22 kV cables subject to water treeing or their old accessories underwent testing of this type and numerous DC voltage breakdowns then occurred. The results are set out in the following Table :

		Years							
		0	3	6	9	12	15	15	Number
22 kV	CABLES	Water treeing							14
		Defects							3
	ACCESSORIES	Water penetration							8
		Other defects							6
66 kV	CABLES	Defects							6
	ACCESSORIES	Water penetration							5
		Other defects		9					
Type of product		0						15	
/									
Years			3	6	9	12	15		



Breakdown during endurance testing



Breakdown in service


RATIO BETWEEN SERVICE DURATION AND OCCURRENCE OF DEFECTS.

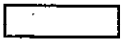
Certains spécificateurs demandent également d'autres essais, l'ensemble du problème a été exposé dans le Document A10 de JI-CABLE 87.

Les résultats obtenus sont excellents pour les câbles 66 kV, où aucun défaut n'est apparu en courant continu.

Il n'en va pas de même lorsque les câbles 22 kV anciens et sujets aux arborescences d'eau ou leurs accessoires, également anciens, sont soumis à des essais de ce type et de nombreux claquages sous Tension Continue apparaissent alors. Ces résultats sont exposés dans le Tableau ci-après :

22 kV	CABLES	Arborescences d'eau								14
		Défauts								3
	ACCESSOIRES	Pénétration d'eau								8
		Autres défauts								6
66 kV	CABLES	Défauts								6
	ACCESSOIRES	Pénétration d'eau								5
		Autres défauts		9						16
Types de produits			0						15	Nombre
Années				3	6	9	12	15		

 Claquages en essais d'endurance.

 Claquages en service.

RELATION ENTRE DUREE DE SERVICE ET APPARITION DE DEFAUTS.

M.S. PAPADOPULOS (UK), member of CIGRE Working Group 21-09, concluded the discussion with the information that 16 countries had replied to the WG's questionnaire, some of them indicating defects observed when loading after the DC test, even on entirely new systems. A new type of test appeared to be necessary.

S. NAGASAKI (J) stated that Japan was still using the DC test but would be delighted to have a better quality test available.

- \* M.S. PAPADOPULOS (GB), Membre du Groupe de Travail CIGRE 21-09, conclut ce débat en indiquant que 16 pays ont répondu au questionnaire du GT, certains annonçant des défauts à la mise sous tension après l'essai en courant continu, même sur des installations intégralement neuves. Un nouveau type d'essai paraît nécessaire.
  
- \* S. NAGASAKI (J) indique que le Japon en est à l'essai en courant continu, mais serait ravi de pouvoir disposer d'un essai de meilleure qualité.

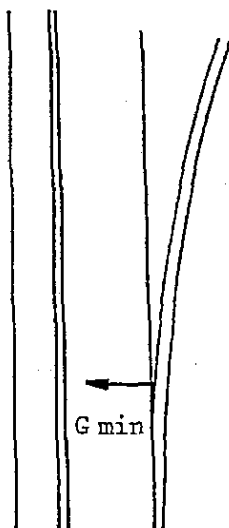
#### 4. ACCESSORIES

Some ten specialists expressed their opinions.

##### 4.1 Technologies for accessories adapted to operate at high gradients

S. NAGASAKI and K. YATSUKA (J) described the current situation in their country and, more particularly, gave the gradients at the interface with the outer semiconductor.

VOLTAGE U	66 - 77 kV	154 - 187 kV	275 kV
Electric gradient in service kV/mm (G min)	- 12 - 10 - 8 - 6 - 4 - 2		



G min = Max permissible gradient at point where it is minimum in cable.

The minimum gradient (G min) increased with service voltage and suitably adapted accessories were required.

Their characteristics ensured faultless performance up to the values of G min shown in the Table below which, it will be observed, could differ according to the type adopted.

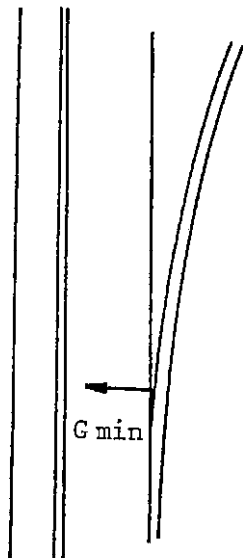
#### 4. LES MATERIELS DE RACCORDEMENT

Une dizaine de spécialistes donnent leur avis.

##### 4.1. Technologies d'accessoires adaptées à un fonctionnement sous gradient élevé

S. NAGASAKI et K. YATSUKA (J) exposent la situation actuelle dans leur pays et notamment indiquent les gradients au niveau de l'interface avec le semi-conducteur extérieur.

TENSION U	66 - 77 kV	154 - 187 kV	275 kV
Gradient électrique en service kV/mm (G min).	- 12 - 10 - 8 - 6 - 4 - 2		



G. min. = valeur MAX. du gradient admissible au point où il est minimum dans le câble.

Le gradient minimum (G min) augmente avec la tension de service et il faut associer des accessoires adaptés.

Les caractéristiques de ceux-ci permettent un service sans défaillance jusqu'aux G. min. indiqués au tableau ci-dessous qui, on le remarquera, peuvent différer avec le type retenu.



G min currently adopted

Type of accessory	G min kV/mm
Oiled paper	4,5
Moulded	4
Prefabricated	3,5
Taped	3,5

At G min gradients higher than the above values, there will be problems and a solution has to be found to improve the performance of current joints.

P. DEJEAN (F) pointed out that while the idea of using a high permittivity layer on cables had not been adopted by his Company, this type of material was used for High Voltage terminations.

If these terminations were considered to be two plane capacitors in series, C1 and C2, geometrically identical (equal surface areas S and thicknesses e), of respective permittivities  $\epsilon_1$  and  $\epsilon_2$ , to which a voltage differential V (assumed to be ac) was applied,

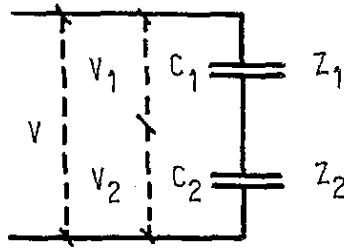
G min. couramment retenu :

Type d'accessoire	G min. kV/mm
Papier huilé	4,5
Moulé	4
Préfabriqué	3,5
Rubané	3,5

Si l'on va vers des gradients G min. plus élevés supérieurs à ceux-ci, cela pose un problème et il faut trouver une solution pour améliorer les performances des jonctions actuelles.

P. DEJEAN (F) indique que si l'idée d'utiliser une couche de haute permittivité sur les câbles n'a pas été retenue par sa société, ce type de matériau est cependant utilisé pour la réalisation des extrémités Haute Tension.

Si ces extrémités sont assimilées à deux condensateurs plans en série C1 et C2 géométriquement identiques (surface S et épaisseur e égales), de permittivités respectives 1 et 2, auxquels on applique une différence de potentiel V que nous supposons être alternative,



voltages V1 and V2 would be distributed as follows :

$$V_1 = V \cdot \epsilon_2 / (\epsilon_1 + \epsilon_2) \qquad V_2 = V \cdot \epsilon_1 / (\epsilon_1 + \epsilon_2)$$

This meant that the higher capacitance underwent practically no voltage stress, whereas the lower capacitance had to bear virtually the entire voltage stress applied to the two capacitors in series.

The association of an earth electrode enabled the distribution of field lines to be controlled.

When these terminations were made with heatshrinkable sheaths, they had the advantage of being adaptable to several different diameters.

A large number of them had been operating up to 145 kV for several years without any problems to date. The use of this principle was currently being considered for the 245 kV level.

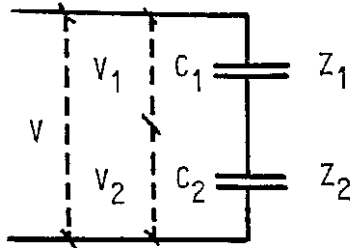
For P. METRA (I), the performance of prefabricated joints, which had the advantage of being factory-controlled, were suitable up to a G min of 5 kV/mm, a higher value than that given by S. NAGASAKI (J), and they were thus likely to represent the initial path towards higher gradients.

When factory controlled, they withstood an electric strength of 2 to 2.5 U<sub>o</sub> ac, like cables, and a dc after-laying test of 4 to 4.5 U<sub>o</sub>.

R. JOCTEUR (F) recalled the performance of joints moulded in situ, though they were not perfect inasmuch as they were always liable to an error or poor workmanship on the part of the fitter assembling them. For high voltage applications, he therefore preferred prefabricated equipment.

\* For terminations, he considered there to be no problem up to 6 kV/mm minimum gradient.

\* For joints, things were more complex and so far, while the problems were perfectly solved up to 150 kV, it became more awkward at 220 - 275 kV and above. The 5 kV/mm gradient seemed to him to be the acceptable level for current equipment.



les tensions  $V_1$  et  $V_2$  se répartissent comme suit :

$$V_1 = \frac{V \times \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2} \qquad V_2 = \frac{V \times \epsilon_1}{\epsilon_1 + \epsilon_2}$$

Ceci signifie que la capacité la plus élevée n'est pratiquement soumise à aucune contrainte de potentiel tandis que la capacité la plus faible doit supporter la quasi totalité de la contrainte de potentiel appliquée à ces deux condensateurs en série.

