

PROSPECTIVE 2100

TRANSPORT DE L'ENERGIE ELECTRIQUE : *DES TECHNIQUES POUR DEMAIN*

Mercredi 12 mai 2004

Paris, France

par

Lucien DESCHAMPS

TRANSPORT DE L'ENERGIE ELECTRIQUE

1. Introduction
2. Concepts de transport de l'énergie électrique.
3. Classification des techniques.
4. Le courant continu.
5. Evolution des lignes aériennes.
6. Evolution des câbles isolés.
7. Techniques et concepts nouveaux
8. Comparaison des techniques.
9. Conclusion : Des solutions pour l'avenir

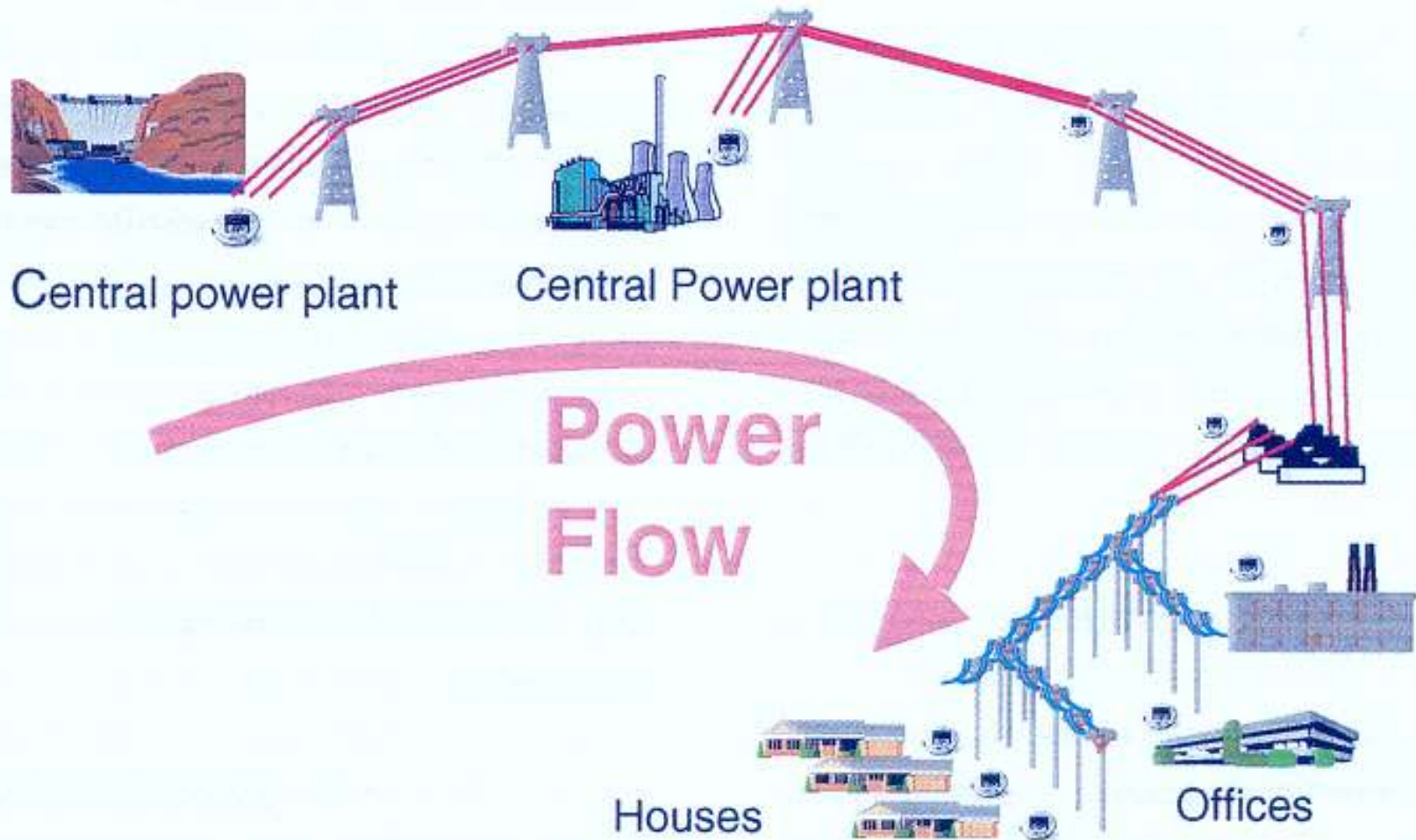
1 - INTRODUCTION

Techniques de transport

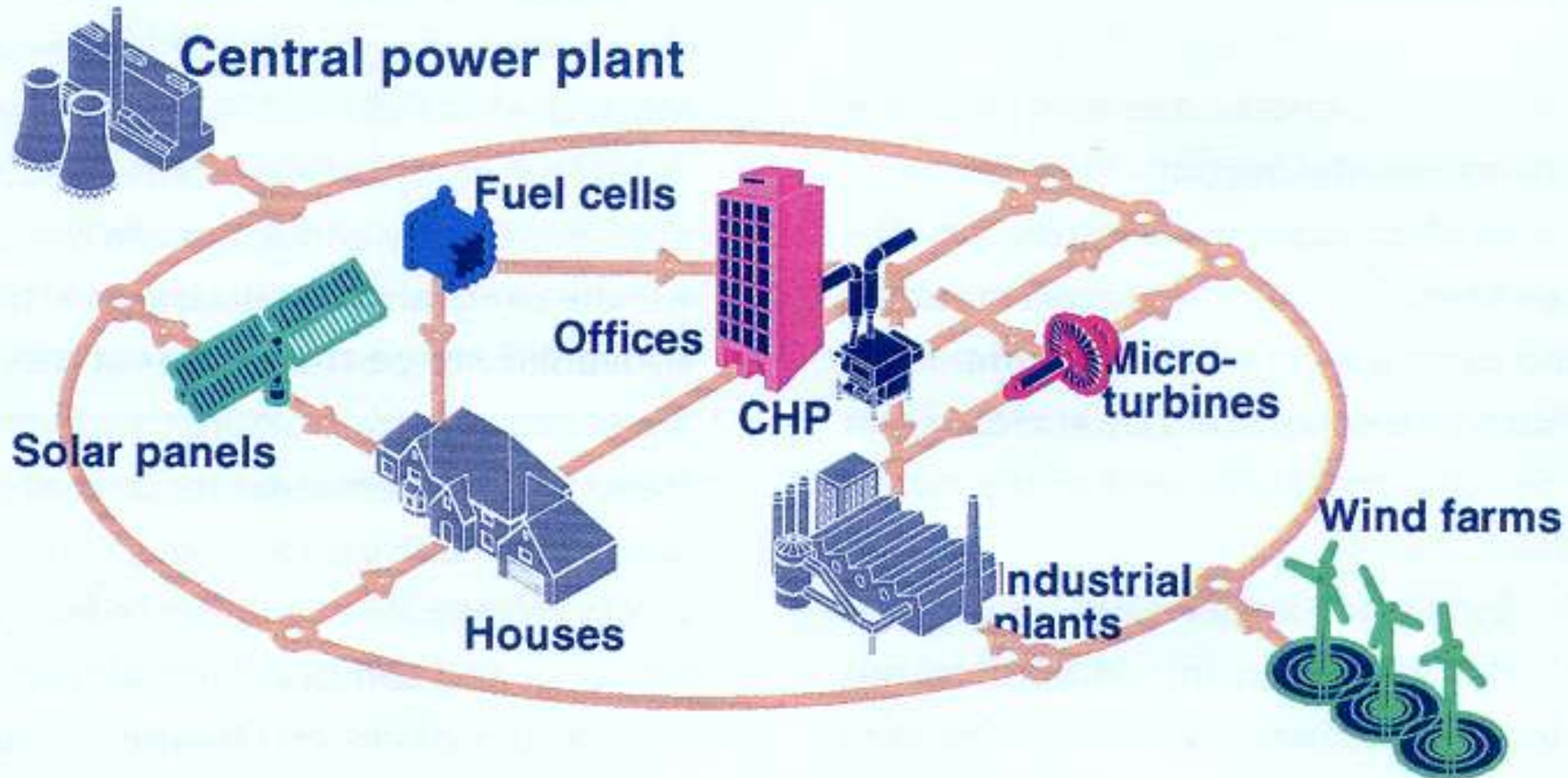
Quelles perspectives d'évolution?

- Evolution des besoins des réseaux,
- Exigences économiques,
- Respect de l'environnement,
- Prise en compte du cadre juridique
- Répondre à l'attente sociétale.

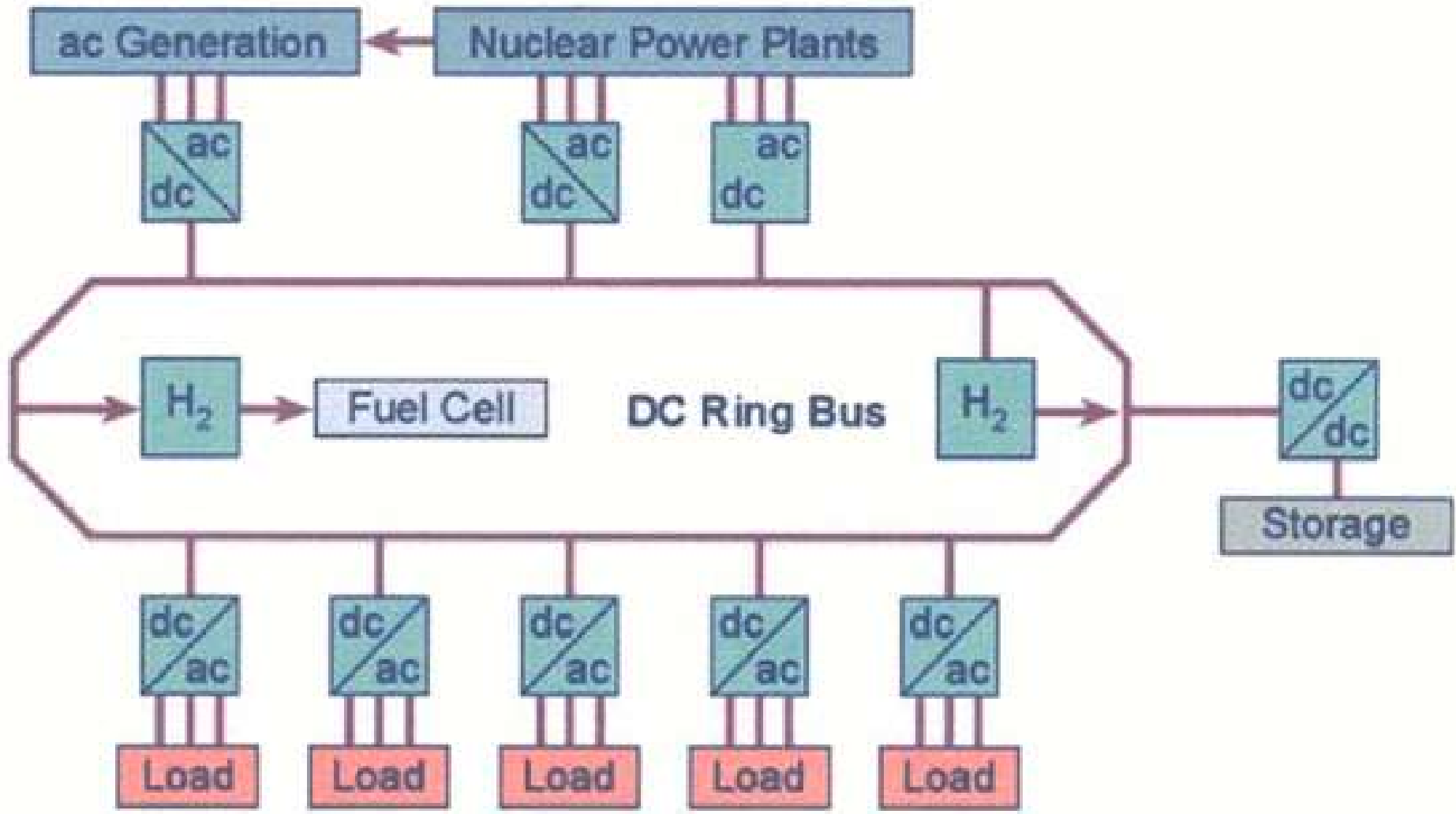
CIGRE « Distribution » scenario



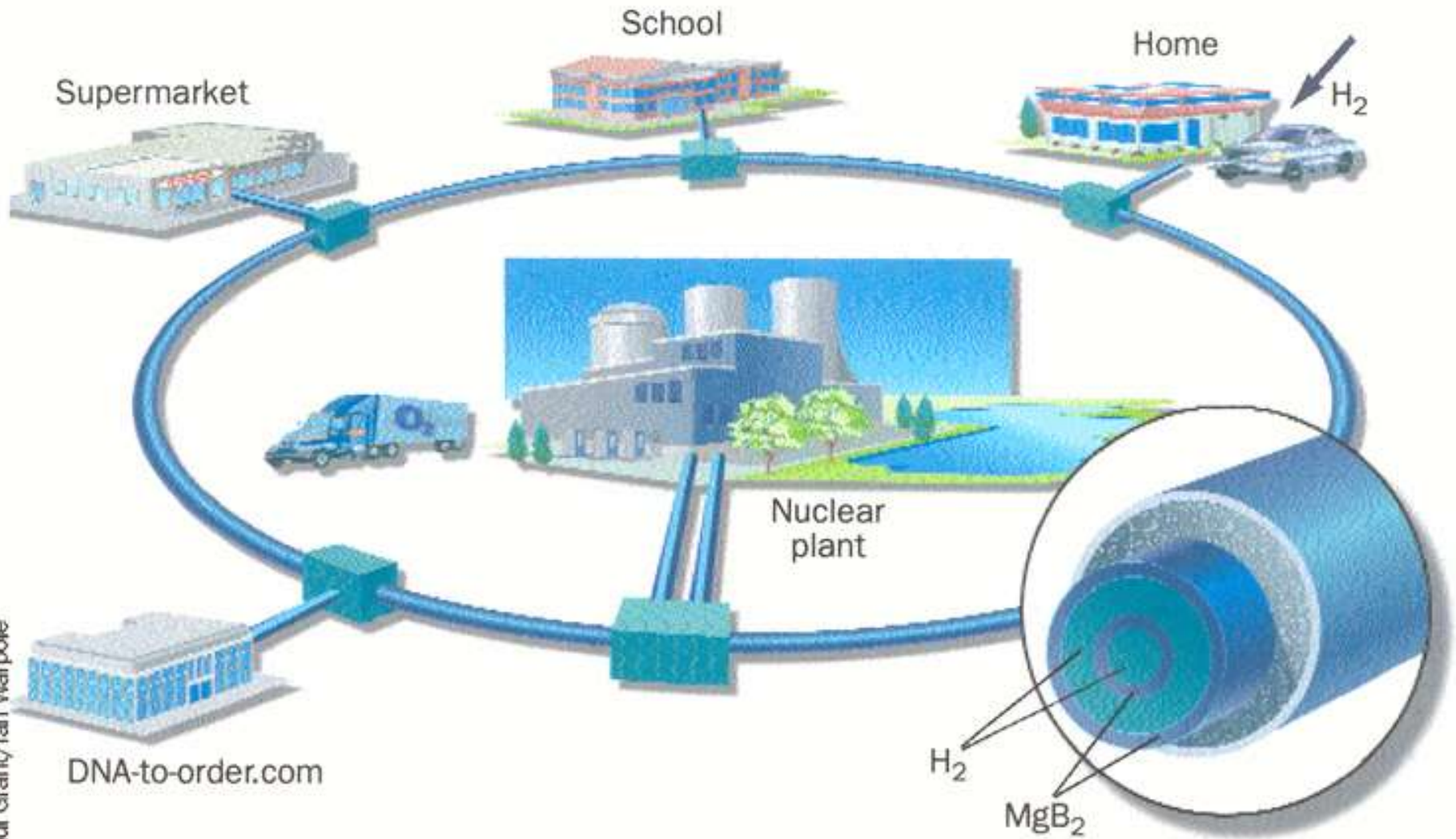
CIGRE « Mixtribution » scenario



SuperGrid - Projet EPRI



SuperCity - Projet EPRI



Quelques idées novatrices

- **Matériaux nouveaux,**

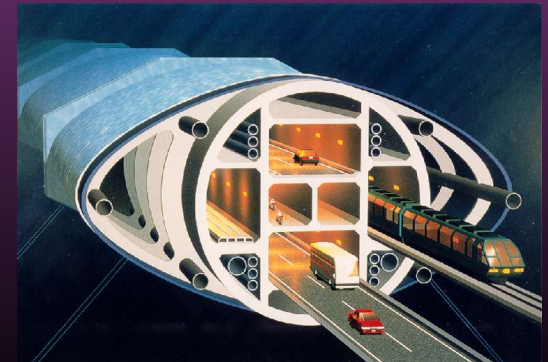
Conducteurs, Supraconducteurs, Composites, Isolants,...