L'association d'une électrode de garde permet de contrôler la répartition des lignes de champ.

Ces extrémités, lorsqu'elles sont réalisées au moyen de gaines thermo-rétractables, présentent l'avantage de pouvoir s'adapter à plusieurs diamètres.

Un grand nombre d'entre elles fonctionnent jusqu'à 145 kV depuis plusieurs années sans le moindre problème à ce jour. L'utilisation de ce principe est envisagée actuellement pour le niveau 245 kV.

Pour P. METRA (I) les performances des jonctions préfabriquées qui peuvent être contrôlées en usine peuvent convenir jusqu'à un G. min. de 5 kV/mm, donc supérieur à celui indiqué par S. NAGASAKI (J) et elles sont donc susceptibles de permettre une première avance vers de plus hauts gradients.

Elles supportent au contrôle en usine une rigidité de 2 à 2,5  $U_0$  sous tension alternative comme les câbles et un essai après pose en courant continu de 4 à 4,5  $U_0$ .

R. JOCTEUR (F) rappelle les performances des jonctions moulées sur site qui cependant ne sont pas parfaites car toujours tributaires d'une erreur ou d'une maladresse de l'ouvrier qui les réalise. Il leur préfère donc en haute tension les matériels préfabriqués.

\* Pour les extrémités il estime ne pas avoir de difficulté jusqu'à 6 kV/mm de gradient minimum.

\* Pour les jonctions ceci est plus compliqué et à ce jour, si cela est parfaitement réglé jusqu'à 150 kV, cela devient plus délicat en 220 - 275 kV et au dessus. Le gradient de 5 kV/mm lui paraît le niveau acceptable avec les matériels actuels.

## 4.2 Assembly of accessories

B. GREGORY (UK) stressed the importance of fitters' qualifications and considered that the quality of the accessory was entirely dependent on the skill of the fitter. This was equally true for oil cables, SF<sub>6</sub> terminations and other accessories.

This meant that training was vital, accompanied by testing of the accessory fitted. In the UK, for example, the equipment must pass the following test :

3 Uo for 3 hours dielectric strength.

2.5 pC partial discharge.

A failure rate of 10 % has been recorded.

Working conditions were also important :

- \* Lighting, which was not always satisfactory.
- \* Cleanliness, requiring air filtering.
- \* Staff behaviour, dirty clothing.

Even with prefabricated joints, vigilance was needed and the speaker feared that there would be many problems if these accessories were stressed to a substantially greater degree.

He concluded by asking whether crosslinked moulded joints were used in Japan on XLPE-insulated 275 kV cables.

S. NAGASAKI (J) was unable to give a specific answer to this question, since the work was performed by several companies using different methods. This being so, no single answer was applicable, some firms using retractable prefabricated tubes, particularly for the reconstitution of semiconducting layers.

J. LEPERS (F) also stressed the importance of training and the need to maintain a high degree of motivation among fitters.

## 4.3 Qualification and control testing

R. JOCTEUR (F) recalled that prefabricated joints were factory checked. This had a considerable advantage as regarded the reliability of accessories, without of course affecting fitting.

E. DORISON (F) described EDF practice : Like cables, accessories underwent qualification tests :

- There were short tests. A jumper comprising terminations and joints mounted on a cable underwent impulse testing at service temperature + 5°C, ten impulses in each polarity.

#### 4.2. Mise en oeuvre des accessoires

B. GREGORY (UK) met l'accent sur l'importance de la qualification des monteurs et il estime que la qualité de l'accessoire est entièrement dépendante de l'habileté de celui qui le réalise. C'est vrai pour les jonctions des câbles à huile, pour les extrémités SF6 et aussi pour les autres matériels.

Il faut donc une formation des hommes concrétisée par des essais sur le matériel réalisé. Par exemple, en Angleterre il est imposé que celui-ci passe pour test :

3 Uo 3 heures en rigidité diélectrique.

2,5 pC. en décharges partielles.

Un taux de 10 % d'échec est enregistré.

Il y a aussi les conditions de travail :

- \* L'éclairage, qui n'est pas toujours bon.
- \* La propreté, qui nécessite de filtrer l'air.
- \* La tenue du personnel, vêtements souillés.

Même avec les jonctions préfabriquées il faut être vigilant et l'orateur craint qu'il n'y ait beaucoup de problèmes si ces matériels doivent être davantage sollicités.

Il termine son intervention en demandant si au Japon on utilise des jonctions moulées réticulées sur câbles 275 kV à isolation PRC.

S. NAGASAKI (J) ne peut pas apporter une réponse précise à cette question, ces travaux étant réalisés par plusieurs compagnies dont les méthodes diffèrent. Il n'y a donc pas de réponse unique, certains utiliseront des tubes préfabriqués rétractables, notamment pour reconstituer les couches semi-conductrices.

Dans son intervention J. LEPERS (F) met également l'accent sur la formation des personnels et sur la nécessité d'entretenir en permanence leur motivation.

#### 4.3. Essais de type et de contrôle

R. JOCTEUR (F) rappelle que les jonctions préfabriquées sont contrôlées en usine. Cela présente un avantage considérable pour la fiabilité des liaisons, ceci bien entendu indépendamment du montage.

E. DORISON (F) expose la pratique d'Electricité de France.

Les accessoires subissent comme les câbles des essais de type.

- \* Il y a les essais courts. Une bretelle comportant des extrémités et une jonction montées sur un câble est soumise à un essai de chocs à chaud, à la température de service + 5°C, dix chocs dans les deux polarités.

Cable type	63 kV	90 kV	225 kV	400 kV
Impulse test voltage	325 kV	550 kV	1050 kV	1425 kV
Test voltage 50 Hz/24 h	130 kV	180 kV	350 kV	500 kV

- There were also long-term tests of 6 000 hours with heating/cooling cycles of 8 hours/16 hours bringing the conductor up to service temperature + 10°C for 167 cycles, followed by overload temperature + 5°C for 83 cycles at  $\sqrt{3}$  U<sub>o</sub> on a loop fitted with the accessories to be qualified.

He justified this test by the slow development of certain phenomena such as shrinking and corrosion.

The components used had to correspond to a specification drawn up to guarantee the stability of characteristics and of operating modes.

Suppliers had to be able to prove the use of a Quality Assurance system.

P. DEJEAN (F) checked high permittivity equipment :

- \* breakdown gradients.
- \* permittivity versus the voltage applied.
- \* permittivity versus ageing.
- \* the qualities and durability of interface products (grease, gels...).

For on site testing, S. NAGASAKI (J) presented a Table showing that the after-laying dc test had induced 6 accessory breakdowns ; however, three other defects leading to failures on commissioning had not been detected.

For the other discussants, the after-laying accessories test was part of the overall problem of after-laying tests : the application of dc current was not appropriate.

It was necessary to await the result of CIGRE's work to ascertain whether the damped oscillating wave method would bring a solution or not.

Type de câble	63 kV	90 kV	225 kV	400 kV
Tension d'essai de choc	325 kV	550 kV	1050 kV	1425 kV
Puis tension d'essai 50 Hz/24 h	130 kV	180 kV	350 kV	500 kV

\* Il y a l'essai de longue durée de 6000 heures avec cycles de chauffage refroidissement 8 heures - 16 heures portant l'âme à la température de service + 10 °C pendant 167 cycles puis à la température de surcharge + 5 °C pendant 83 cycles sous tension de 3 U<sub>o</sub> réalisé sur une boucle équipée des accessoires à qualifier.

E.DORISON (F) justifie cet essai par l'évolution lente de certains phénomènes comme la rétraction et la corrosion.

Les composants utilisés doivent répondre à une spécification qui a été établie pour garantir une stabilité des caractéristiques et des modes opératoires.

Les fournisseurs doivent pouvoir justifier d'un système d'Assurance de la Qualité.

P. DEJEAN (F) contrôle sur les matériaux de haute permittivité :

- \* les gradients de claquage.
- \* la permittivité en fonction de la tension appliquée.
- \* la permittivité en fonction du vieillissement.
- \* les qualités et la pérennité des produits d'interfaçage (graisse, gels, ...).

Pour les essais sur site S. NAGASAKI (J) présente un tableau d'où il ressort que l'essai en courant continu après installation a provoqué six claquages d'accessoires, cependant trois autres défauts qui amènent des défaillances dès la mise en service n'ont pas été décelés.

Pour les autres intervenants, l'essai des accessoires après installation des liaisons rejoint le problème général des essais après pose : l'application d'une tension continue n'est pas appropriée.

Il faut attendre le résultat des travaux CIGRE pour savoir si l'onde oscillante amortie apportera la solution.



## 5. OPERATING PROBLEMS

For J. SHINAGAWA (J) capacitive currents were negligible up to a voltage level of 66 kV. Beyond that threshold, XLPE cables have a distinct advantage over oil-filled cables due to the fact that their relative dielectric constant was one third less and that insulation thickness was greater. Thus the effect of capacitive current on power transmission capacity affected OF cables considerably more, as was shown in figure 15.

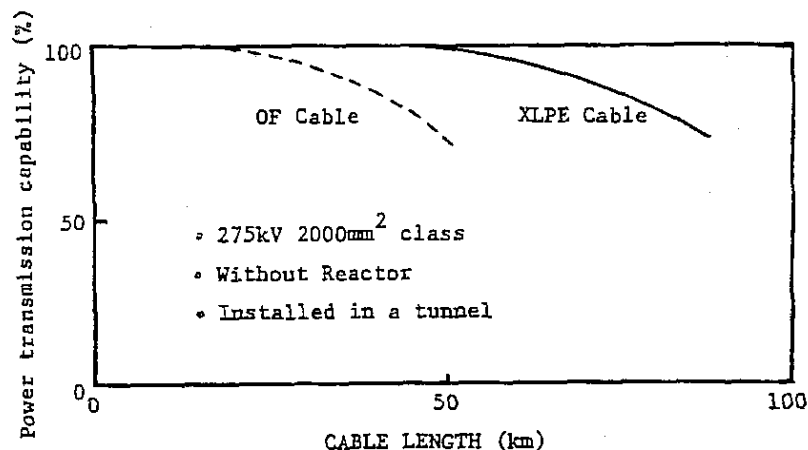


Figure 15 : power transmission capacity as a function of distance  
Given the lengths normally encountered in systems of under 30 km, capacitive current was not an important limiting factor.

Similarly, losses in XLPE cables, which were of the order of  $10^{-3}$  W/cm, were not a limiting factor for the gradient.

The maximum operating temperature for XLPE cables should be compatible with the electric and mechanical properties of the insulation at high temperature and with the risk of insulation deterioration for a service life of at least 30 years. The critical problem, in fact, was the cable's thermomechanical behaviour, given XLPE's expansion coefficient, which was 20 greater than that of copper. This problem had to be solved by a judicious choice of the thickness and pitch of copper tape and wire, in cases of shields of this type, and with cushion layers. With copper shields, the cleats should be spring-loaded or contain spacers to avoid deformations.

Finally, by reducing insulation thickness, increased service gradients facilitate the solution of these problems.

A test loop had been installed at the CRIEPI Yokosuka Laboratory to test a 275 kV/3 000 mm<sup>2</sup> Cu 24 mm XLPE cable with moulded joints at 280 kV with cycling at 90 and 105°C (figure 16).

## 5. LES PROBLEMES D'EXPLOITATION

Pour J. SHINAGAWA (J), les courants capacitifs sont négligeables jusqu'à la tension de 66 kV. Au delà, les câbles à isolation synthétique présentent un avantage très sensible sur les câbles à huile fluide parce qu'ils ont un pouvoir inducteur spécifique réduit du tiers et parce que l'épaisseur d'isolant est plus grande. L'effet du courant capacitif sur la capacité de transport affecte donc beaucoup plus les câbles à huile, comme le montre la figure 15.

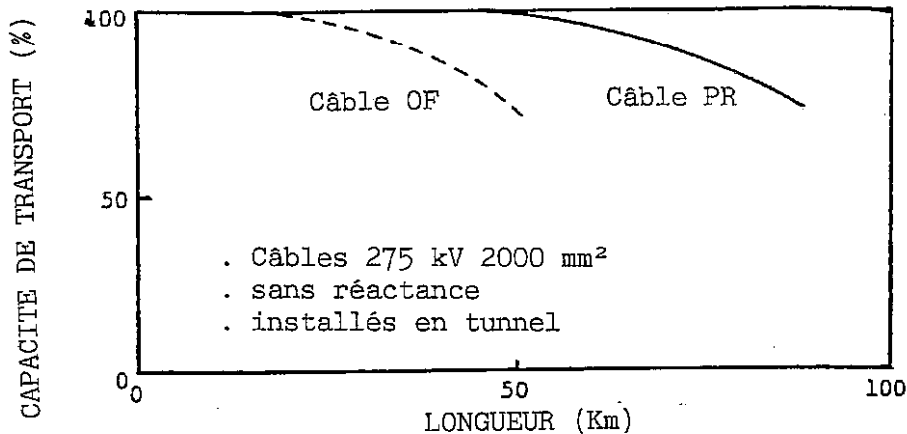


Figure 15 : Capacité de transport d'énergie en fonction de la longueur du câble.

Compte tenu des longueurs généralement rencontrées dans les réseaux, inférieures à 30 km, le courant capacitif n'est pas une contrainte importante.

De même, les pertes dans les câbles à isolation synthétique, de l'ordre de  $10^{-5}$  W/cm, ne sont pas un facteur limitatif pour le gradient.

La température maximale d'exploitation des câbles PRC doit être compatible avec les propriétés électriques et mécaniques de l'isolation à température élevée et les risques de détérioration de l'isolant pour assurer une durée de vie d'au moins 30 ans. Le problème critique est en fait le comportement thermomécanique du câble, compte tenu du coefficient de dilatation du PRC, 20 fois supérieur à celui du cuivre. Il doit être résolu par un choix approprié de l'épaisseur et du pas des rubans et des fils de cuivre, dans le cas des écrans de ce type, et avec des matelas de compression. Avec les écrans en cuivre, les colliers doivent comporter des ressorts ou des matelas pour éviter des déformations.

En définitive, l'augmentation du gradient de service, réduisant l'épaisseur d'isolation, favorise la résolution de ces problèmes.

Une boucle d'essai a été réalisée au Laboratoire Yokosuka du CRIEPI pour tester un câble avec jonctions moulées 275 kV, 3.000 mm<sup>2</sup> Cu, 24 mm de PRC, sous 280 kV avec des cycles à 90 et 105 °C (figure 16).

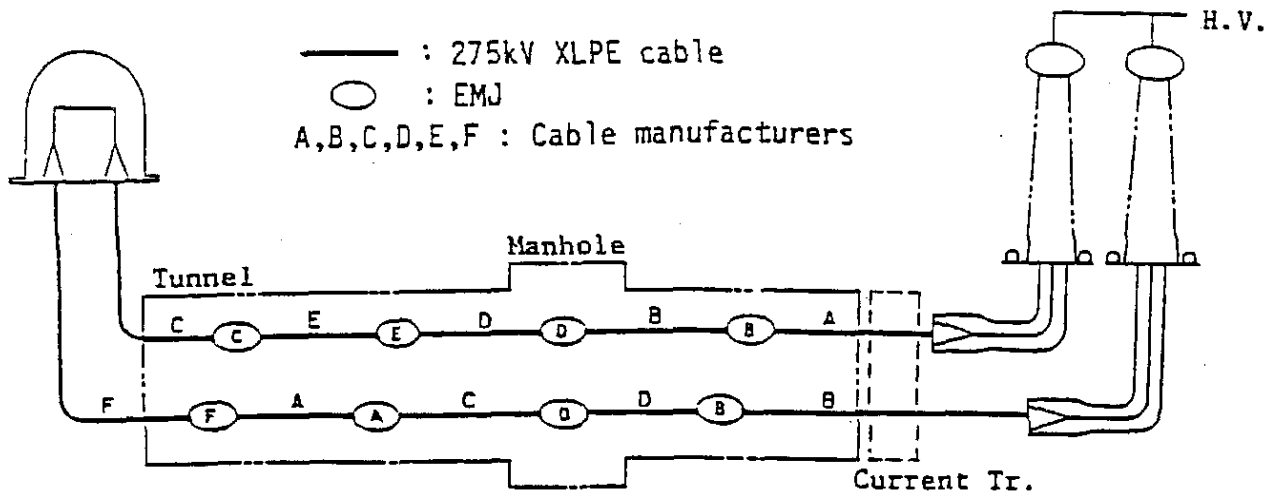


Figure 16 : test loop on 275 kV cable at CRIEPI

D. ROY (F) had calculated the effect of reducing the insulation thickness of a 150 kV/630 mm<sup>2</sup> Al cable from 20 mm to 15 mm : capacitive current increased from 4.8 A/km to 5.89 A/km per phase (+ 23 %), dielectric losses from 0.415 to 0.510 W/m per phase and permissible current from 890 A to 900 A in the air and from 686 A to 690 A in the ground. These differences were only slight with the possible exception of capacitive current.

Reducing insulation thickness decreased cable weight and diameter, which facilitated laying.

He concluded from the foregoing that increasing insulation gradient had significant effects solely on capacitive current, which might require a permissible reinforcement of compensation.

For E. DORISON (F), on the one hand, increased service gradients had penalising effects for transmission capacity : increased dielectric losses, greater thermal resistance of serving and of outer thermal resistance (unless it was decided to reduce the size of troughs), while on the other hand there was a favourable effect inasmuch as thermal resistance between conductor and shield was reduced.

Of all these parameters, the value of the dielectric angle was the determining factor since it could induce either an increase or a decrease of transmission capacity when insulation thickness was reduced, according to the case.