- **Optimisation technico économique,**

Refroidissement forcé, Instrumentation, FACTS,...

- **Concepts nouveaux,**

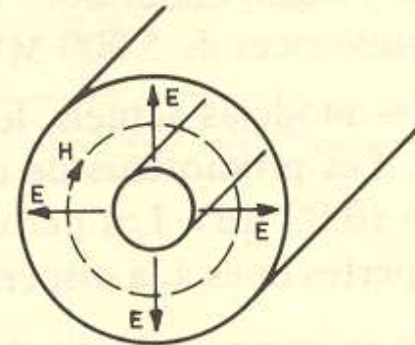
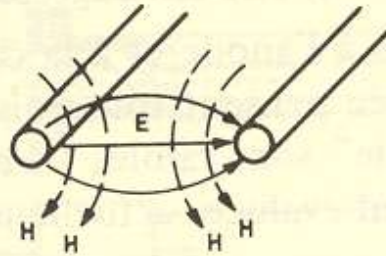
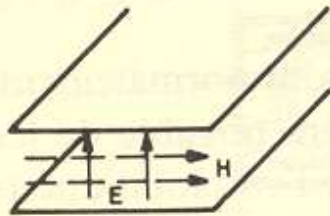
TESF, Cinétique de particules,...



2 - CONCEPTS DE TRANSPORT DE L'ENERGIE ELECTRIQUE

Guides d'ondes TEM

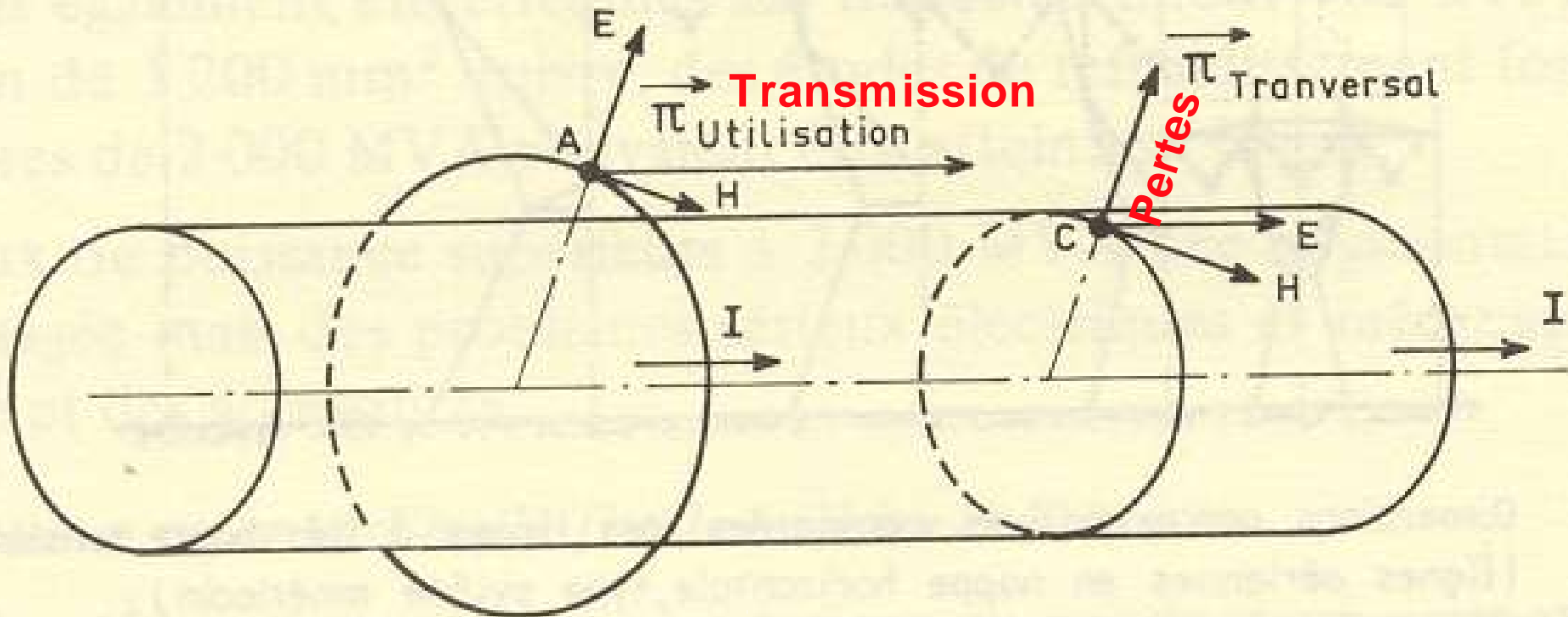
1) ondes TEM (§ 7)



- Lignes aériennes
- Câbles à gaines isolées
- C.I.G. à gaines isolées
- Cryocâbles à courant continu
- C.I.G. gaines liées et mises à la terre
- Cryocâbles à courant alternatif

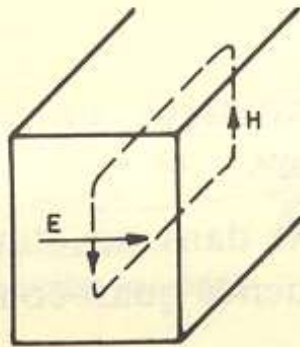
Le transport de l'énergie électrique :

- **A l'intérieur du conducteur**, le vecteur de Poynting est transversal : L'énergie est perdue.
- **A l'extérieur du conducteur**, le vecteur de Poynting est dirigé dans le sens longitudinal : L'énergie est transmise.

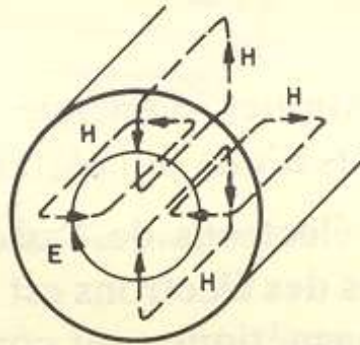


Guides d'ondes TE, TM, Ligne G

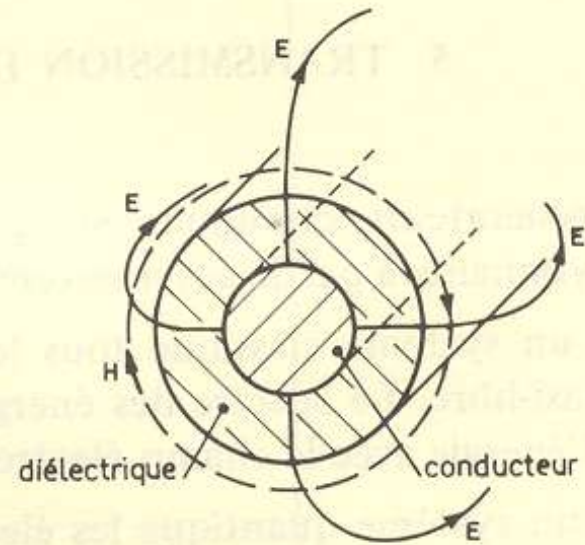
2) ondes UHF (§ 8)



Guide rectangulaire
mode H_{01}



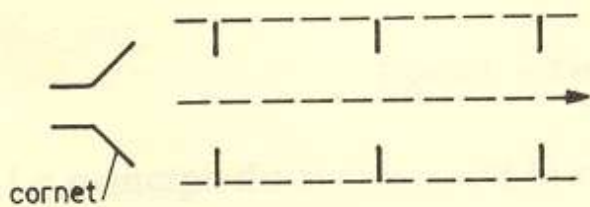
Guide circulaire
mode H_{01}



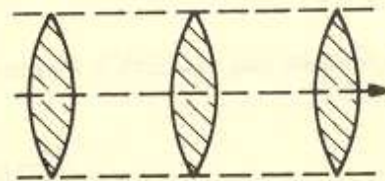
Ligne "G" ou ligne de Goubau

Faisceaux

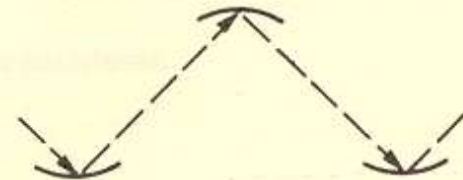
3) faisceaux (§ 9)



Guide d'onde à
faisceau à iris



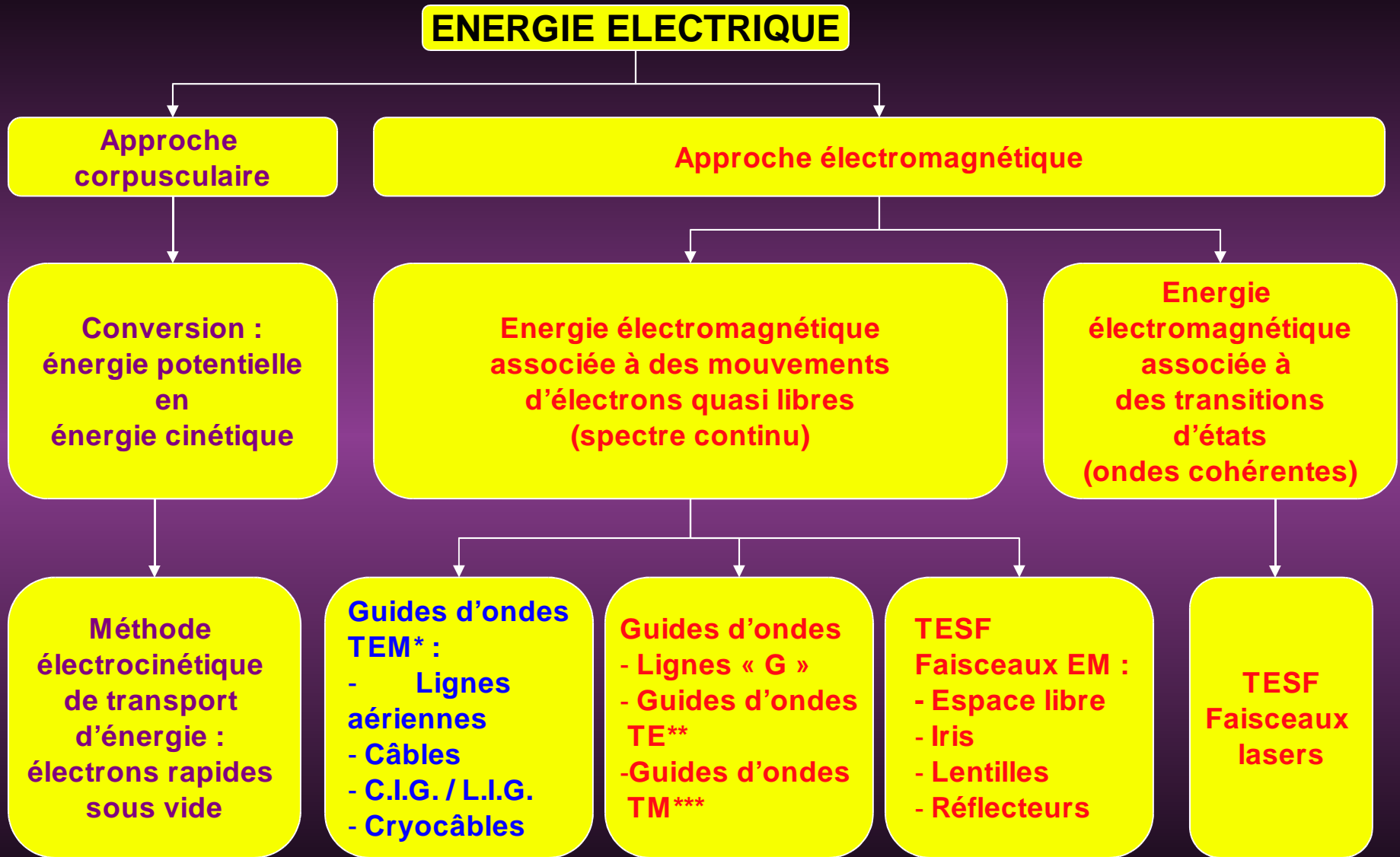
Guide d'onde à
faisceau à lentilles



Guide d'onde à
faisceau à réflecteurs

3 - CLASSIFICATION DES TECHNIQUES

LES MOYENS DE TRANSMISSION D'ENERGIE ELECTRIQUE



* TEM : transverse – électrique – magnétique / ** TE : transverse – électrique / *** TM : transverse – magnétique

4 - LE COURANT CONTINU

Avantages du courant continu

- **Indépendance des fréquences des réseaux connectés,**
- **Maîtrise des échanges d'énergie entre réseaux,**
- **Possibilité d'utilisation de câbles de grandes longueurs,**
- **Capacité de transport supérieure à celle d'une liaison à CA, à même section de conducteur,**
- **En ce qui concerne la liaison proprement dite, moindre coût qu'une liaison à CA.**

Inconvénients du courant continu

- **Stations de conversion complexes, onéreuses et d'un grand volume.**
- **Perte de possibilité de secours synchrone entre régions ou pays.**

Applications des liaisons à courant continu

- Interfaces asynchrones de longueur nulle entre réseaux non synchronisés ou à fréquences différentes (Japon).
- Liaisons Point à point sous marines (> 30 km). (exemple : IFA 2000).
- Liaisons point à point terrestres de grandes longueurs (> 1000km) et de grande capacité (1000 MW).

5 - EVOLUTION DES LIGNES AERIENNES

RESEAUX HT 60 à 150 kV en Europe

	HT - 60, 90, 110 et 150 kV		
	Réseau km	Souterrain km	%
Allemagne	76 349	4 740	8,2
Belgique	5 172	396	7,6
Danemark	8 005	1 673	20,9
France	50 513	1 984	3,9
Grande Bretagne	25 825	3 789	14,8
Italie	36 677	449	1,2
Norvège	19 825	624	3,2
Pays Bas	6 457	905	14,0
Portugal	9 311	258	3,8
Suisse	6 080	680	11,2

Source : SYCABEL

RESEAUX THT 220 à 275 kV en Europe

	THT - 220 à 275 kV		
	Réseau km	Souterrain km	%
Allemagne	21 545	35	0,2
Belgique	267	0	0
Danemark	5 578	375	6,5
France	27 890	813	2,9
Grande Bretagne	3 029	71	2,3
Italie	13 641	387	2,8
Norvège	6 049	64	1,1
Pays Bas	648	6	0,9
Portugal	4 409	0	0
Suisse	5 822	22	0,4

Source : SYCABEL

RESEAUX THT 380 - 400 kV en Europe

	THT - 380 - 400 kV		
	Réseau km	Souterrain km	%
Allemagne	18 314	62	0,3
Belgique	883	0	0
Danemark	-	-	-
France	20 794	2,5	0,01
Grande Bretagne	788	11	1,4
Italie	9751	9	0,1
Norvège	2 316	36	1,8
Pays Bas	1 979	0,4	0,02
Portugal	1234	0	0
Suisse	1 800	0	0

Source : SYCABEL

Quelques recherches dans le domaine des lignes aériennes.