For example, if the insulation thickness of a 400 kV bunched cable with cross-bonded shields was reduced from 23 mm to 17 mm, transmission capacity dropped 1.5 % if  $\tan\delta$  was equal to  $23.5 \cdot 10^{-4}$  (the value taken in IEC 853), while it increased by 2.3 % if  $\tan\delta$  was equal to  $4 \cdot 10^{-4}$  (as stipulated in EDF specification HN-33-S-54).

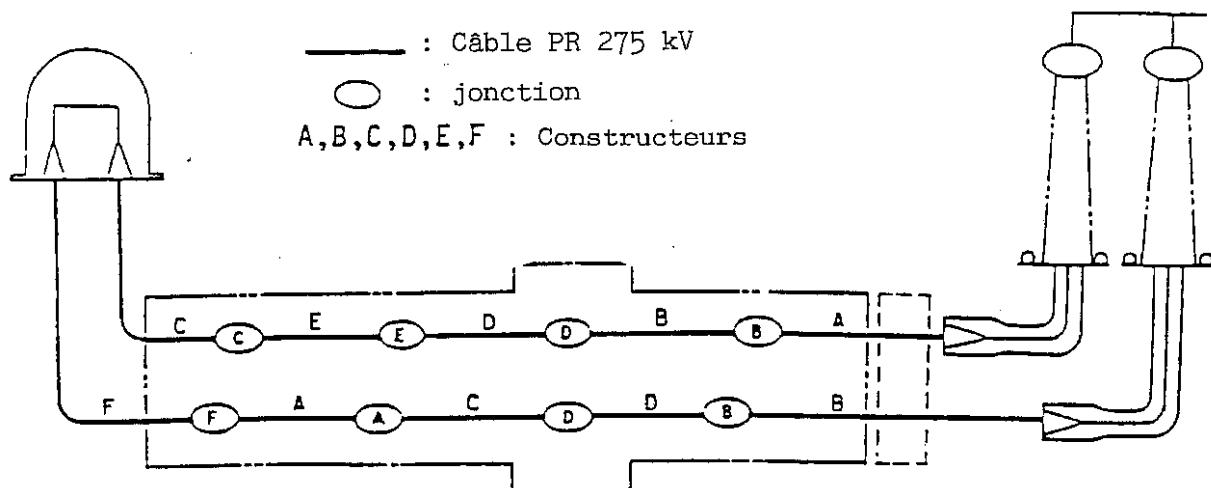


Figure 16 : Installation d'essai de câbles 275 kV.

D. ROY (F), a calculé l'incidence d'une réduction de l'épaisseur d'isolant d'un câble 150 kV/630 mm<sup>2</sup> Al de 20 mm à 15 mm :

Le courant capacitif augmente de 4,8 A/km à 5,89 A/km par phase (+23 %), les pertes diélectriques de 0,415 à 0,510 W/m par phase, et l'intensité admissible de 890 A à 900 A dans l'air et de 686 A à 690 A en terre. Ces écarts sont peu sensibles, sauf peut-être pour le courant capacitif.

Une réduction de l'épaisseur d'isolant diminue le poids et le diamètre du câble, ce qui est favorable pour la pose.

Il en conclut donc que l'augmentation du gradient de service n'a d'incidence sensible que sur le courant capacitif, ce qui peut nécessiter un renforcement admissible de la compensation.

Pour E. DORISON (F), l'augmentation du gradient de service a d'un côté des effets pénalisants pour la capacité de transport: augmentation des pertes diélectriques, de la résistance thermique du revêtement et de la résistance thermique externe (sauf si on peut réduire la taille des caniveaux), et d'un autre côté un effet favorable parce que la résistance thermique entre âme et écran est diminuée.

De tous ces paramètres, c'est la valeur de l'angle de perte des diélectriques qui est déterminante et qui peut conduire, selon le cas, à une augmentation ou à une diminution de capacité de transport lorsqu'on réduit l'épaisseur d'isolant.

Par exemple, si l'on réduit l'épaisseur d'isolation de 23 mm à 17 mm d'un câble 400 kV posé en nappe avec permutation d'écrans, la capacité de transport diminue de 1,5 % si la  $\tan\delta$  est égale à  $23,5 \cdot 10^{-4}$  (comme considéré dans la CEI 853), et elle augmente de 2,3 % si la  $\tan\delta$  est égale à  $4 \cdot 10^{-4}$  (comme stipulé dans la spécification EDF HN-33-S-54).

All in all, for the majority of parameter variations it was possible to take into account, transmission capacity variations were less than 2 %. For M. LEUFKENS (NL), the compensation of capacitive currents was complex and the Dutch utilities had been pleased to move from OF cables to XLPE insulation. They would not be prepared to accept a contrary trend due to increased gradients.

G. BERNARD (F) pointed out, however, that the reduction of capacitance due to changing from OF insulation to XLPE was far greater than the increase due to the contemplated gradient increases.

One unfavourable factor in increasing service gradient was pointed out by PAULIN (F). Increased outer cable temperature could have considerable drawbacks for certain links which are permanently loaded, such as outgoing cables from power stations. In this respect, E. DORISON (F) stated that in the case of a 400 kV/2 000mm<sup>2</sup> (Cu) cable, sheath temperature when buried in the earth would rise from 63.5°C to 66.3°C if insulation thickness was reduced from 23 to 17 mm. The consequences of this were far from obvious.

For C. SIMON (F), reduction of insulation thickness affected the entire cable at a higher average temperature and could therefore decrease its service life.

In the light of his operating experience, J. LEPERS (F) described the main factors determining cable reliability :

- 1) Design and manufacture, which were based on the manufacturer's scientific and technical knowhow. This could be improved mainly by better knowledge and by improving industrial facilities where human intervention should be minimised, leaving the maximum to automation.
- 2) Transport, installation and testing : these operations were highly dependent on human knowhow. To increase their reliability, packaging needed to be improved, fitters and operating staff better trained and prefabricated accessories further developed. On site sheath testing was useful.
- 3) Under operational conditions, external aggressions were the main cause of failures. Action should be taken to ensure their prevention ; this should involve laying and the coordination of earth working.
- 4) An exceptional defect occurring in a link shortly after its commissioning was more readily accepted than if it occurred several years later. This being so, testing the main insulation after laying a new link could be omitted.

Globalement, pour la plupart des variations de paramètres qu'il est possible de prendre en compte, les variations de capacité de transport restent inférieures à 2 %.

Pour M. LEUFKENS (NL), la compensation des courants capacitifs est complexe, et les exploitants Hollandais ont été heureux de passer de l'isolation à l'huile fluide à l'isolation PRC parce que cela a entraîné une réduction de capacité des câbles. Ils n'accepteraient pas une évolution inverse par suite d'un accroissement des gradients.

G. BERNARD (F), remarque cependant que la réduction de capacité par passage de l'isolation à l'huile fluide à l'isolation au PRC est bien plus grande que l'augmentation entraînée par les accroissements envisagés des gradients.

Un facteur défavorable de l'augmentation de gradient de service est signalé par PAULIN (F). L'accroissement de la température externe des câbles, peut présenter des inconvénients importants pour certaines liaisons qui ont une charge permanente, telles que les sorties de centrales. A ce propos E. DORISON (F), précise que dans le cas d'un câble 400 kV/2000 mm<sup>2</sup> (Cu) la température sur gaine, pour une pose en nappe enterrée en pleine terre, passerait de 63,5°C à 66,3°C si l'on réduisait l'épaisseur d'isolant de 23 à 17 mm. La conséquence n'est pas évidente.

Pour C. SIMON (F), la réduction d'épaisseur d'isolant ayant pour effet de faire travailler l'ensemble du câble à une température moyenne plus élevée, peut affecter sa durée de vie.

Fort de son expérience d'exploitant, J. LEPERS (F), expose les principaux facteurs qui déterminent la fiabilité des câbles :

- 1) la conception et la fabrication du câble : elles reposent sur la capacité scientifique et technique du constructeur. Elle est perfectible essentiellement par l'amélioration des connaissances, et par celle de l'outil industriel sur lequel l'homme doit intervenir le moins possible en laissant la place à l'automatisation.
- 2) le transport, l'installation, et les essais: ces opérations dépendent beaucoup du savoir-faire des hommes. Pour les rendre plus fiables, il faut améliorer les conditionnements, mieux former les installateurs et les exploitants, développer les accessoires préfabriqués. L'essai de vérification de la gaine est utile.
- 3) En exploitation : les agressions externes sont la principale cause de défaillance. Des actions sont à entreprendre pour leur prévention en agissant sur l'installation, et sur la coordination des travaux dans les sols.
- 4) Un défaut exceptionnel apparaissant sur une liaison peu de temps après sa mise en service peut être plus facilement accepté que s'il intervient après quelques années. De ce fait, on peut se passer d'un essai de l'isolation principale après l'installation d'une nouvelle liaison.

## 6. ECONOMIC INTEREST

A. ISHIBASHI (J) presented an optimisation calculation of XLPE cable insulation thickness. This had been performed under current economic conditions, keeping the same cable construction materials for all thicknesses. Relative cost variations versus insulation thickness incorporated cable fabrication costs and operating costs, particularly those due to losses. Figures 17.1 and 17.2 presented the results. Current dimensioning for 275 kV cables was virtually optimum ; however, a 2 mm reduction of thickness for 66 kV could be contemplated in the future provided this did not jeopardise accessory reliability.

At TEPCO, an argument in favour of reducing thickness was laying costs : since most links were laid in pipes, it was most advantageous to use pipes already installed. By deciding to reduce insulation thickness for 66 kV cables from 11 to 9 mm in 1984, it had been possible to draw these cables in tight-fitting pipes.

D. ROY (F) stressed that the cost of insulating and semiconductor materials designed to operate at high gradients was greater ; he had evaluated the effect of this extra cost on the economic interest of reducing insulation thickness in two cases :

- 1) a 30 kV/240 mm<sup>2</sup> Al cable manufactured either with the normal materials for this voltage level and at the thicknesses specified in IEC 502, or with the materials used for HV cables and with a conductor gradient of 6 kV/mm : costs were equivalent in both cases.
- 2) For a 150 kV/630 mm<sup>2</sup> Al cable, the reduction in insulation thickness (maximum gradient increasing from 6.6 to 8.1 kV/mm) led to no economic saving if the materials used were 40 % more costly.

To be worthwhile, the increased service gradient should not require substantially greater materials costs.

Since decreasing insulation thickness led to reduced cable diameter, J.J. WAVRE (CH) felt that it would enable greater unit lengths to be placed on reels, thus limiting the number of joints. This would bring about savings in accessories, fitting and civil engineering in addition to greater reliability inasmuch as joints were often considered to be weak points.

## 6. INTERET ECONOMIQUE

A. ISHIBASHI (J), présente un calcul d'optimisation de l'épaisseur d'isolation des câbles PRC. Ce calcul a été effectué aux conditions économiques actuelles en conservant les mêmes matériaux de construction du câble pour toutes les épaisseurs. Les variations relatives de coût en fonction de l'épaisseur d'isolant intègrent les coûts de fabrication du câble et les coûts d'exploitation, ceux dûs aux pertes en particulier. Les figures 17.1 et 17.2 présentent les résultats. Le dimensionnement actuel des câbles 275 kV est pratiquement à l'optimum ; par contre, une réduction d'épaisseur de 2 mm pourrait être envisagée dans l'avenir en 66 kV, mais en veillant à ne pas mettre en cause la fiabilité des accessoires.

A la TEPCO, un argument en faveur de la réduction d'épaisseur est le coût d'installation : la plupart des liaisons étant posées en tuyau, il est très avantageux d'utiliser des tuyaux déjà en place. La réduction d'épaisseur de 11 à 9 mm des câbles 66 kV décidée en 1984 a ainsi permis de tirer ces câbles dans des tuyaux dont le diamètre était à la limite.

D. ROY (F), souligne que le coût des matériaux isolant et semi-conducteur conçus pour fonctionner sous fort gradient est plus élevé : il a évalué l'incidence de ce surcoût sur l'intérêt économique d'une réduction de l'épaisseur d'isolant par deux exemples :

- 1) un câble 30 kV/240 mm<sup>2</sup> Al est réalisé soit avec les matériaux usuels de ce niveau de tension et aux épaisseurs spécifiées dans la CEI 502, soit avec les matériaux utilisés pour les câbles HT et avec un gradient sur conducteur de 6 KV/mm : les coûts sont équivalents dans les deux cas.
- 2) Pour un câble 150 kV/630 mm<sup>2</sup> Al, la réduction d'épaisseur d'isolant (le gradient maximum passant de 6,6 à 8,1 kV/mm) n'apporte plus de gain économique si les matériaux utilisés sont plus chers de 40 %.

Pour être intéressante, l'augmentation de gradient de service des câbles ne doit donc pas s'accompagner d'un surcoût important des matériaux.

La diminution d'épaisseur d'isolant entraînant une réduction du diamètre du câble, J.J. WAVRE (CH), pense qu'elle permettrait d'augmenter les longueurs unitaires sur tourets, et donc de limiter le nombre des jonctions. Cela entraînerait une économie sur les accessoires, le montage et le génie civil, ainsi qu'un gain en fiabilité puisque les jonctions sont souvent considérées comme des points faibles.



For J.A. MORAN (USA), the total cost of a cable to be considered in order to justify its dimensioning was highly dependent on the utilities ; in the USA, utilities assigned extremely variable economic weightings to investments and to operating costs.

Similarly, the impact of increased service gradient on cable production cost depended on the individual manufacturer. It would not be the same for a manufacturer who had just recently invested in production equipment for an expanding market and another who had numerous production facilities spread among various plants.

Thus the analysis of the economic interest of reducing insulation thickness could have very different results dependent on the situation. According to the experience of R. JOCTEUR (F), it was not economic interest but technical reasons which primarily motivated increased service gradients : increased rated voltages. From an economic standpoint, the reduction of the number of joints, put forward by J.J. WAVRE, could be counterbalanced by their greater complexity ; furthermore, gradients should not be increased to an extent where cable system reliability was affected.

On the other hand, when rated voltage increased, it was necessary to increase service gradient to limit cable diameter : a maximum operating gradient of 15 kV/mm for the 500 kV cable had been defined since it was a good compromise. If a 800 kV cable were to be created one day, gradients would again have to be increased.

B. RIOT (F) explained that there was a market for 400 kV with EDF, but that it was very limited. The 400 kV interconnection system lines were characterised by high transmission capacity (3500 A to 4500 A on average), great lengths, located outside built-up areas. All these lines were overhead and it had not been considered laying them underground. For the same transmission capacity, large numbers of parallel cables would be required.

However, there were some 15 kilometers of underground 400 kV cables in service at EDF, five of which used synthetic insulation. Their function was :

- \* outgoing cables from certain hydroelectric plants, such as the recent plant of SUPER-BISSORTE,
- \* emergency 400 kV supply for nuclear plant auxiliary 100 MVA transformers, using LDPE 630 mm<sup>2</sup> (Al) and for which a very high level of reliability was imposed since nuclear safety regulations required that the plant be shut down if an outage was greater than 36 hours. These links were about 1 kilometer in length.
- \* the supply of 600 MVA auto-transformers in 400/225 kV substations to establish connections. A link of this type had been installed that year using 1200 mm<sup>2</sup> (Cu) cables.
- \* the supply of large 400 kV substations to avoid line crossing.

Pour JA. MORAN (USA), le coût total d'un câble à considérer pour justifier de son dimensionnement dépend très fortement des exploitants ; aux ETATS-UNIS ceux-ci affectent des poids économiques très variables aux investissements et aux coûts d'exploitation.

De même, l'impact de l'accroissement du gradient de service sur le coût de production des câbles dépend de chaque Constructeur : il ne sera pas le même chez un Constructeur ayant investi récemment dans un outil de production avec un marché en expansion, et chez un autre ayant de nombreux outils de production répartis dans plusieurs usines.

L'analyse de l'intérêt économique d'une réduction de l'épaisseur d'isolant peut donc avoir des réponses très différentes selon la situation.

D'après l'expérience de R. JOCTEUR (F), ce ne sont pas tellement des raisons économiques qui font augmenter les gradients de service, mais plutôt une raison technique : l'augmentation des tensions nominales. D'un point de vue économique, la réduction du nombre des jonctions avancée par J.J. WAVRE (CH) peut être contre-balançée par leur plus grande complexité ; et il ne faut pas augmenter les gradients au point d'affecter la fiabilité des liaisons.

Par contre, lorsque la tension nominale augmente, il faut augmenter le gradient de service pour limiter le diamètre du câble : un gradient de fonctionnement maximum de 15 kV/mm pour le câble 500 kV a été défini parce qu'il constitue un bon compromis. Si un câble 800 kV devait un jour être créé, il faudrait encore augmenter les gradients.

Il existe un marché pour des câbles 400 kV à l'EDF, explique B. RIOT (F), mais il est très limité. Les lignes du réseau d'interconnexion à 400 kV se caractérisent par des capacités de transport élevées (3500 A à 4500 A en moyenne), de grandes longueurs, situées hors des agglomérations. Toutes ces lignes sont aériennes et il n'est pas envisagé de les enterrer. Pour la même capacité de transport, il faudrait beaucoup de câbles en parallèle.

Il existe cependant une quinzaine de kilomètres de liaisons souterraines 400 kV en service, à EDF, dont cinq à isolation synthétique. Leur fonction est :

- \* l'évacuation de certains groupes hydrauliques, comme SUPER-BISSORTE réalisé récemment ;
- \* l'alimentation de secours à 400 kV des transformateurs auxiliaires 100 MVA des centrales nucléaires, réalisée avec des câbles en PEBD 630 mm<sup>2</sup> (Al), et pour lesquels une grande fiabilité est requise puisque la sûreté nucléaire oblige à arrêter la centrale en cas d'indisponibilité supérieure à 36 heures. Ces liaisons ont une longueur d'un kilomètre environ ;
- \* l'alimentation des autotransformateurs 600 MVA des postes 400/225 kV pour réaliser les raccordements. Une liaison de ce type a été réalisée cette année, en câbles 1200 mm<sup>2</sup> (Cu) ;
- \* l'alimentation de gros postes 400 kV, pour éviter les croisements de lignes.