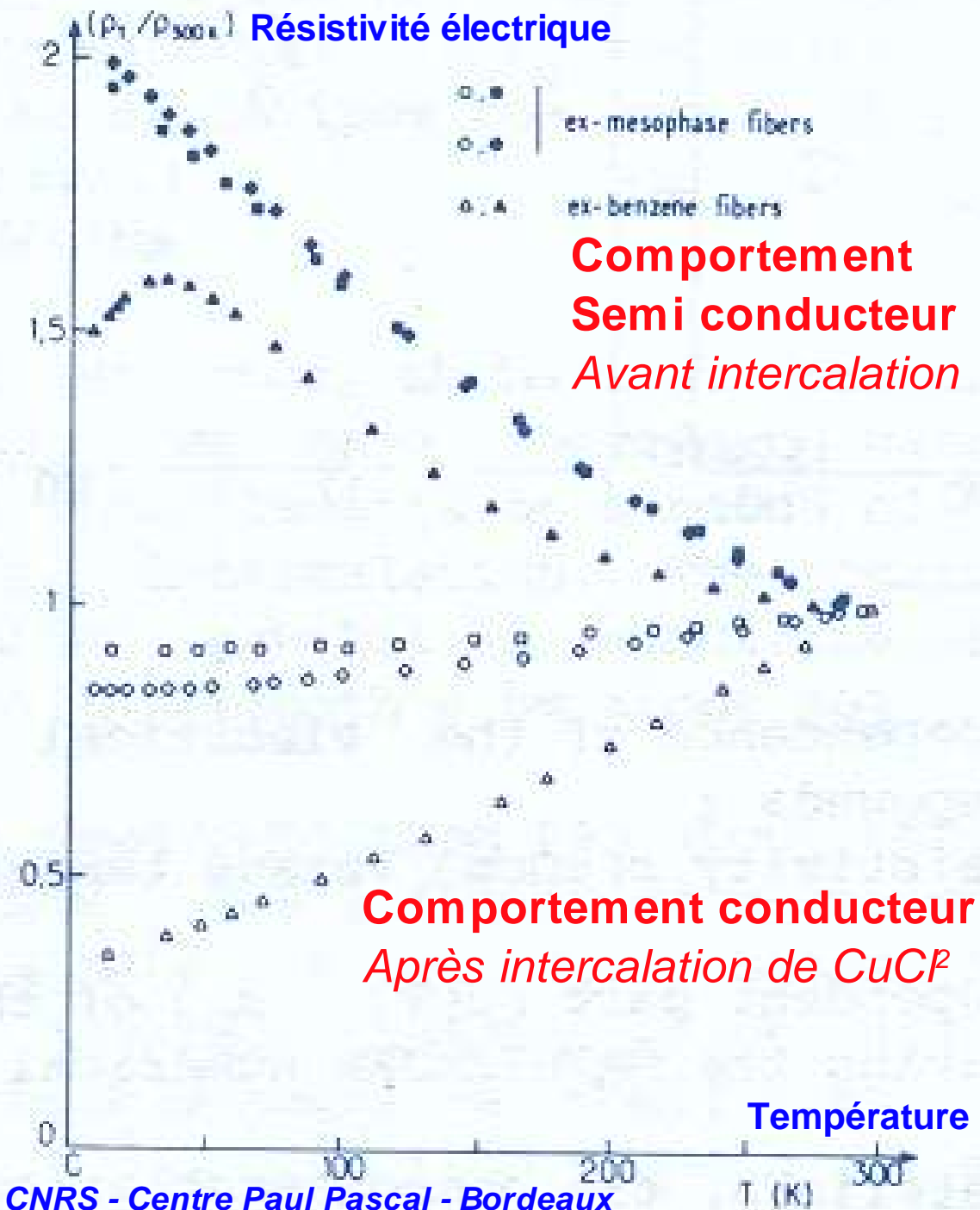
- **Nouveaux matériaux** : de structures, conducteurs, isolants,...
- **Optimisation du dimensionnement,**
- **Tenue aux effets climatiques exceptionnels** : foudre, givre, vent,...
- **Augmentation de la disponibilité** : travaux sous tension, instrumentation par fibres optiques,...
- **Architectures esthétiques des pylones,**
- **Intégration optimale dans l'environnement**
- **Etude des effets électromagnétiques, du bruit, ...**
- **Ingénierie sociétale**

INTERCALATION de fibres de carbone (1986)



Objectif de la recherche :

- Conducteur à haute tenue mécanique
- invariance thermomécanique
- Conductibilité du cuivre
- Stabilité chimique





Fibre ex-benzène - Diamètre : quelques μ

Résistivité avant intercalation : $60 \mu\Omega.cm$

Résistivité après intercalation $Cu.Cl_2$: 6 à $10 \mu\Omega.cm$

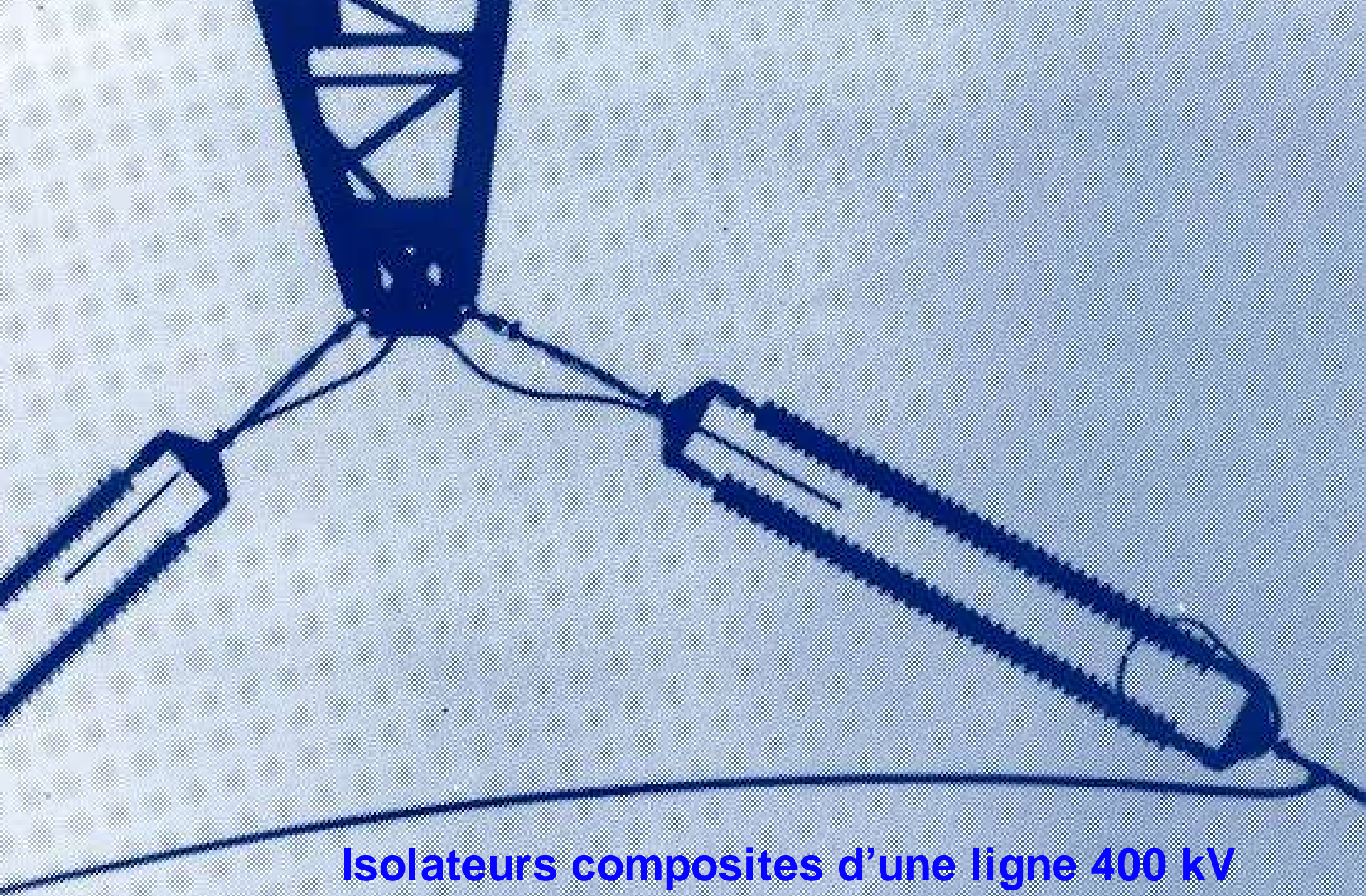


Ligne à hauteur réduite : impératif technique, dissimulation,...

Traversée de zones boisées :

Technologies, formes et couleurs adaptées

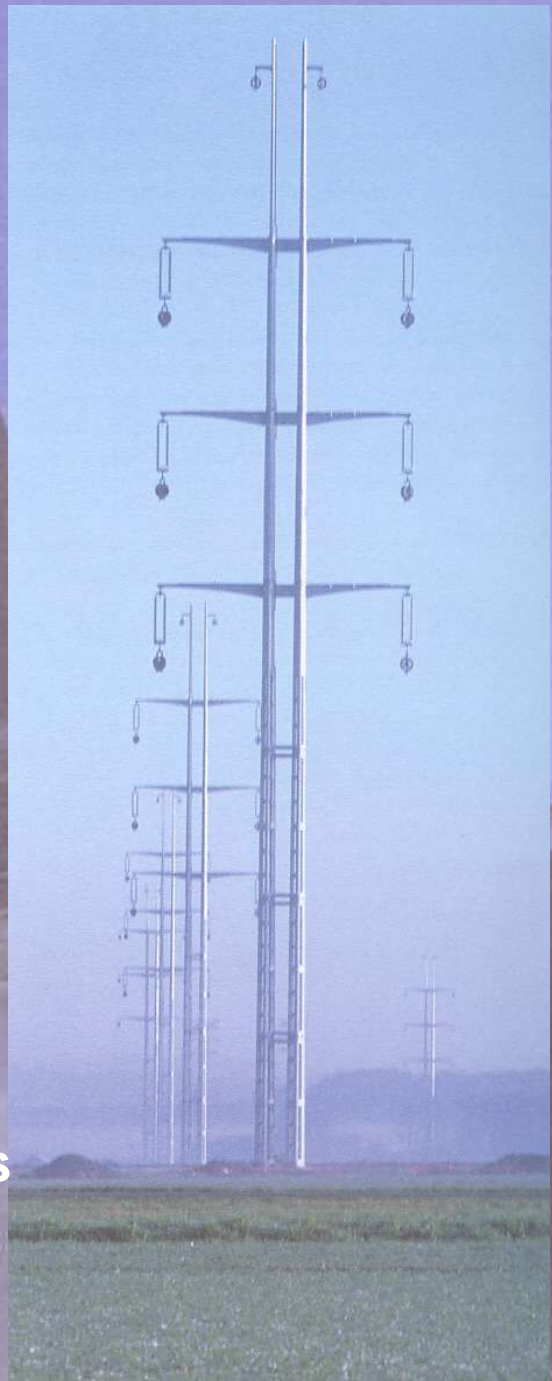




Isolateurs composites d'une ligne 400 kV
Masse d'un isolateur composite = 50 kg
Masse d'un isolateur conventionnel = 350 kg



Recherche esthétique : Nouvelles architectures
Pylones « Roseau »
Ligne 400 kV : Amiens - Arras, 2004





Suite à la tempête de 1999 : Renforcement de la tenue mécanique des lignes pour un vent de 150 km / h. et mise en œuvre de pylones anti-cascade pour prévenir l'effet « domino »(RTE).



TRAVAUX SOUS TENSION

Utilisation de l'hélicoptère pour la surveillance du réseau, l'entretien et la construction de lignes.

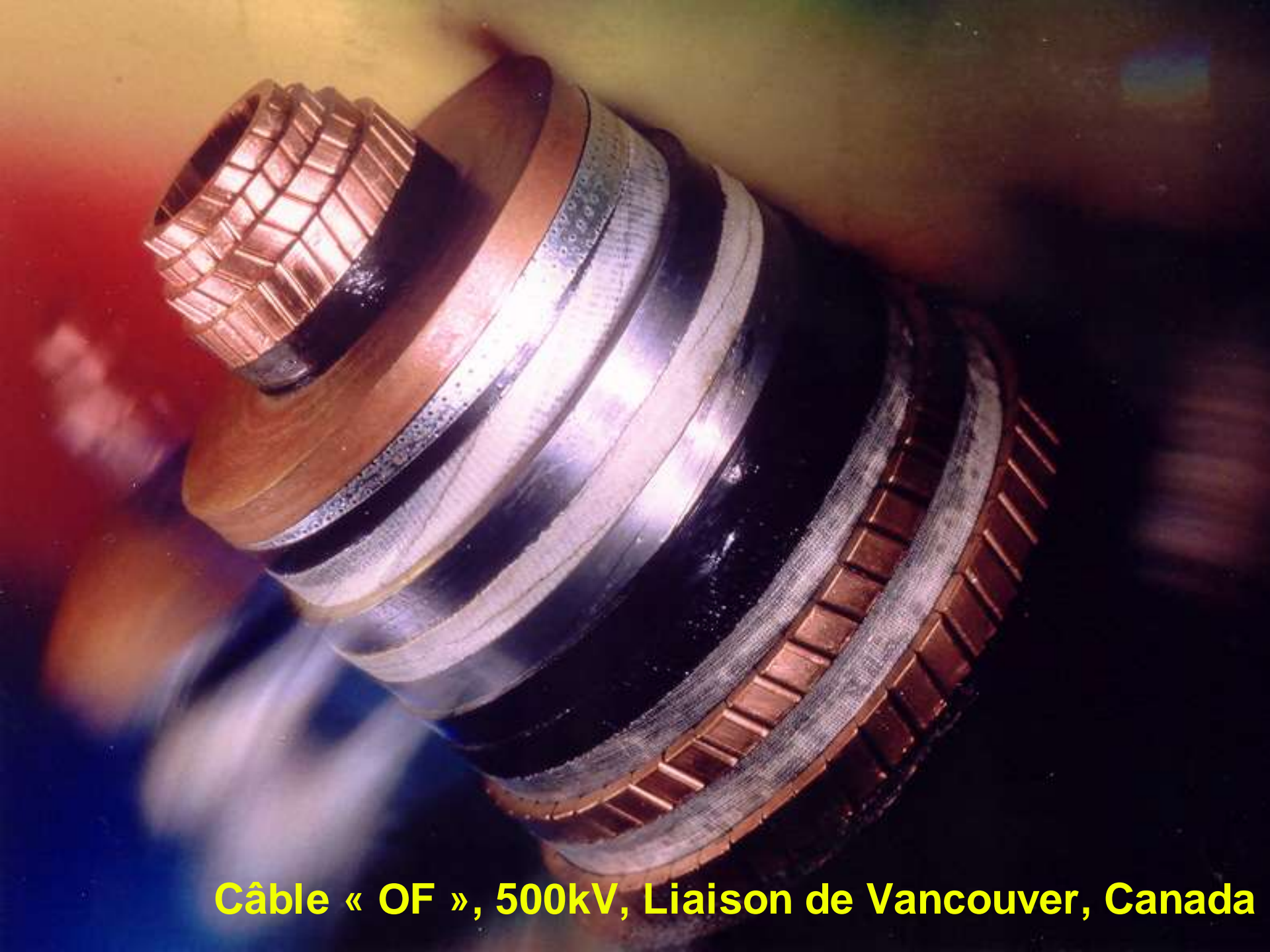


Ingénierie sociétale

- Répondre à l'attente énergétique des citoyens,
- Intégrer les ouvrages dans l'environnement en concertation avec les populations locales en prenant en compte au mieux les contraintes de chacun,

A titre d'exemple, pour le projet de ligne RTE 400kV Amiens-Arras, plus de 200 réunions ont rassemblé élus, organismes socio-professionnels, exploitants agricoles et forestiers.

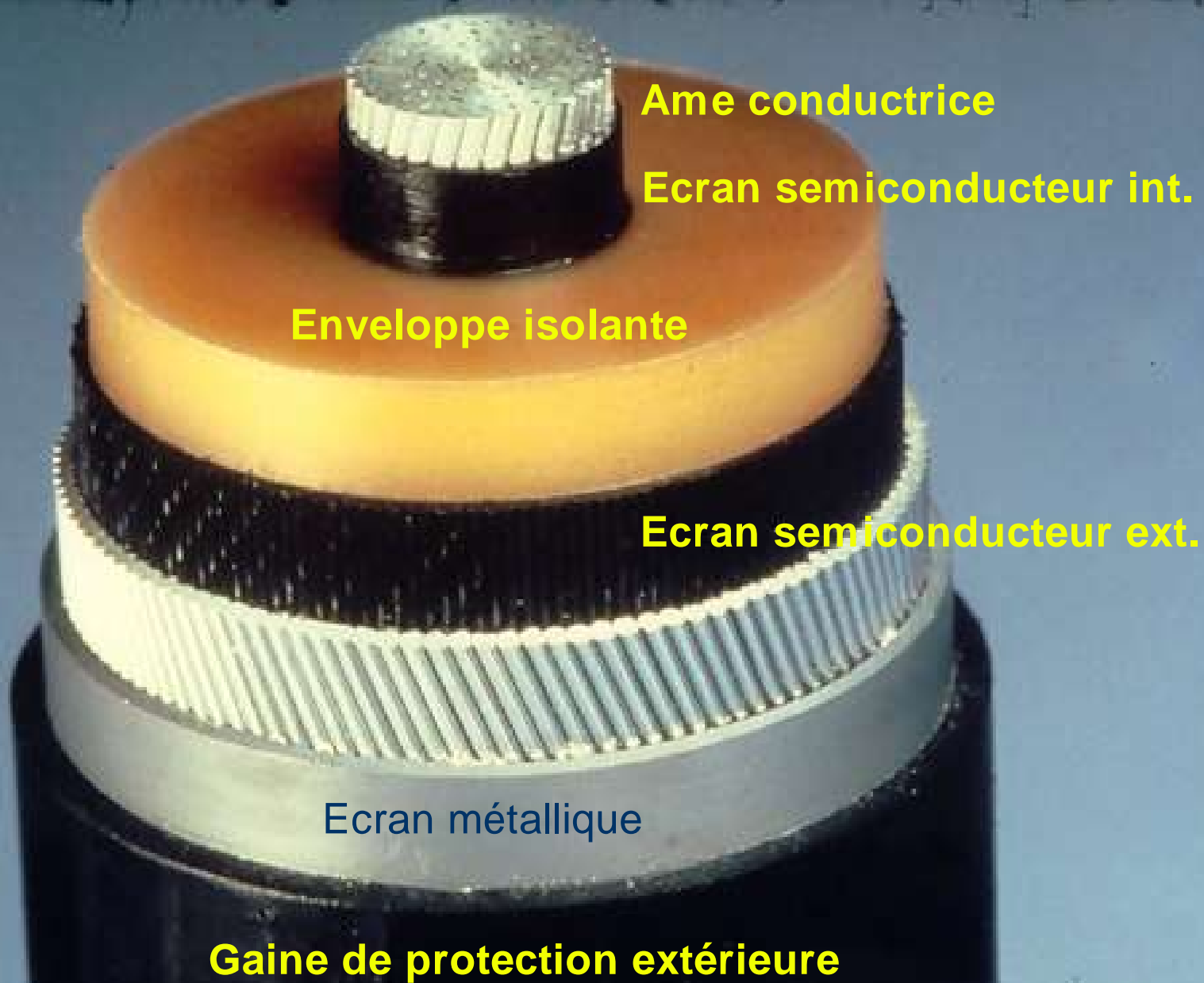
6 - EVOLUTION DES CÂBLES ISOLES



Câble « OF », 500kV, Liaison de Vancouver, Canada



Câbles THT "OF" sous marins



Ame conductrice

Ecran semiconducteur int.

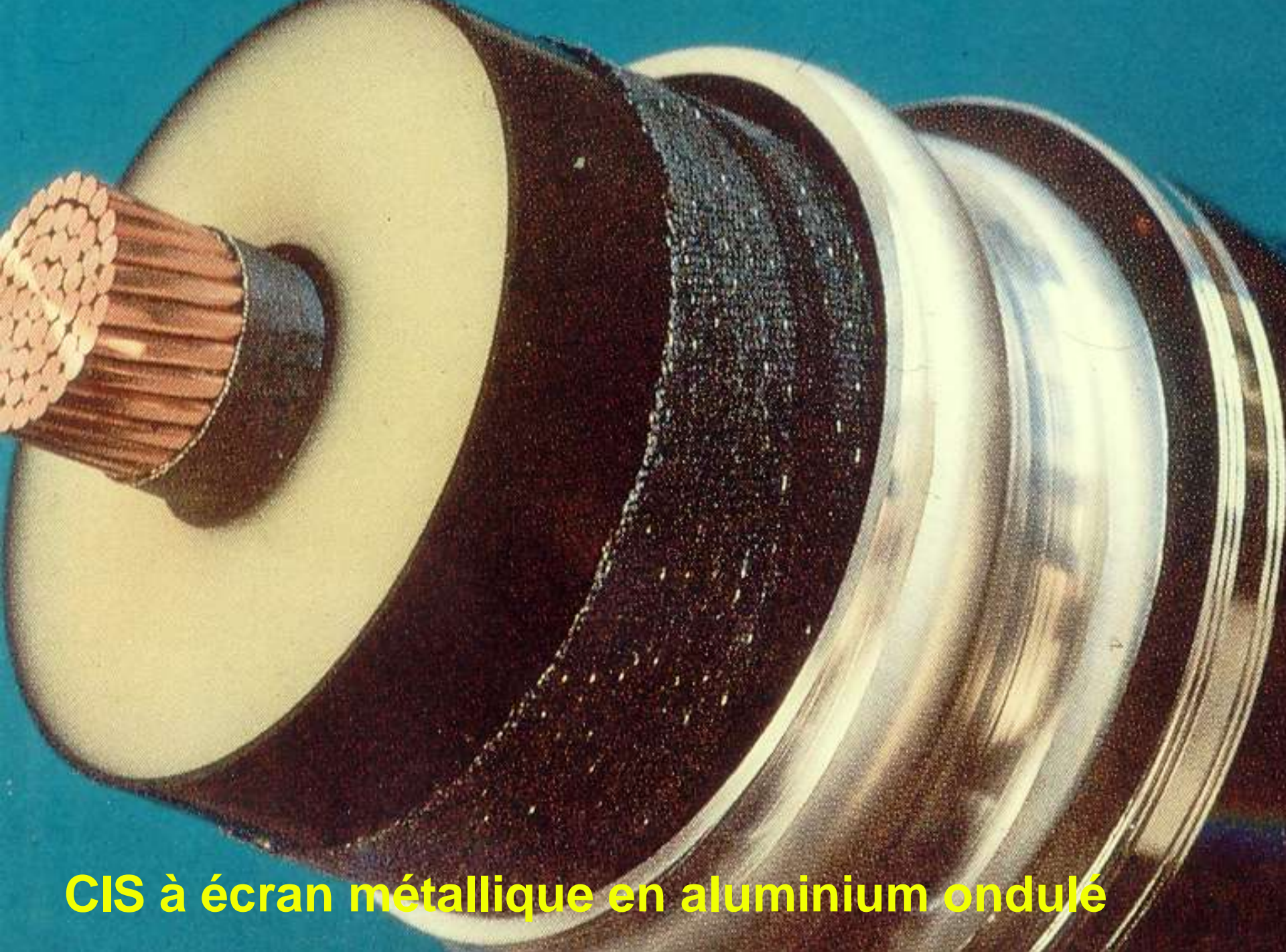
Enveloppe isolante

Ecran semiconducteur ext.

Ecran métallique

Gaine de protection extérieure

CIS : CÂBLE THT A ISOLATION SYNTHETIQUE

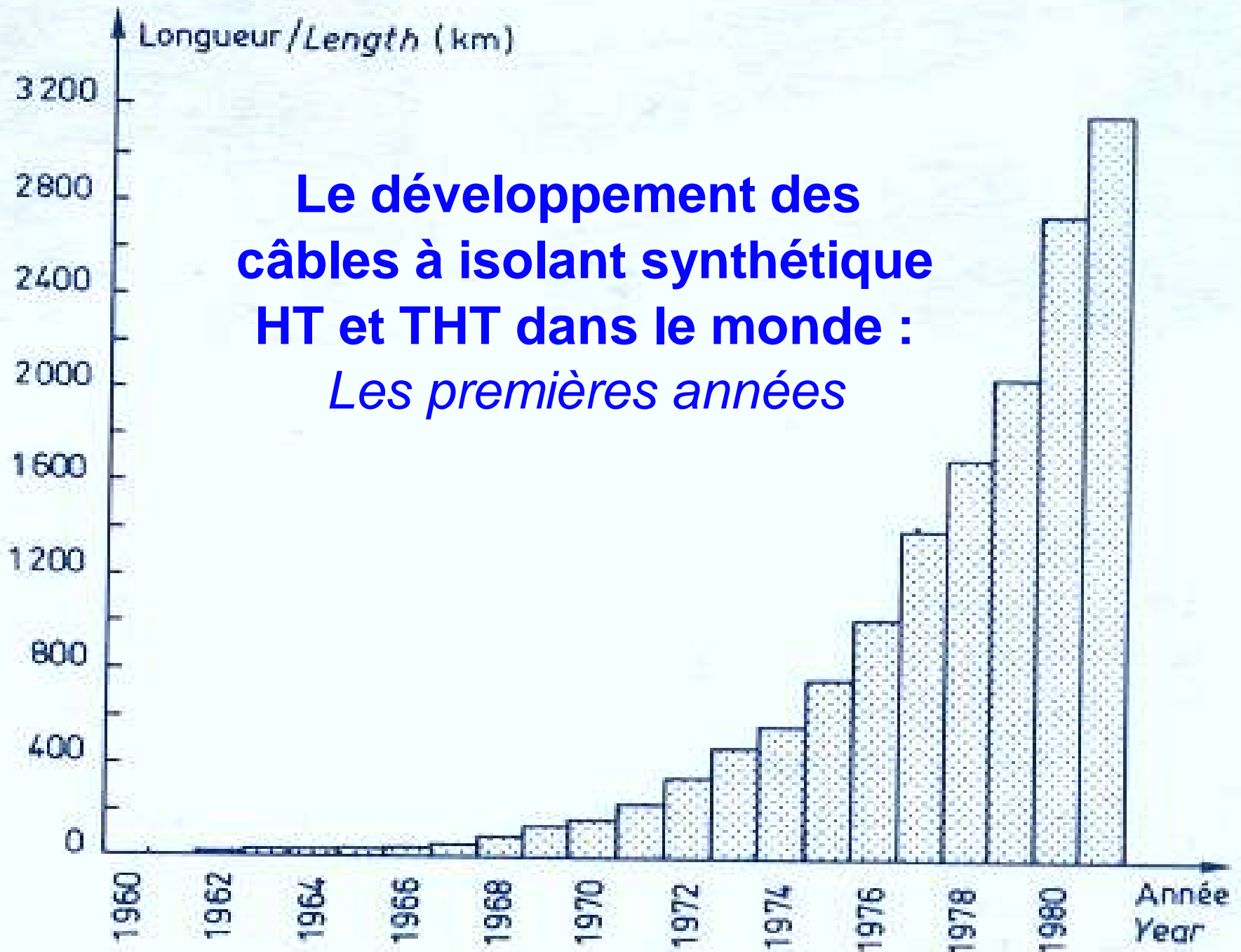


CIS à écran métallique en aluminium ondulé

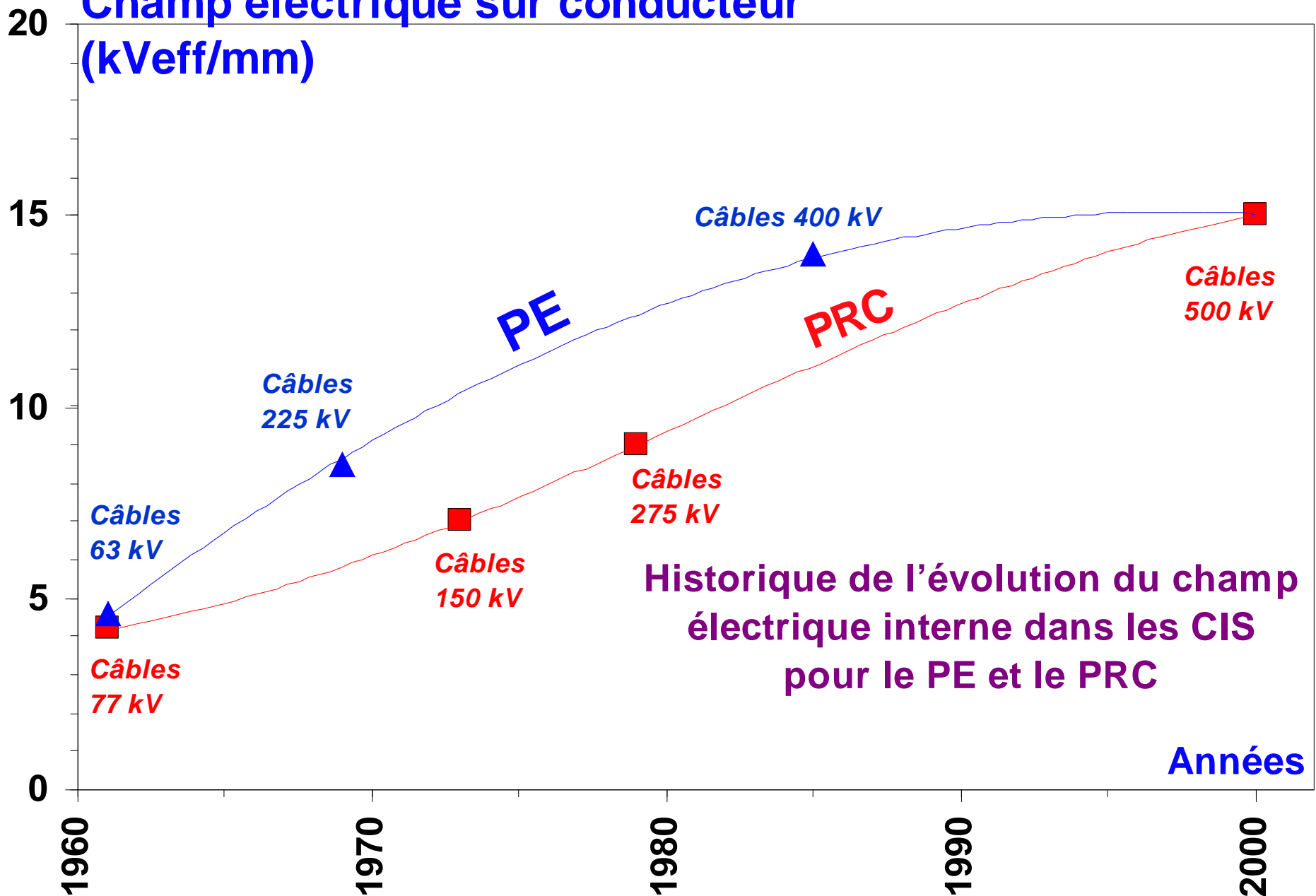


Câbles HT sous marins à isolation "synthétique"

Le développement des câbles à isolant synthétique HT et THT dans le monde :
Les premières années



Champ électrique sur conducteur (kVeff/mm)



LIAISONS 400 kV - PRC en EUROPE

Extrait de la note « Grands projets de liaisons souterraines à très haute tension »

K. Bjorlow-Larsen, M. Del-Brenna, A. Ericsson, R. Meier, M. Kirchner et P. Argaut (Jicable'03)

	L km	P MVA	Int. A	Cond. mm ²	E kV / mm	Ecran Met.	Gaine Eext.	Pose
Berlin	11,7	1100	1600	1600 Cu	11,5 int 5,4 ext	Fils Cu Film Alu	PE Vernis RF*	Tunnel + VF**
	5,4	1100	1600	1600 Cu	12,5 int 6,2 ext	Fils Cu Film Alu	PE Vernis RF	Tunnel + VF
	6,3	1100	1600	1600 Cu	12,5 int 6,2 ext	Alu. ondulé	PE Vernis RF	Tunnel + VF
Copenhague	34,7	1000	1400	1600 Cu	11,5 int 4,9 ext	Plomb extrudé	PE Film SC	Enterrée
Madrid	13	1700 hiver	2450	2500 Cu	11,6 int 6,5 ext	Fils Cu Film Alu	PE Film RF	Tunnel + VF
	13	1700 hiver	2450	2500 Cu	12,5 int 7,2 ext	Film Alu soudé	PE RF	Tunnel + VF
Londres	20	1600	2300	2500 Cu	11,6 int 6,5 ext	Fils Cu Film Alu	PE Film RF	Tunnel + VF
Danemark	28	1000	1400	1200 Al	12,6 int 6 ext	Fils Cu Film Alu	PE Film RF	Enterrée et fourreaux

RF = Retardateur de feu, VF = Ventilation forcée



**Liaison REE « Aéroport Barajas », Madrid, Espagne
2 x 13 km, 1700 MVA, 400 kV, PRC, 2500 mm² Cu**

Quelques recherches dans le domaine des techniques classiques de câbles.