K. SOMA (J) described the development of the first synthetic insulation 500 kV cable in Japan. This was a 1400 mm<sup>2</sup> Cu cable with 32 mm XLPE using either a grooved aluminium shield or wires and a grooved steel shield (cf. figure 18). After a long-term 6-month test of the cable and the terminations, a link had been installed in the TEPCO pumping station at IMAICHI in July 1987.

K. SOMA (J), décrit le développement du premier câble 500 kV à isolant synthétique au Japon. C'est un câble 1400 mm<sup>2</sup> Cu, 32 mm de PRC avec soit un écran cannelé en aluminium, soit des fils et un écran cannelé en acier (cf. figure 18). Après un essai de longue durée de 6 mois sur le câble et les extrémités, une longueur a été installée en juillet 87 dans la station de pompage IMAICHI de la TEPCO.

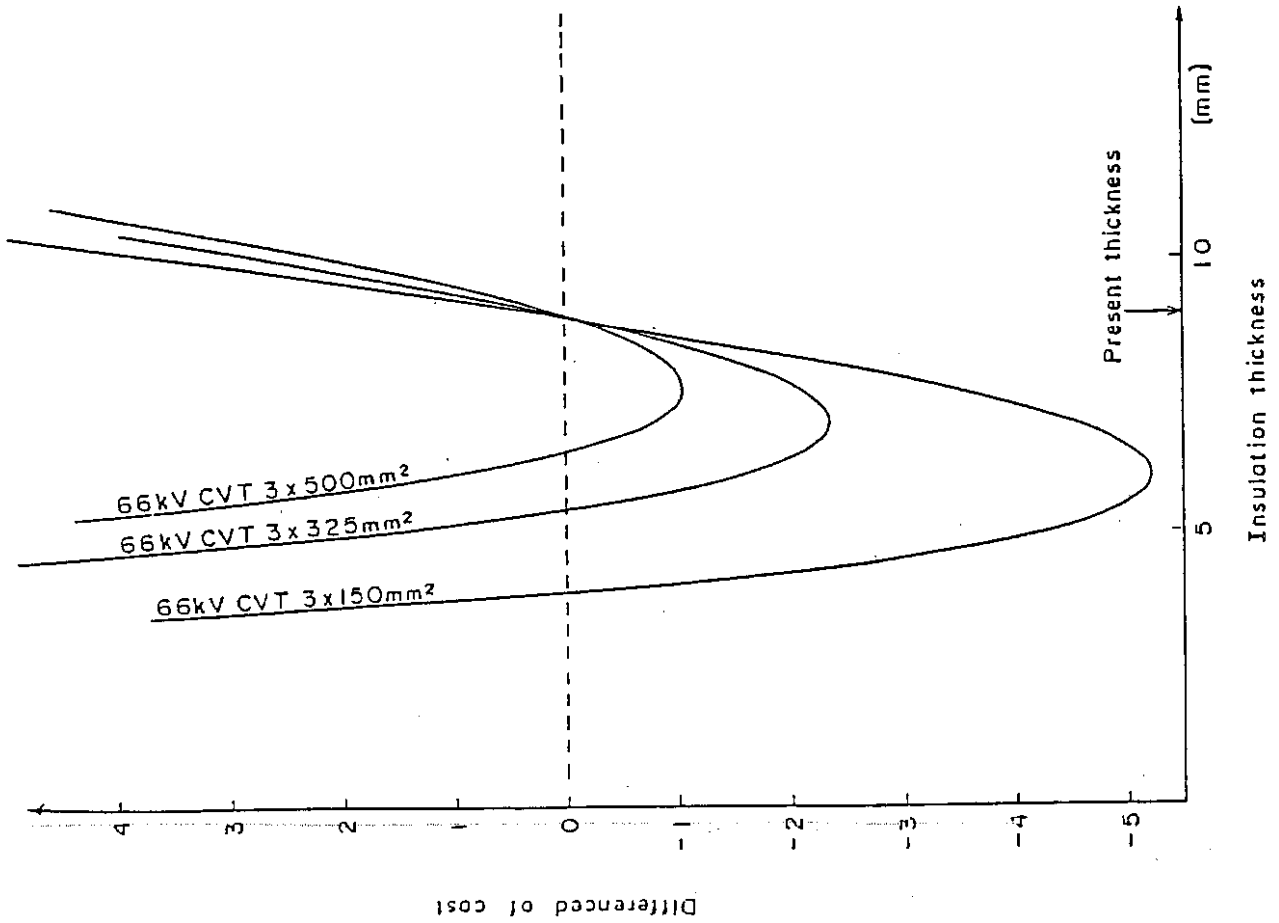


Fig. 17.1 Difference between present total cost and changed total cost of changed insulation thickness (66kV XLPE Cable)

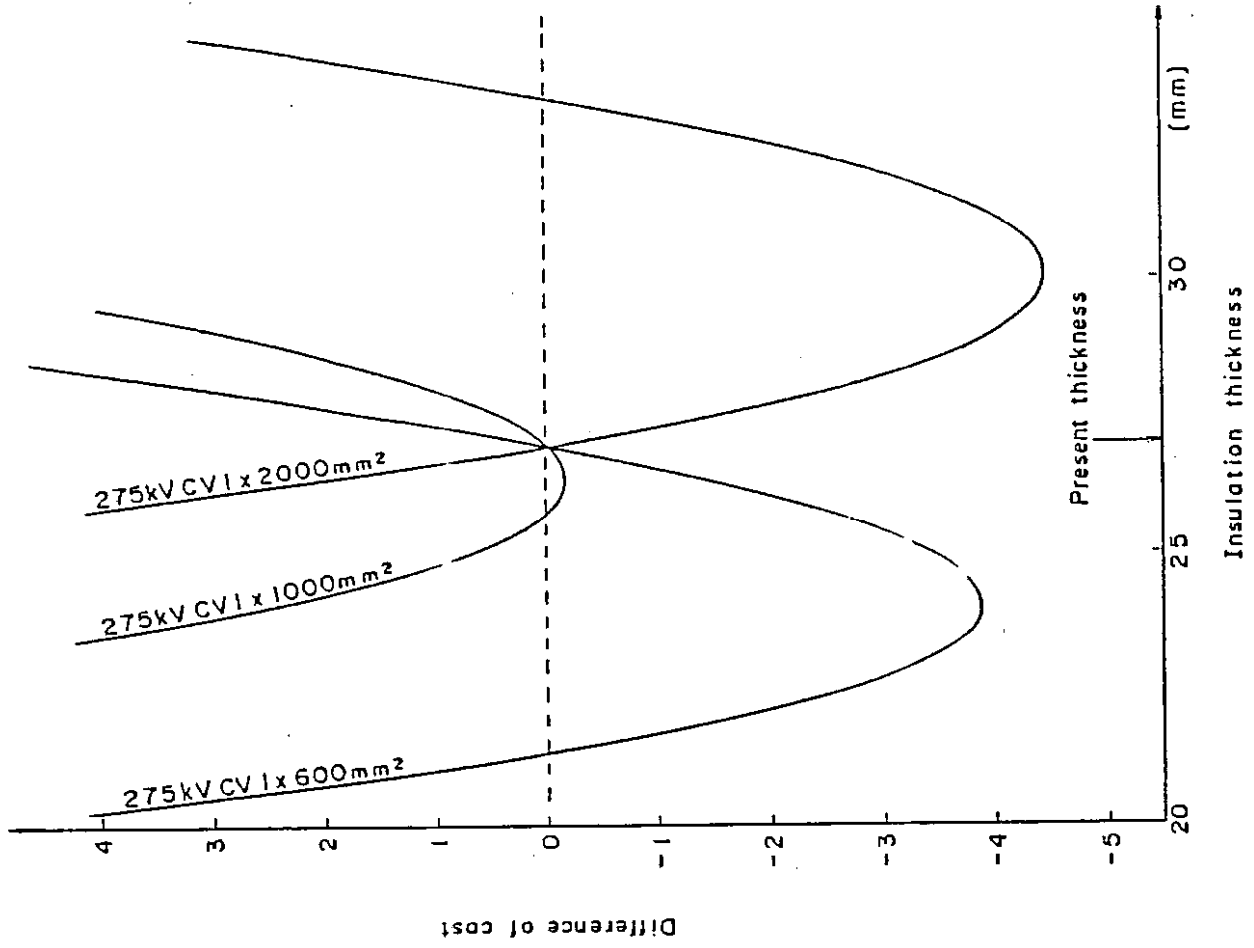


Fig. 17.2 Difference between present total cost and changed total cost of changed insulation thickness (275kV XLPE Cable)