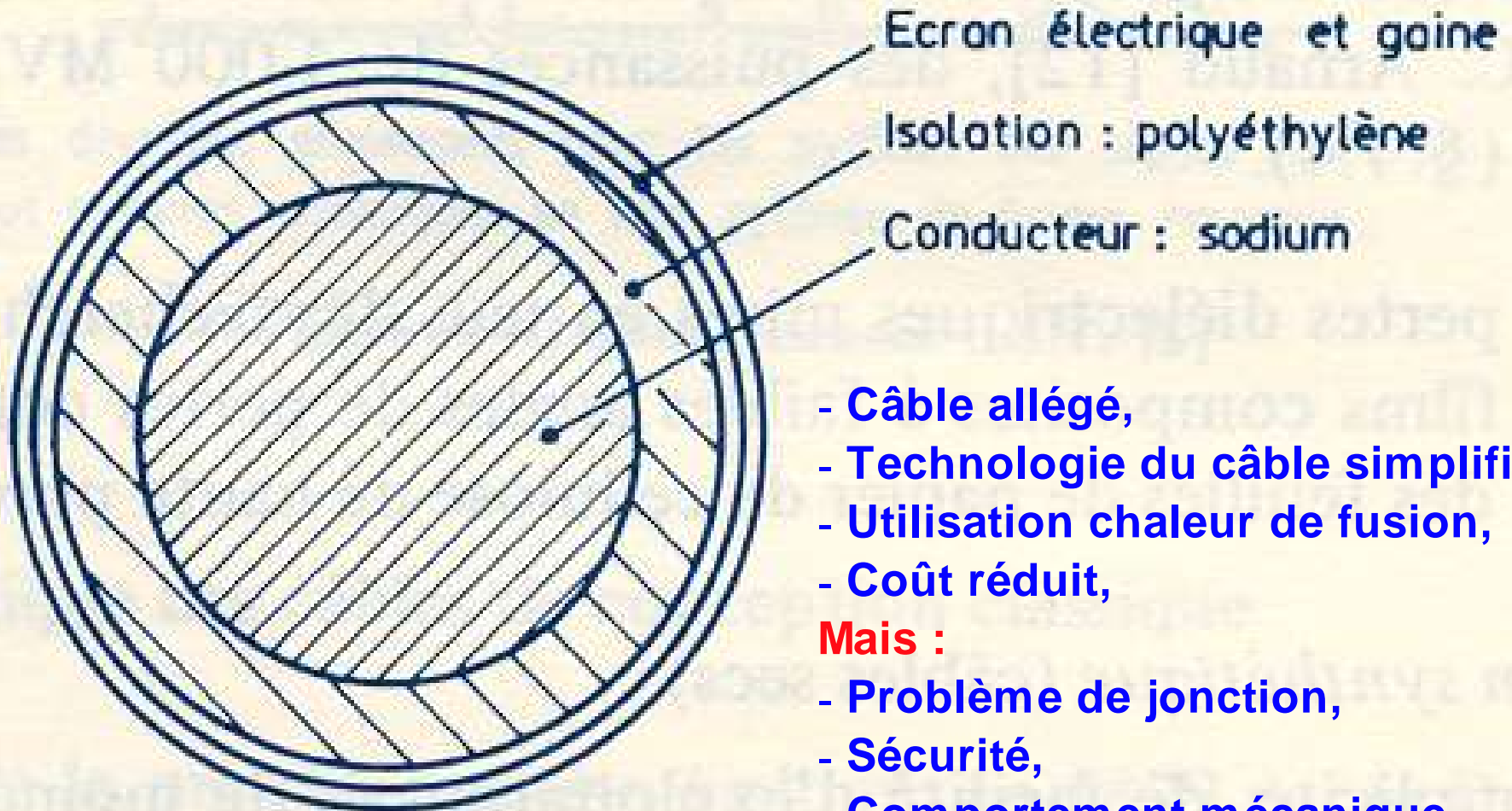
- **Réduction du coût : Nouveaux matériaux, Nouvelles technologies, augmentation des contraintes, allègement, mécanisation de la pose...**
- **Vieillessement et diagnostic : augmentation de la durée de vie,**
- **Augmentation de la capacité de transport, refroidissement forcé, ...**
- **Augmentation de la distance de transport, perspectives de la compensation,**
- **Impact sur l'environnement,**
- **Fiabilité : amélioration des essais, ...**

MATERIAUX CONDUCTEURS

Métal	Cuivre	Magnésium	Aluminium	Sodium
ρ à 20 °C en $\mu\Omega.cm$	1,72	4,46	2,83	4,88
δ à 20 °C en mm	10	16	13	17
Coeff. de temp. °C ⁻¹	4. 10 ⁻³	17,84. 10 ⁻³	4. 10 ⁻³	4. 10 ⁻³
C _{spécifique} en J / kg.°C	385	1050	890	(1)
T fusion en °C	1083	651	658	97,6
Ch. De fusion en kJ / kg	205	372	388	115
Densité en kg / m ³	d = 8900	d = 1740	d = 2700	d = 970
Prix en €/ kg	c = 2,7 en fil	c = 2	c = 1,65 en fil	c = 0,9
Critères de comparaison économique à même capacité de transport (référence : Alu)				
$\rho . d . c$ (*)	3,5	1,2	1	0,3
$(\rho . d . c)^{1/2}$ (**)	1,9	1,1	1	0,6
(*) à même niveau de pertes				
(**) à l'optimum technico-économique (Investissement + Pertes actualisées)				
(1) Sodium solide : $1190,26 + 0,6494t + 1,053.10^{-1}$ Sodium liquide : $1436,7 - 0,5805t + 4,62.10^{-4}t^2$ avec t en °C				

Câble à conducteur en Sodium

Quelques développements aux USA en moyenne tension

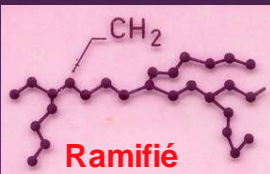

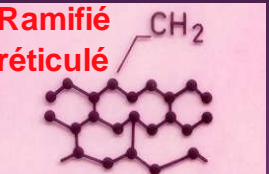


- Câble allégé,
- Technologie du câble simplifiée
- Utilisation chaleur de fusion,
- Coût réduit,

Mais :

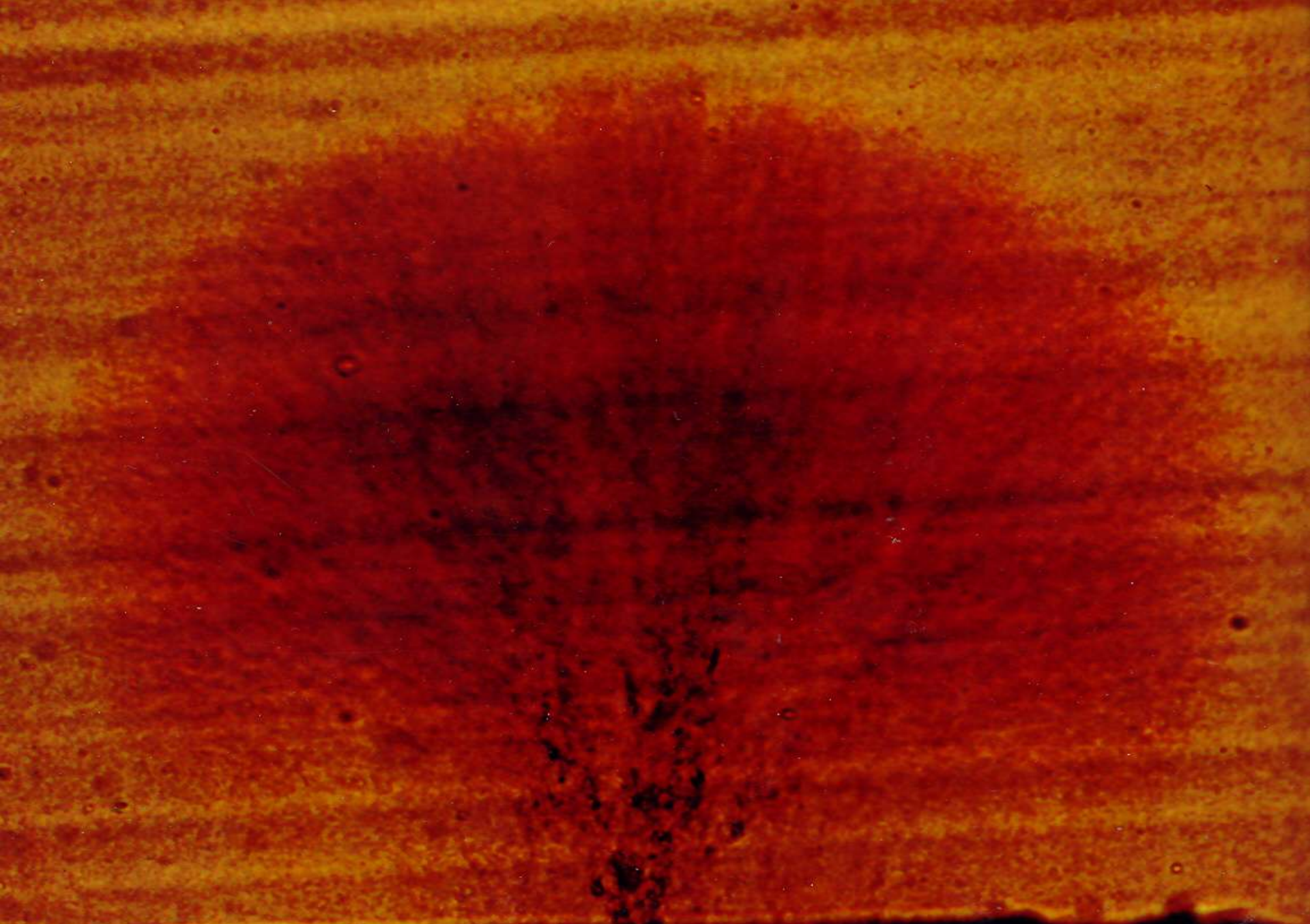
- Problème de jonction,
- Sécurité,
- Comportement mécanique

MATERIAUX ISOLANTS

Isolants	PEBD	PEHD	PRC	PI
				
Cristallinité	faible	forte	faible	-
Densité	0,91 à 0,93	0,94 à 0,96	0,91 à 0,93	-
Comportement méca.	souple	rigide	souple	-
Fusion cristalline	105 à 115°C	125 à 135 °C	100 à 105 °C	-
T nominale en °C	70°C	80°C	90°C	85°C
Résistivité thermique °C . cm / W	350	300	350	500 à 600
Constante diélectrique	2,3	2,3	2,3	3 à 4
tg δ	1 . 10⁻⁴	1 . 10⁻⁴	4 . 10⁻⁴	15 à 20 . 10⁻⁴
E max. int. kV_{eff} / mm	12 à 15	12 à 15	12 à 15	15 à 20

MECANISMES DE VIEILLISSEMENT

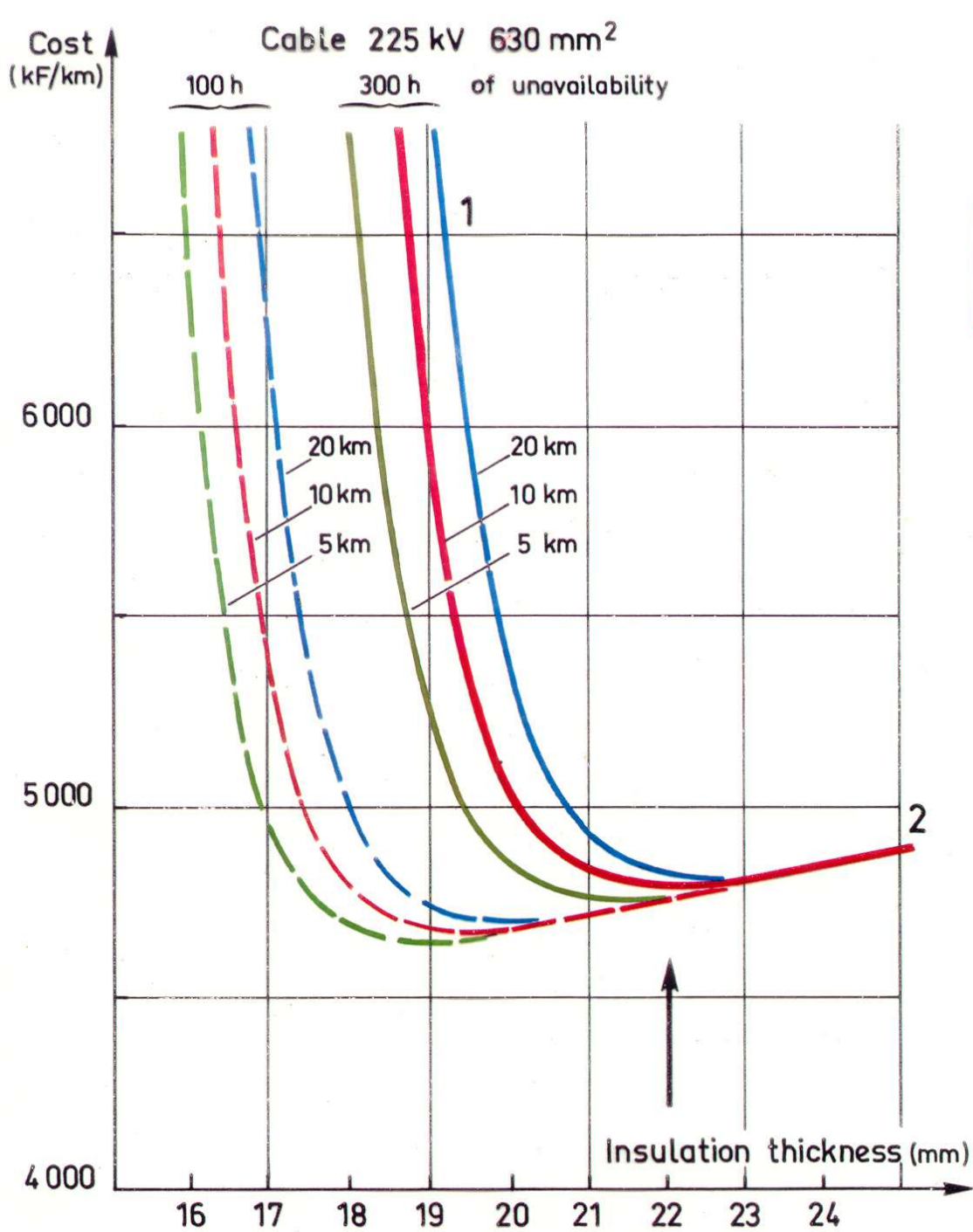
- **Vieillissement thermique,**
- **Vieillissement diélectrique,**
- **Vieillissement mécanique et thermomécanique,**
- **Vieillissement lié à des facteurs d'environnement**



DANGER DE L'HUMIDITE : Etude des arborescences



Développement de la pose mécanisée pour les câbles HT

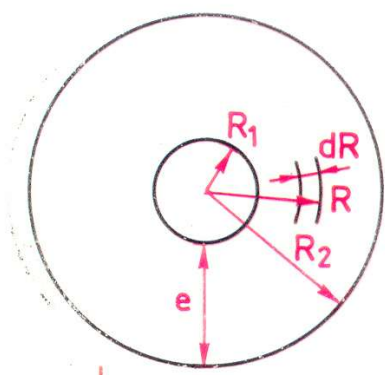


$$P(E, t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{t_0}\right)^a \left(\frac{E}{E_0}\right)^b \frac{\delta v}{v_0}}$$

$$F(E, t) = e^{-\left(\frac{t}{t_0}\right)^a \left(\frac{E}{E_0}\right)^b \frac{\delta v}{v_0}}$$

$$\prod_{R_1}^{R_2} dF(E_{R_1}, t) = F(R_1, e, t)$$

$$dF(E_{R_1}, t) = e^{-\left(\frac{t}{t_0}\right)^a \left(\frac{E_R}{E_0}\right)^b \frac{2\pi R dR L}{v_0}}$$



$$E_R = \frac{V}{R \log \frac{R_2}{R_1}}$$

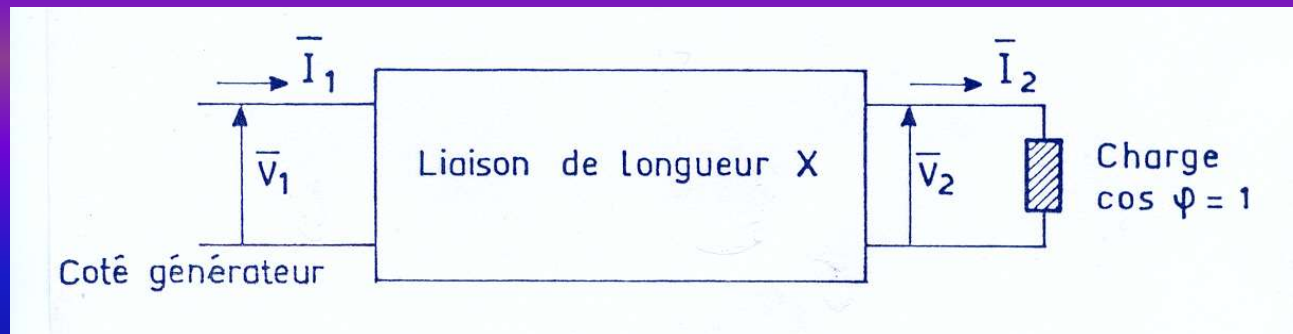
$$F(R_1, e, t) = e^{kt^a \left[\frac{1 - \left(\frac{e}{R_1}\right)^{2-b}}{\log 1 + \left(\frac{e}{R_1}\right)^b} \right]}$$

Câbles à isolation synthétique
Coût et épaisseur d'isolant

Aptitude d'un câble au transport à distance

- Une puissance apparente constante $S_1 = V_1 I_1$ est injectée à l'origine de la liaison de longueur X ,
- La liaison alimente sous la tension nominale $V_2 = V_n$ une charge variable Présentant un facteur de puissance $\cos \varphi$ égal à l'unité

« **Longueur critique** » = Longueur de liaison pour laquelle l'énergie active au niveau de la charge est nulle.