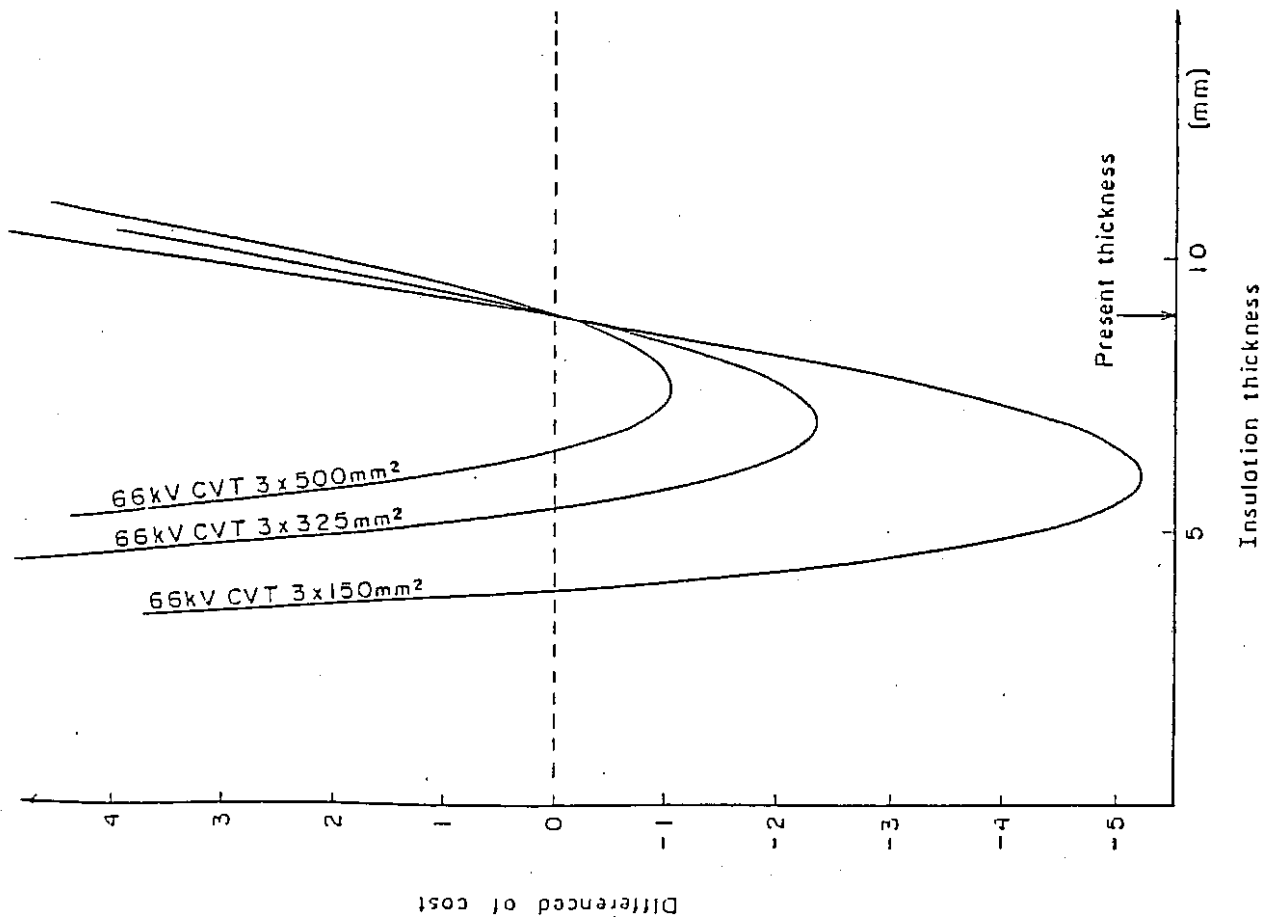


Fig. 1.1 Difference between present total cost and changed total cost of changed insulation thickness (66kV XLPE Cable)

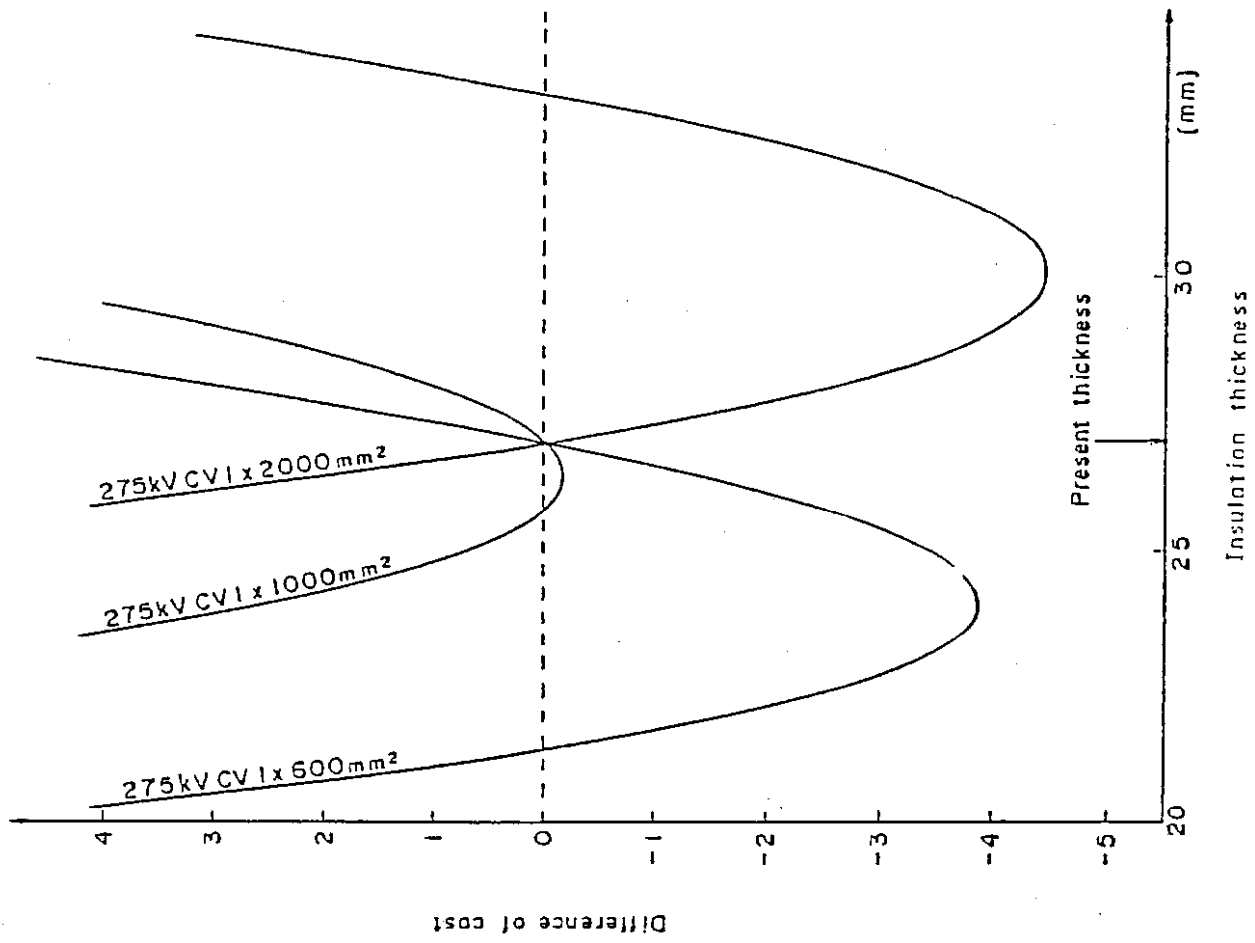
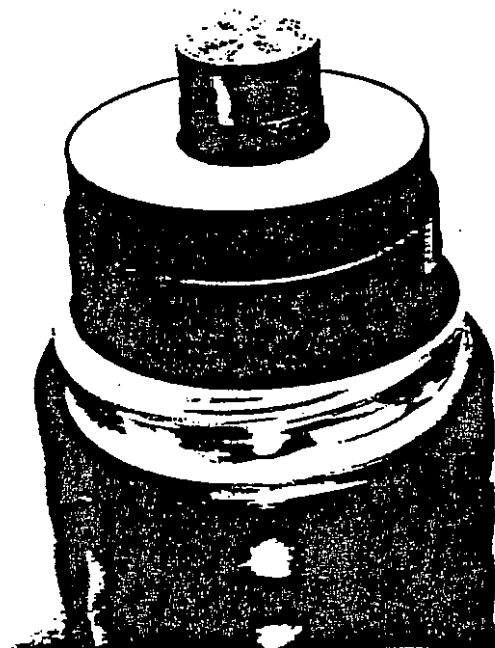


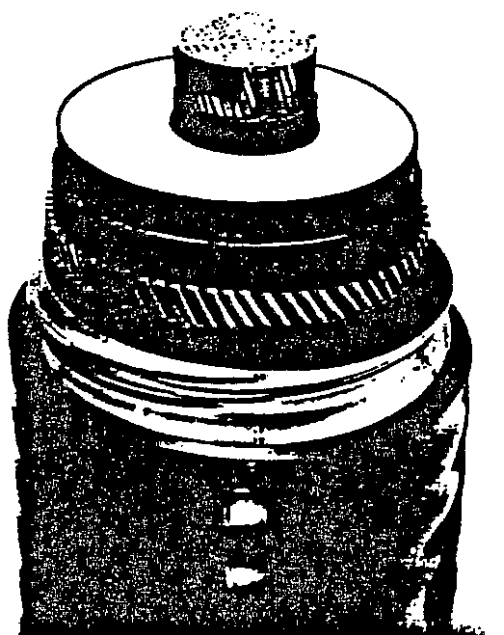
Fig. 1.2 Difference between present total cost and changed total cost of changed insulation thickness (275kV XLPE Cable)

**Figure 18 : CONSTRUCTION OF 500 kV 1 x 1,400 mm<sup>2</sup> XLPE CABLE {9}**

Item		Unit	Specifications	
Conductor	Cross-Section	mm <sup>2</sup>	1,400	
	Shape	-	4-segmental	
	Outer Diameter	mm	45.0	
Thickness of inner Semi-conducting Layer		mm	2	
Thickness of Insulation		mm	32.0	
Thickness of Semi-conducting Layer		mm	1	
Thickness of Semi-conducting Cushion Layer		mm	3	
Shield	Wire Diameter	mm	-	2.6
	No. of Pcs.	-	-	74
Corrugated Metallic Sheath	Material of Sheath	-	Aluminium	Stainless steel
	Thickness	mm	3.1	0.8
Thickness of PVC Jacket		mm	6.0	
Outside Diameter of Cable		mm	152	155
Cable Approximate Weight		kg/m	30	31



(a) aluminium sheath type



(b) stainless steel sheath type

Figure 18 : CONSTRUCTION OF 500 kV 1 x 1,400 mm<sup>2</sup> XLPE CABLE {9}

Item		Unit	Specifications	
Conductor	Cross-Section	mm <sup>2</sup>	1,400	
	Shape	-	4-segmental	
	Outer Diameter	mm	45.0	
Thickness of inner Semi-conducting Layer		mm	2	
Thickness of Insulation		mm	32.0	
Thickness of Semi-conducting Layer		mm	1	
Thickness of Semi-conducting Cushion Layer		mm	3	
Shield	Wire Diameter	mm	-	2.6
	No. of Pcs.	-	-	74
Corrugated Metallic Sheath	Material of Sheath	-	Aluminium	Stainless steel
	Thickness	mm	3.1	0.8
Thickness of PVC Jacket		mm	6.0	
Outside Diameter of Cable		mm	152	155
Cable Approximate Weight		kg/m	30	31



(a) aluminium sheath type



(b) stainless steel sheath type



## 7. SPONTANEOUS CONTRIBUTIONS OUTSIDE THE QUESTIONNAIRE

A. TOUREILLE (F) : We have developed a method of measurement for dc-loaded space charges on test samples of PE with semiconductor electrodes up to high field values (100 kV/mm) ; an extension of this study to cables is being examined.

It was thus interesting to observe the response of ac-loaded samples at 70°C and at 30 to 40 kV/mm.

The response first showed the absence of majority injection charges, contrary to dc loading : the signal was an ac background noise which increased with the field applied ; careful examination of the interface showed that the phenomenon was linked to deteriorated contact due to ionisation, thus making it possible to prevent breakdown.

We were currently extending this method to other types of contact. Thus, for example, by using geometrically dissymmetrical electrodes and by attenuating ionisation by edge effects, a unilateral signal was obtained, superimposed on the background noise.

It was then possible to give the type of load corresponding to the highest electric field formation.

The interest of this type of measurement for cables having divergent fields is evident.

R. JOCTEUR (F) : Much had been said about cable technique but, apart from M. LEPERS, little had been said about cable-laying techniques. This was an important matter, however, for in most cases it represented more than half the cost of cable systems.

It had been discussed at a JICABLE session and he considered that it should be discussed by other expert meetings.

M.S. PAPADOPULOS (UK) : Service life of cables as desired by utilities was never expressed formally. However, when cable quality was discussed, the reply differed according to expected life : if this was 2 years, any cable would suffice ; but if it was very long (40, 65 years...), things were entirely different. Utilities should define this factor, but they rarely did ! For certain UK utilities life expectancy of cables was 65 years.

## 7. CONTRIBUTIONS SPONTANÉES HORS QUESTIONNAIRE

A. TOUREILLE (F) : Nous avons mis au point une méthode de mesure de charges d'espaces d'échantillons de PE chargés en continu, avec électrodes en semi-conducteurs, jusqu'à de forts champs (100 kV/mm) : l'extension aux câbles est en cours d'étude.

Il était donc intéressant d'observer la réponse d'échantillons chargés en alternatif à 70 °C sous 30 à 40 kV/mm.

La réponse fait apparaître tout d'abord l'absence d'injection majoritaire contrairement au continu :

le signal est un bruit de fond alternatif qui croît avec le champ appliqué : un examen attentif de l'interface permet de relier le phénomène à la détérioration du contact par ionisation et ainsi de prévenir du claquage.

Actuellement, nous étendons cette étude à d'autres types de contact.

C'est ainsi que, par exemple, en utilisant des électrodes géométriquement dissymétriques et en atténuant les ionisations par effets de bord on obtient un signal unilatéral superposé au bruit de fond.

On peut alors donner le type de charge correspondant au champ électrique de formation le plus fort.

On voit tout l'intérêt de ce type de mesure dans les câbles où les champs sont divergents.

R. JOCTEUR (F) : Nous avons beaucoup parlé de la technique des câbles, mais, sauf M. LEPERS, nous avons peu parlé des techniques de pose des câbles. C'est pourtant une question importante, car cela représente dans la plupart des cas plus de la moitié du coût des liaisons.

Elle a été discutée à une session de JICABLE, et je pense qu'elle devrait faire l'objet d'autres réunions d'experts.

M.S. PAPADOPULOS (UK) : La durée de vie des câbles telle qu'elle est espérée par les utilisateurs n'est jamais exprimée de manière formelle. Pourtant, si l'on discute de la qualité des câbles, la réponse n'est pas la même selon la durée de vie escomptée : si elle est de deux ans, n'importe quel câble peut faire l'affaire ; mais si elle est très longue : 40, 65 ans... c'est une autre affaire. Les utilisateurs devraient la définir, mais cela n'arrive pas souvent ! Pour certains câbles anglais, l'espérance de vie est de 65 ans.

## 8. CONCLUSION

Let us recall the main statements which may be drawn from the discussions at this workshop HT 87 on the increase of electric field in synthetic insulation power cables :

\* Service voltage gradients within cables are very far from the intrinsic dielectric withstand of insulating materials in use ; from a theoretical point of view, an increase of working stresses seems quite possible.

\* Impurities in insulating and semi-conducting materials, and their interface quality, make the basic limiting factor for higher working gradients. Most decisive progress has been made eliminating impurities within industrial raw materials : a tight cooperation between suppliers of raw materials and cable manufacturers is a prospect for further improvement.

\* High electric gradients are generally in use for technical reasons, for example in order to limit cables dimension when increasing the rated voltage. On the other hand, their economic interest is not obvious in every case.

\* Cables with increased working field should keep a high reliability : it depends on factors peculiar to cable technique itself, and obviously, designing, manufacturing and testing these equipments are determining steps. Yet problems specific to their installation should not be forgotten : they may often have harmful consequences on availability and durability of circuits.

Meeting of experts on questions concerning cables installation should be kept in prospect because it would contribute to improving the present situation.

## 8. CONCLUSION

Les questions débattues au cours de cet Atelier HT 87 sur la possibilité de l'accroissement du champ électrique dans les câbles d'énergie à isolation synthétique sous tension alternative, ont permis de mettre en relief quelques points essentiels que nous allons rappeler :

\* les gradients de service des câbles sont très éloignés de la rigidité diélectrique intrinsèque des matériaux isolants adoptés ; sur le plan théorique, une augmentation des gradients de fonctionnement paraît tout à fait envisageable.

\* les impuretés dans l'isolant et les semi-conducteurs et la qualité de leurs interfaces constituent le facteur limitatif essentiel de l'augmentation des gradients de service. L'élimination des impuretés dans les produits de base industriels a permis d'obtenir les progrès les plus significatifs : une coopération étroite entre les fabricants de matières premières et les fabricants de câbles constitue une perspective d'avenir très prometteuse pour progresser encore.

\* des gradients électriques élevés sont généralement adoptés pour des raisons techniques, par exemple pour limiter les dimensions des câbles lorsque les tensions augmentent. Par contre, l'intérêt économique apporté n'est pas toujours évident.

\* les câbles à gradient de service élevé doivent conserver une excellente fiabilité ; celle-ci dépend de facteurs propres aux câbles eux-mêmes, et il est évident que la conception, la fabrication et les essais de ces matériels sont déterminants. Mais il ne faut pas oublier les problèmes spécifiques à leur installation qui, bien souvent, peuvent avoir des conséquences fâcheuses sur la disponibilité et la pérennité des liaisons.

Pour l'avenir, une réunion d'experts sur ces questions d'installation des câbles apparaît souhaitable car elle contribuerait à améliorer la situation actuelle.