Une longueur critique existe si : $S_1 <$ la moitié de la puissance caractéristique de la liaison.

« **Longueur LAT n%** » :

Longueur X_n pour laquelle la réduction de puissance active transmissible est égale à n%.

Aptitude au transport à distance

Limitations :

- L'échauffement des conducteurs et des isolants,
- Le niveau d'isolement des câbles

400 kV	Câbles OF		CIS		CIG
Puissance en MVA	800	1600	800	1600	1600
Refroidissement	naturel	forcé	naturel	forcé	naturel
Puissance caract.	3448 MVA		2792 MVA		2469 MVA Gaines MALT
Longueur critique en courant	53 km	100 km	80 km	149 km	545 km
Longueur critique en tension	-	-	-	62 km Pour + 10%	409 km Pour + 10%

QUELQUES LIAISONS DE PLUS DE 20 km

Extrait de l'enquête en cours JICABLE / WETS' RP 04

Pays	Liaison	Puissance Tension Longueur	Câbles	compensation
Espagne / Maroc	REE - Liaison Espagne - Maroc	700 MW 400 kV 29 km	OF 800 mm ² Cu / 1600 mm ² Cu	150 Mvar Esp. 2x125 Mvar Mar.
Canada	BC Hydro BC to Vancouver	...MVA 500 kV 37 km	OF	135 Mvar ind. à 165 Mvar Capa.
Japon	TEPCO Shin Toyosu Line	900 MW 500 kV 39,8 km	PRC 2500 mm ² Cu en tunnel	300 Mvar
Corée	KEPCO Busan Line	523 MVA 345 kV 22 km	OF 2000 mm ² Cu en tunnel	2 x 200 Mvar

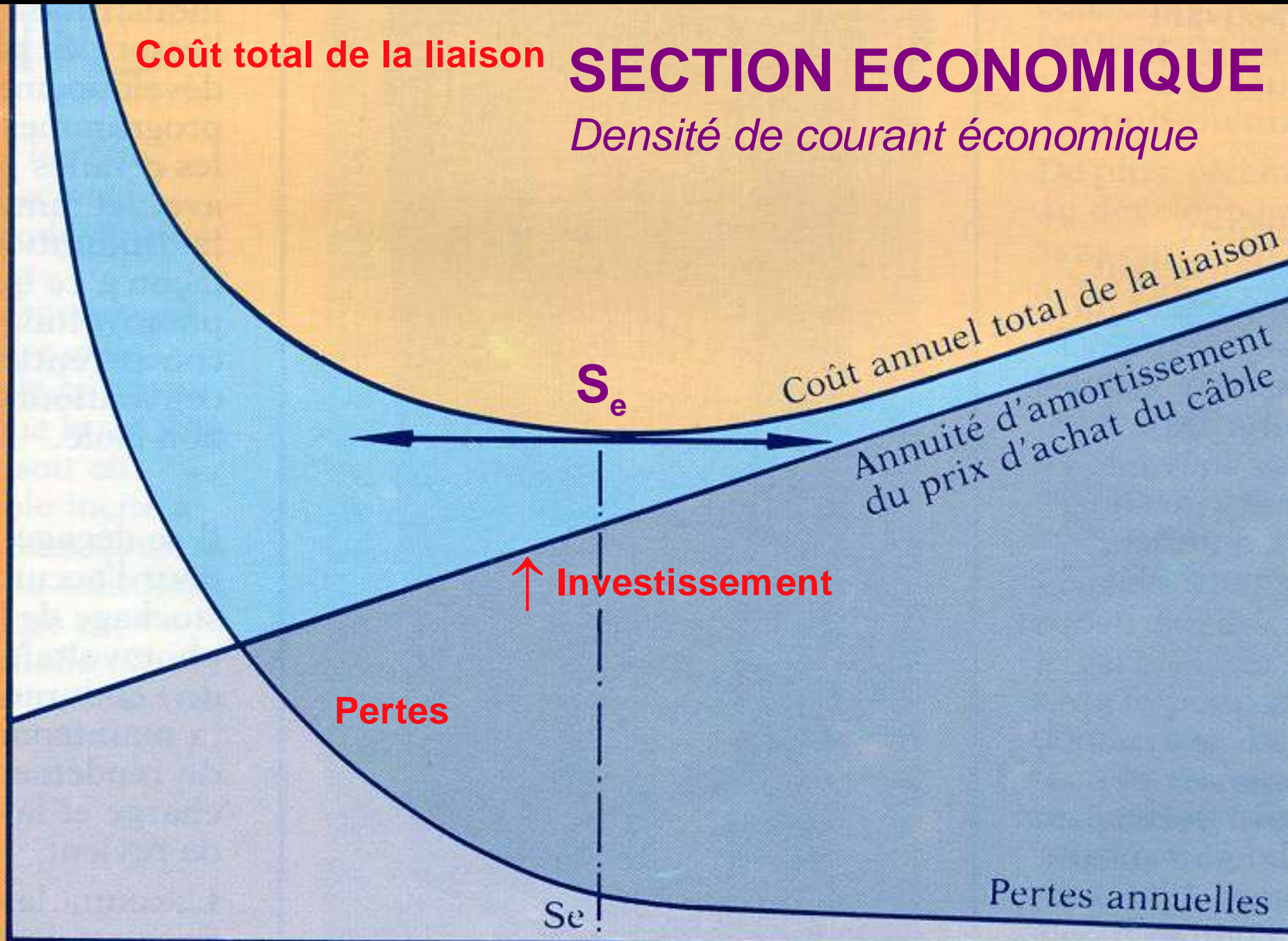
CÂBLES A REFROIDISSEMENT FORCE

Coût total de la liaison

SECTION ECONOMIQUE

Densité de courant économique

Prix en francs



Coût annuel total de la liaison

Annuité d'amortissement
du prix d'achat du câble

S_e

↑ Investissement

Pertes

Pertes annuelles

S_e

Section économique

Section en mm²

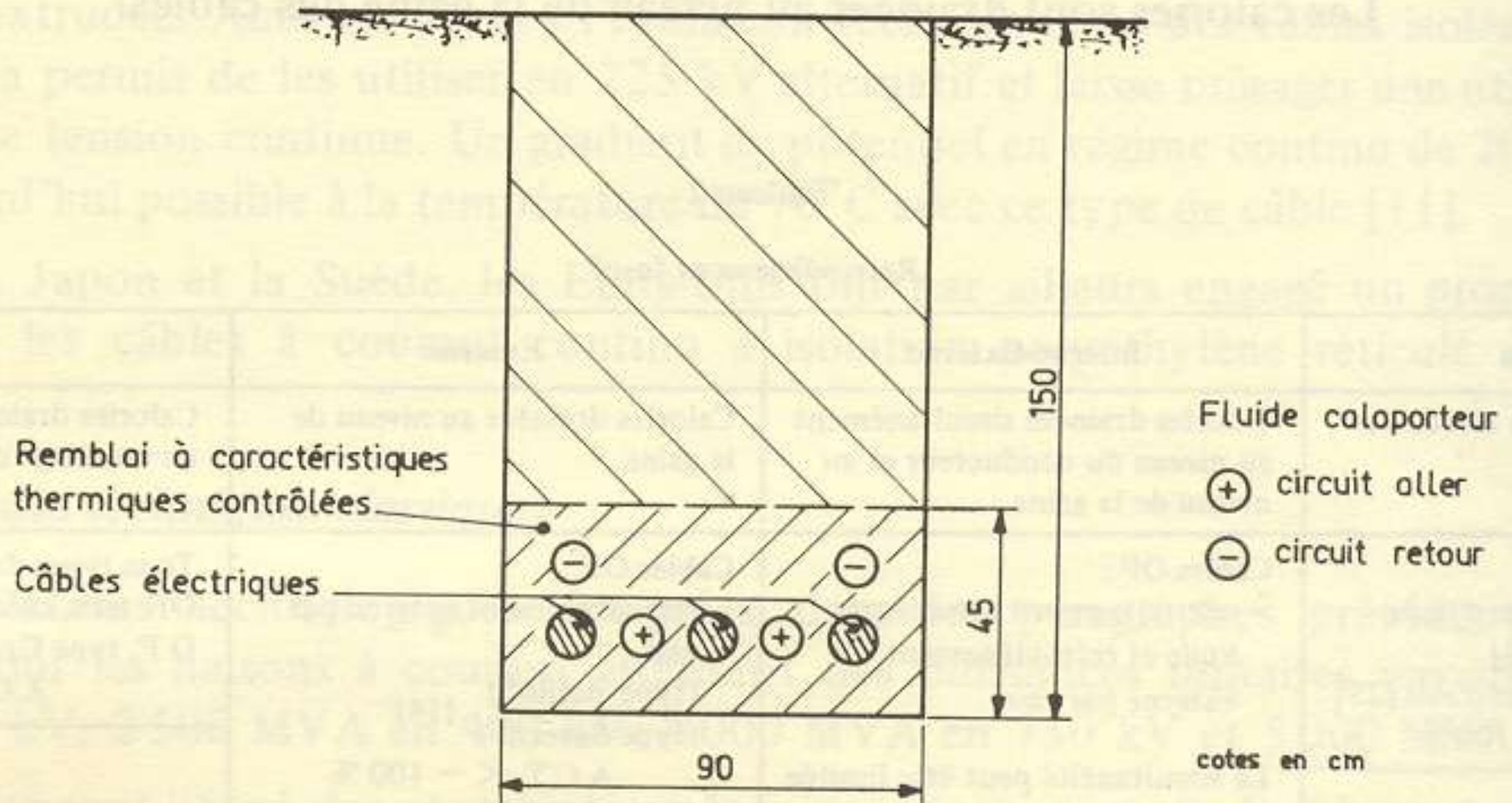
LE REFROIDISSEMENT FORCE : intérêt?

- **Fonctionnement du câble près de sa densité de courant économique,**
- **Sensibilité réduite à l'environnement thermique et impact thermique réduit sur l'environnement,**
- **Possibilité d'évolution de la puissance transportée avec échelonnement des investissements,**
- **Augmentation de la compacité de la liaison par rapport à une liaison de même capacité de transport à refroidissement naturel.**
- **Réduction du coût du transport d'énergie.**

REFROIDISSEMENT LATÉRAL

Accroissement de la charge : 50 %

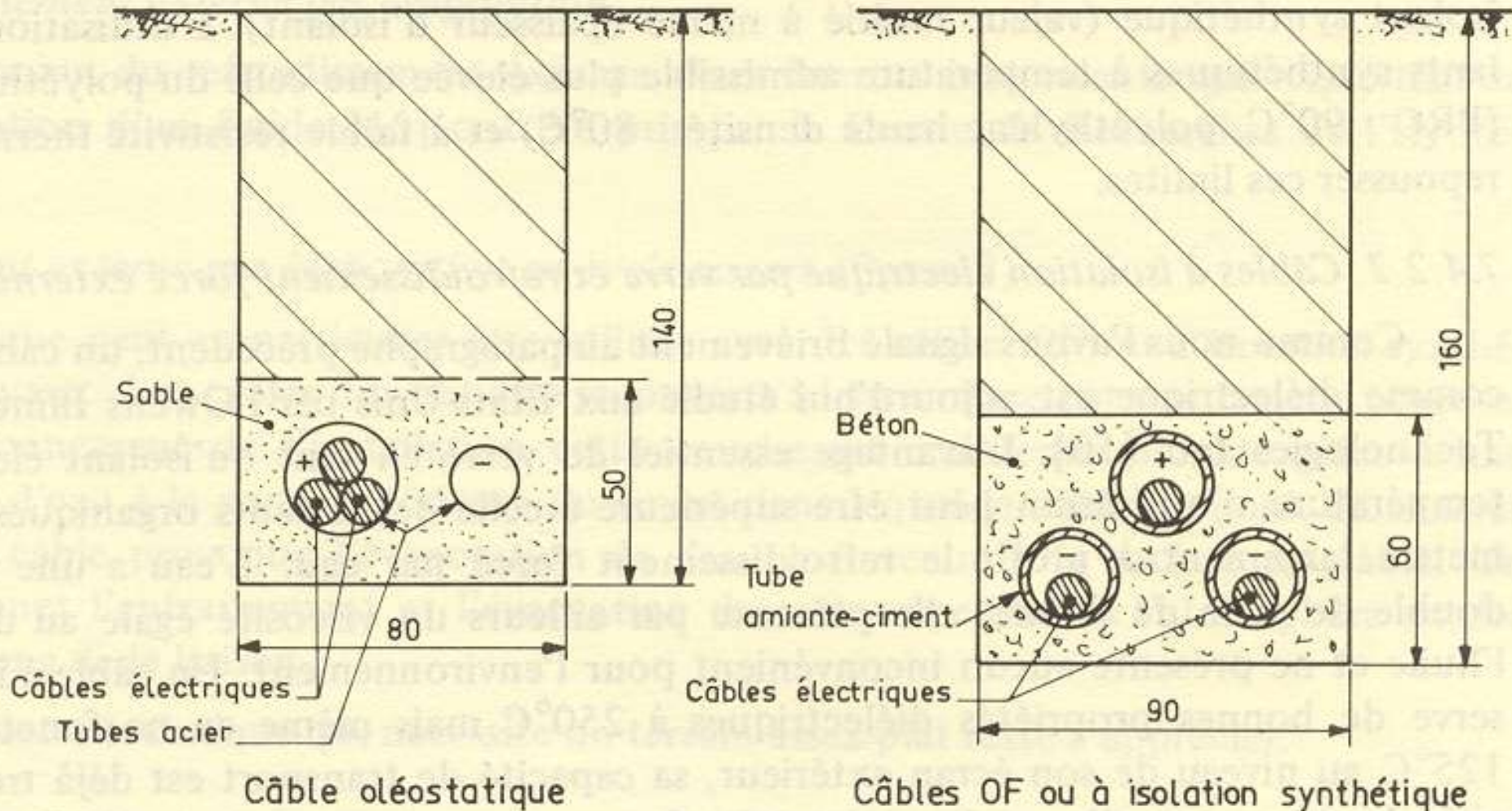
Développement en Grande Bretagne, Autriche, Italie, ...



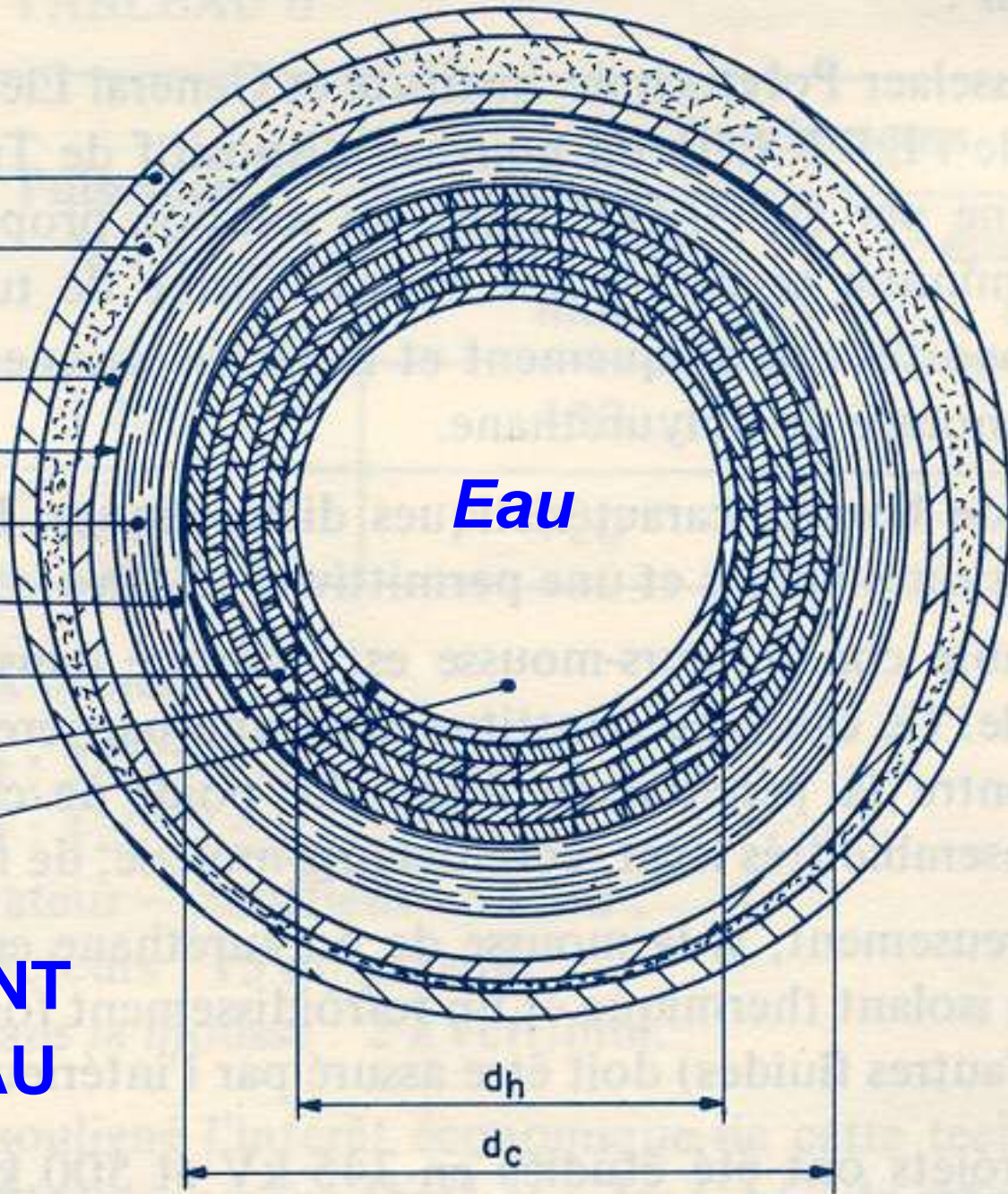
REFROIDISSEMENT EXTERNE

Accroissement de la charge : 100 %

Développement en Grande Bretagne, Allemagne, ...

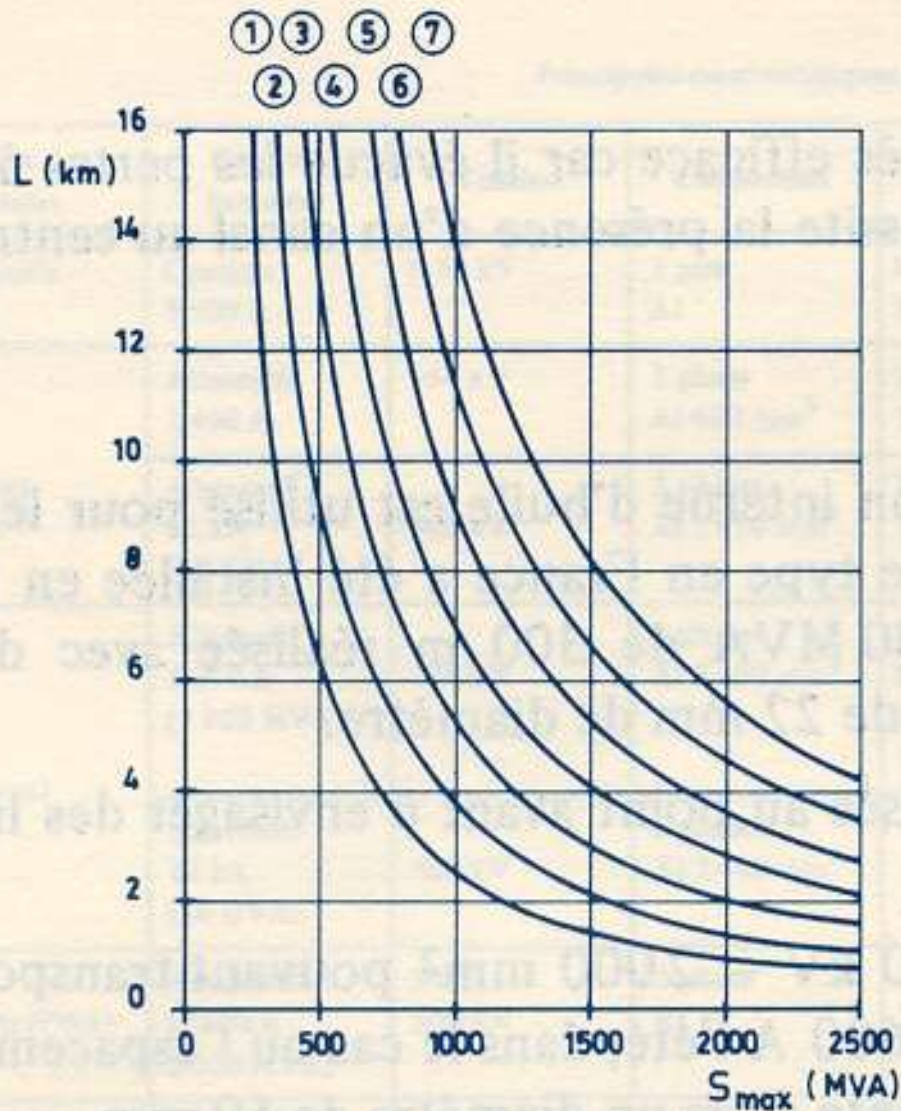


- Gaine PVC _____
- Protection anticorrosion _____
- Gaine sous forme de tube ondulé
d'aluminium _____
- Ecran _____
- Isolement _____
- Papiers semi-conducteurs _____
- Conducteur câblé, aluminium $\varnothing d_c$ _____
- Tuyau étanche à l'eau _____
- Canal à eau, \varnothing du canal creux d_h _____



**REFROIDISSEMENT
INTERNE PAR EAU**

REFROIDISSEMENT INTERNE PAR EAU



	d_h /mm	d_c /mm	A_{el} /mm ²
1	50	80	2750
2	60	90	3100
3	70	100	3600
4	80	110	4000
5	90	120	4400
6	100	130	4800
7	110	140	5300

Projet allemand, 1974
Puissance unitaire x 5
Coût / 2

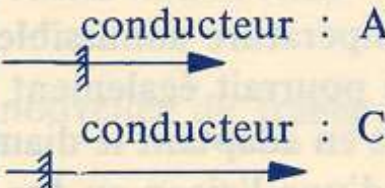
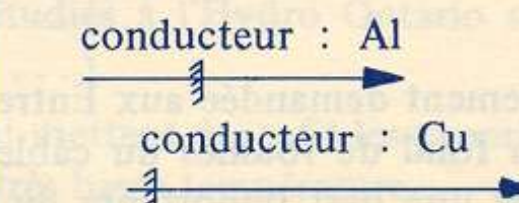
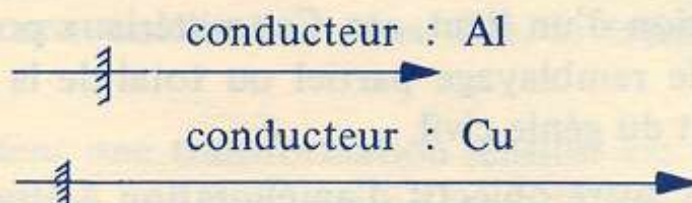
Distance L entre stations de refroidissement successives en fonction de la puissance maximale S_{max} de câbles 110 kV à refroidissement interne par eau

Les paramètres sont le diamètre du canal creux d_h

le diamètre du conducteur d_c

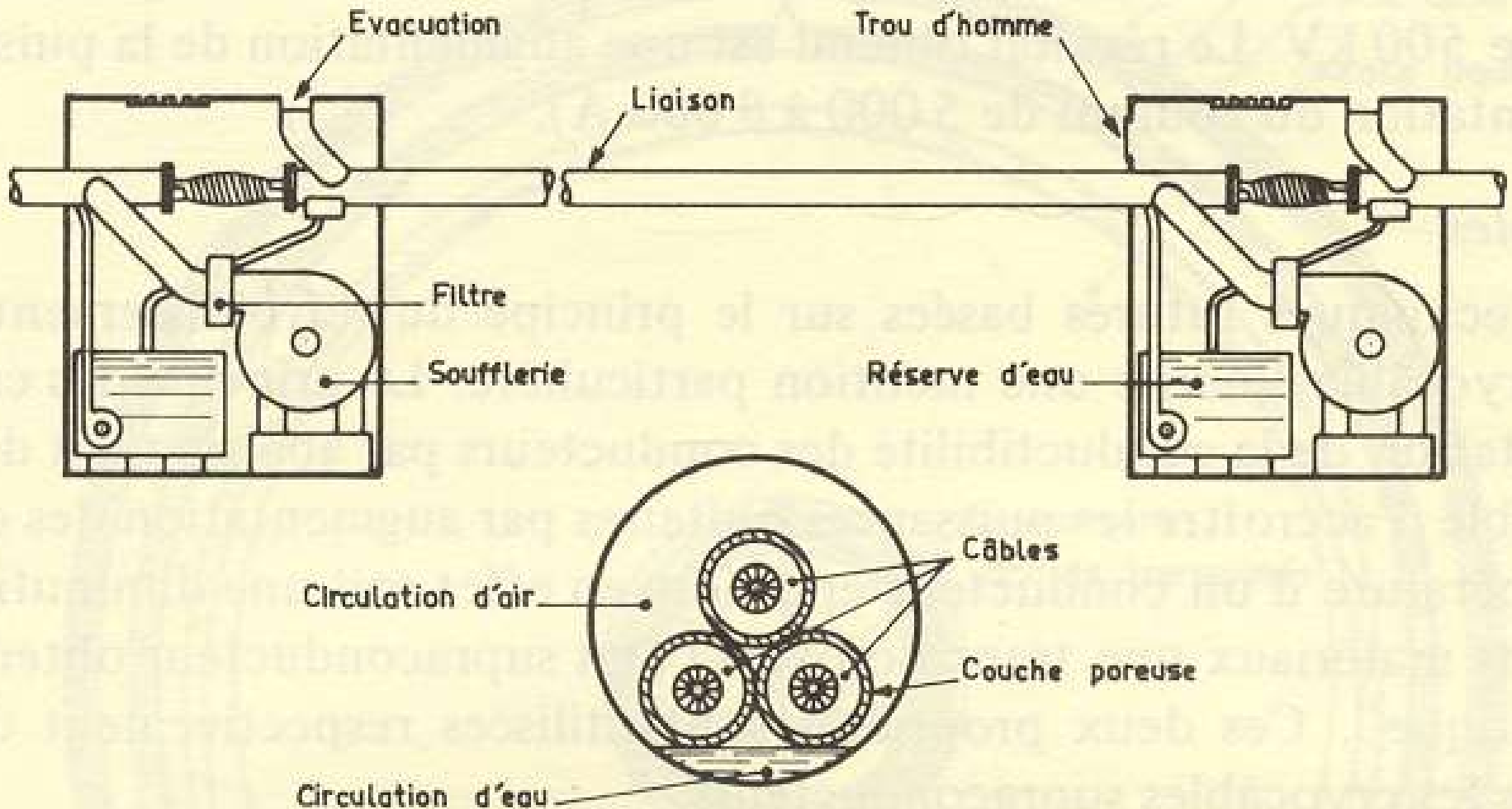
la section du conducteur A_{el}

Seuil d'intérêt du refroidissement forcé

Tension (kV)	Puissance (MVA)				
	1 000	2 000	3 000'	4 000	5 000
225	isolant : papier + huile ou polyéthylène extrudé conducteur : Al 				
400	isolant : papier (kraft ou synthétique) + huile ou polyéthylène extrudé conducteur : Al 				
750	isolant : papier (kraft ou synthétique) + huile conducteur : Al 				

REFROIDISSEMENT EXTERNE PAR EVAPORATION

en cycle ouvert - Augmentation de la charge : 60 %
Projet Hydro Quebec, 1975



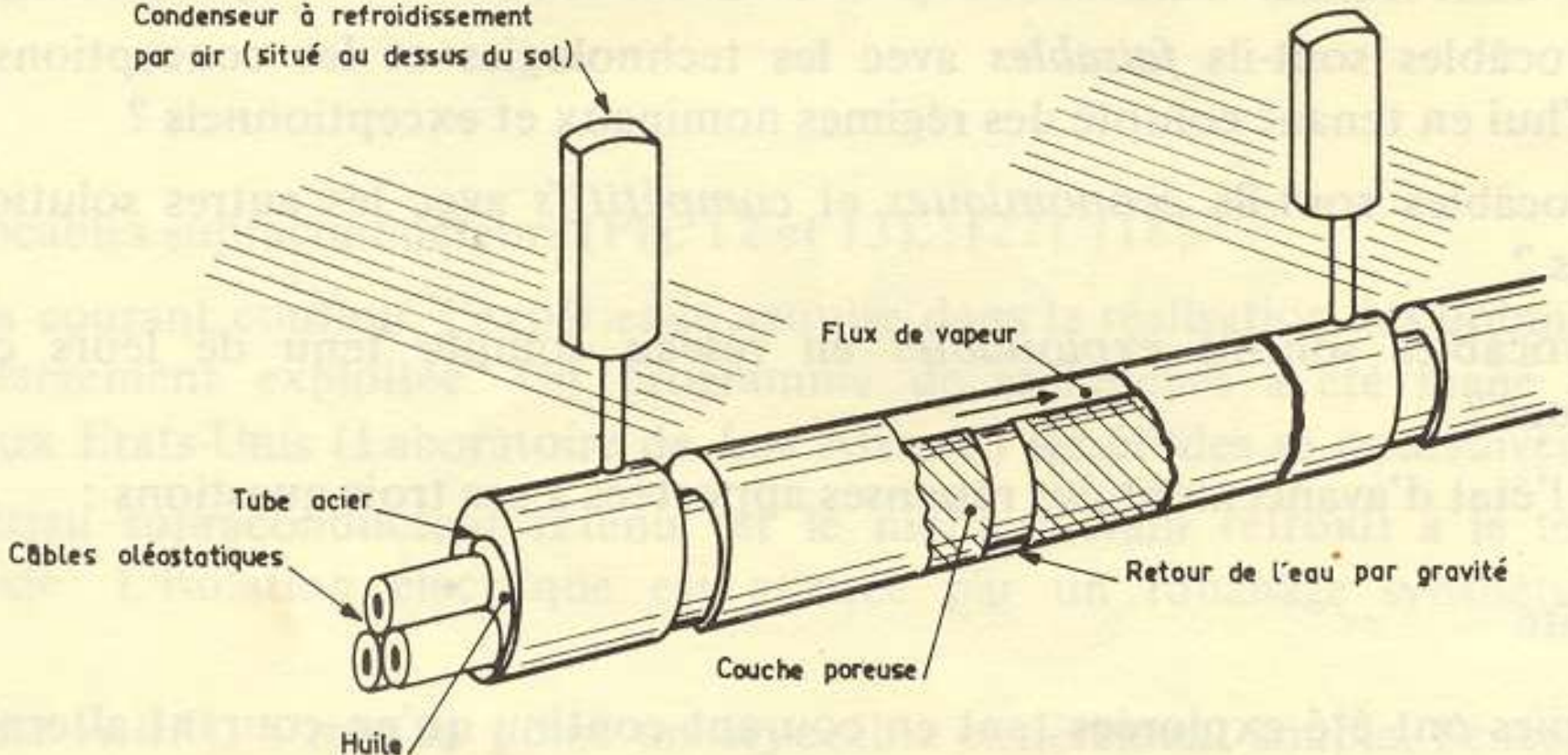
REFROIDISSEMENT EXTERNE PAR EVAPORATION

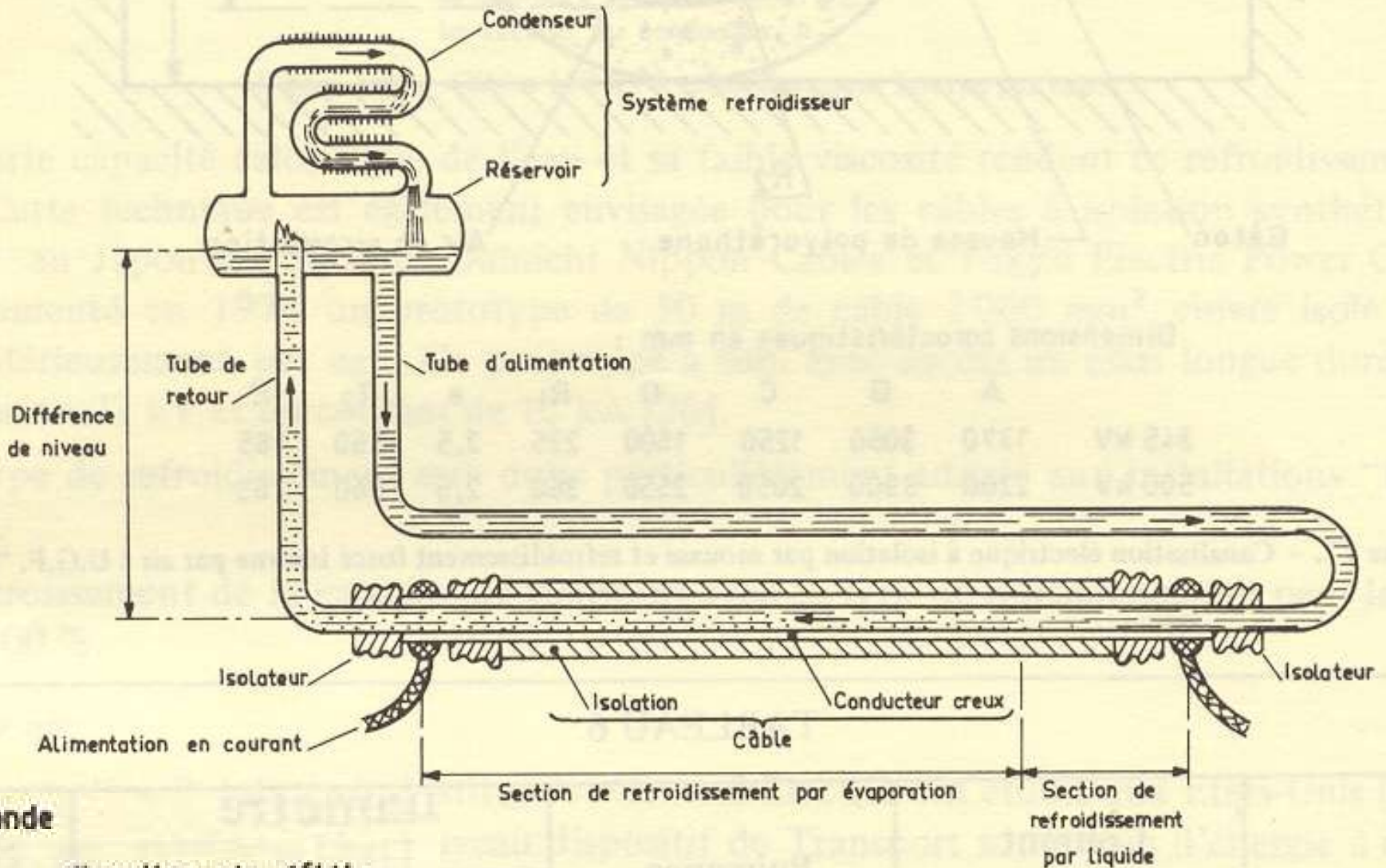
en cycle fermé - thermosiphon

Augmentation de la charge : 60 %

Projet Hydro Quebec, 1975

Condenseur à refroidissement
par air (situé au dessus du sol)





REFROIDISSEMENT INTERNE PAR EVAPORATION

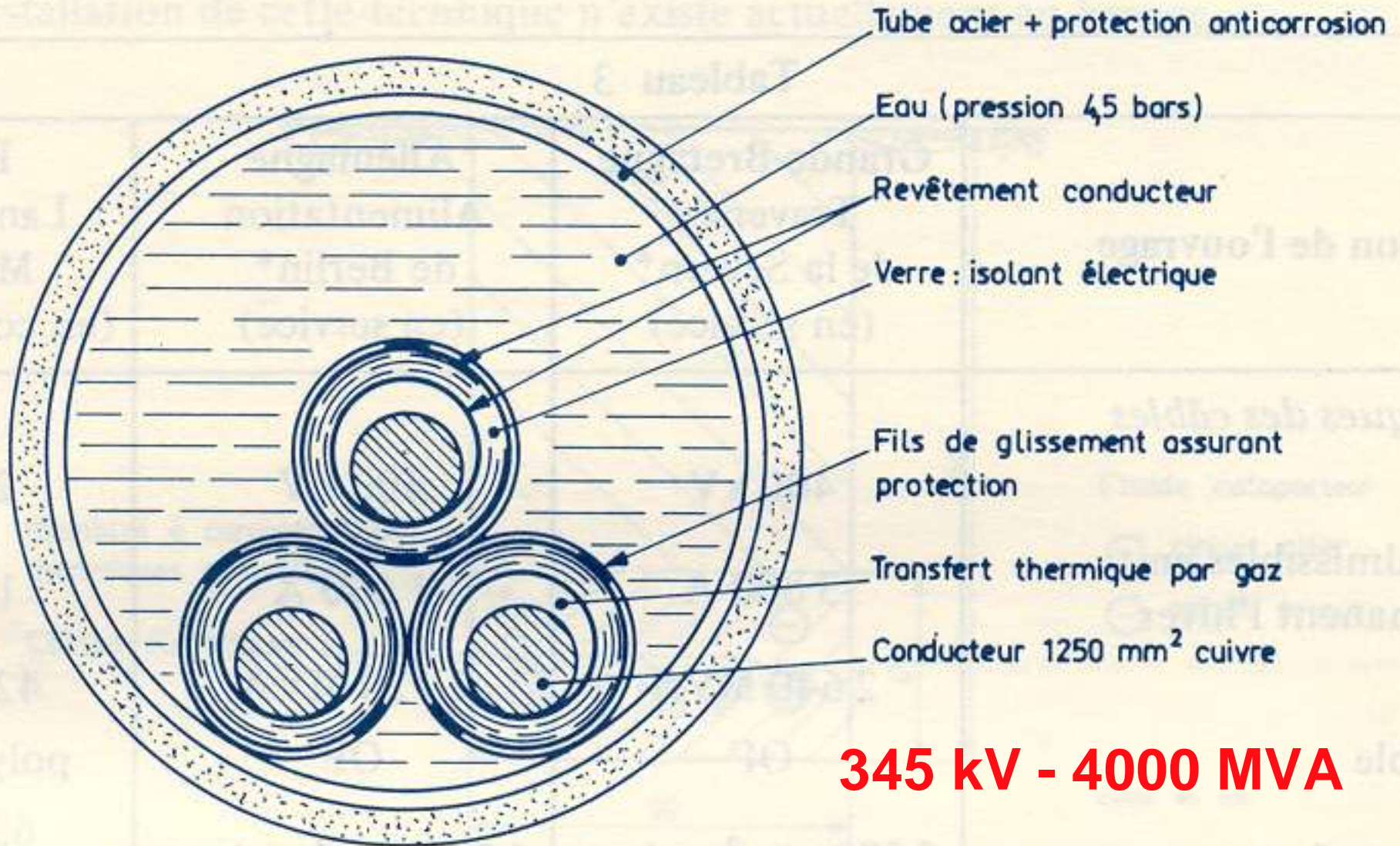
Projet TEPCO / Sumitomo, Japon, 1976

Prototype 22 kV, 15 kA

2000 mm² Al, Isol. : PRC, 50 m

Câble à isolation électrique par verre et refroidissement forcé externe,

Owens Illinois Inc., Power Technologies Inc., DOE, USA



345 kV - 4000 MVA

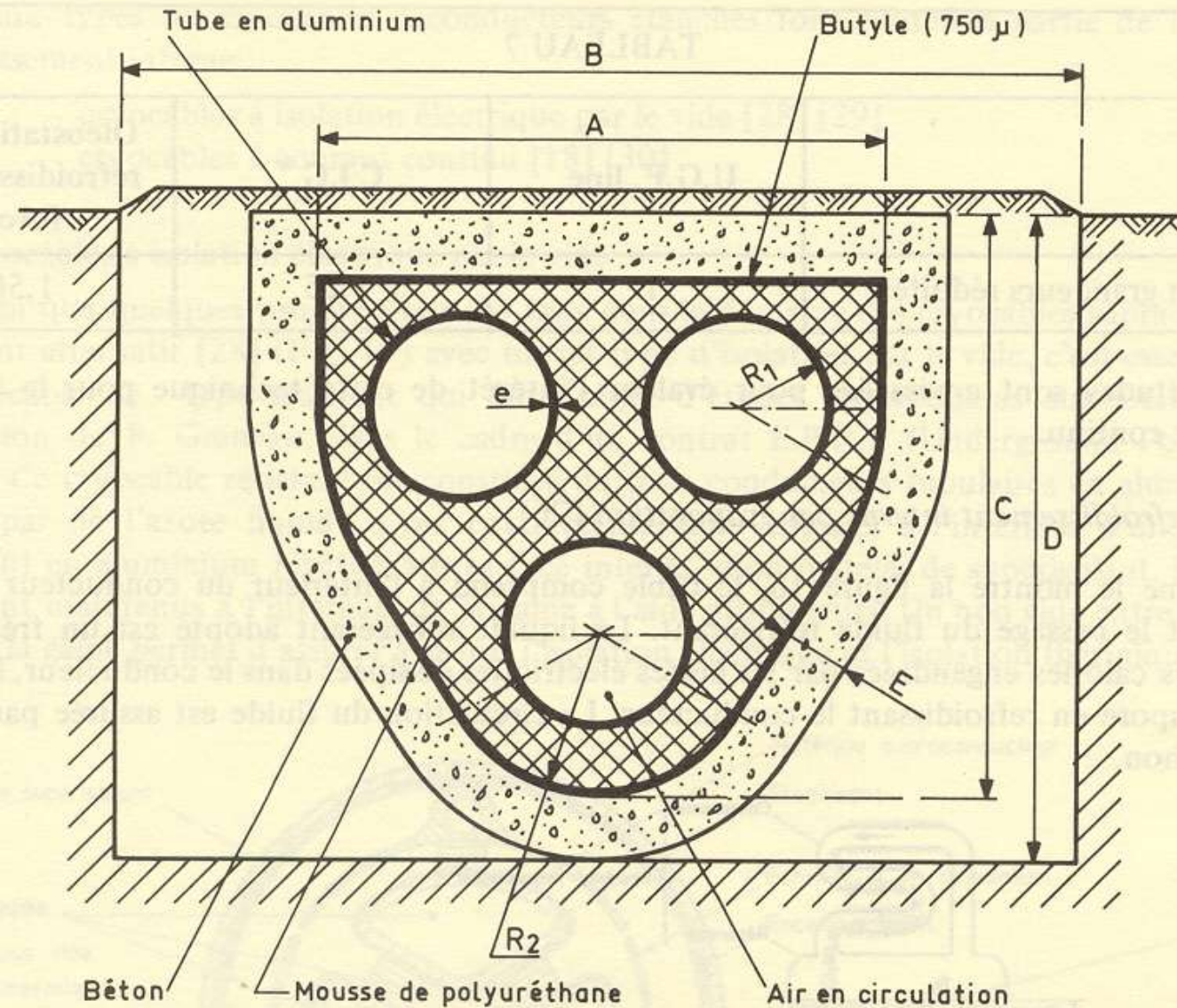
7 - TECHNIQUES ET CONCEPTS NOUVEAUX

CÂBLES A CONDUCTEURS TUBULAIRES

UGF Line

345 kV - 1 400 MVA

500 kV - 4 500 MVA



CÂBLE A ISOLATION MOUSSE
Rensselaer Polytechnic Institute
et General Electric - EPRI 1977 - USA

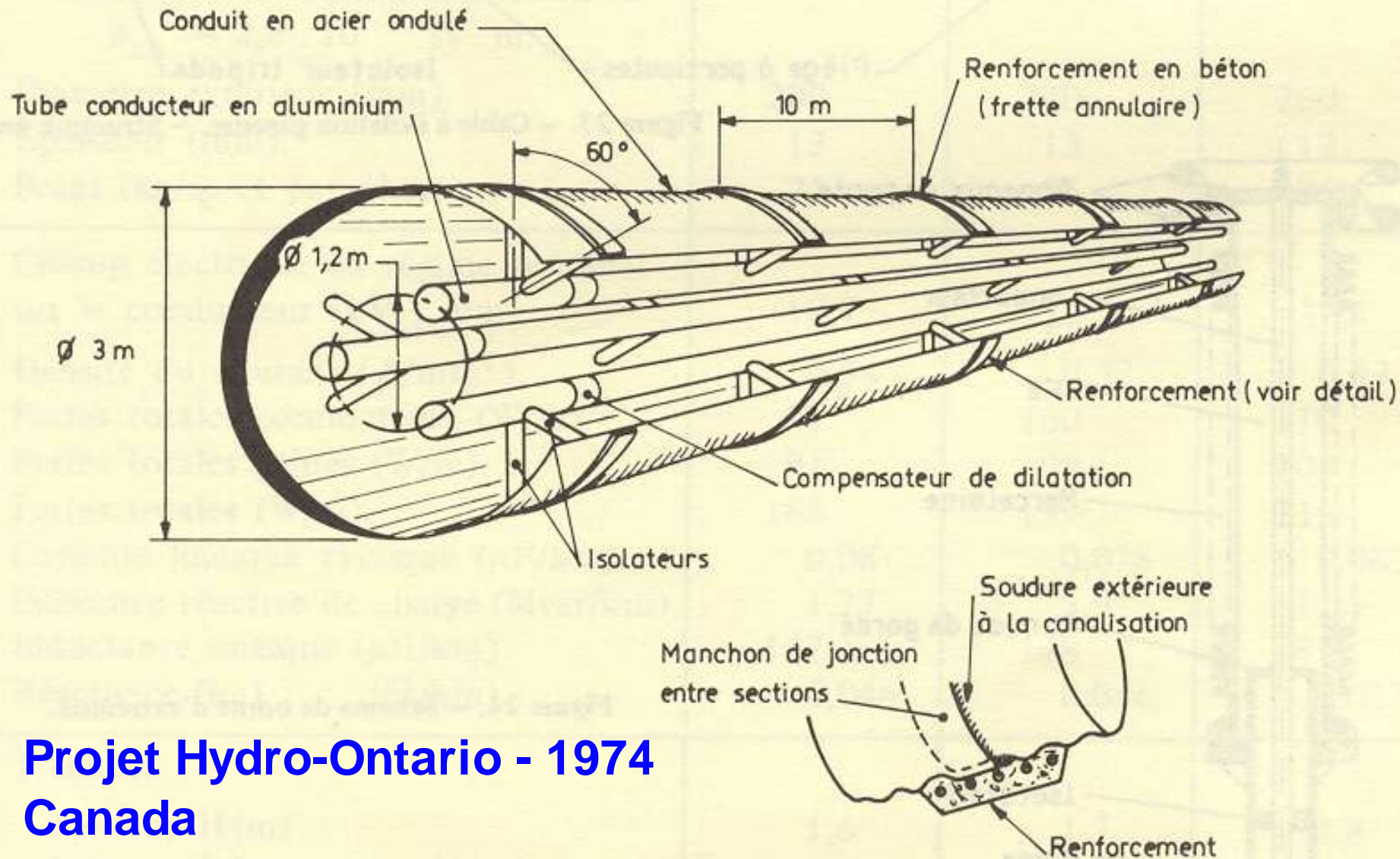
Dimensions caractéristiques en mm :

	A	B	C	D	R ₁	e	R ₂	E
345 kV	1370	3050	1250	1600	225	2,5	350	165
500 kV	2200	3900	2050	2550	360	2,5	560	265

CÂBLE A ISOLATION AIR - CIA

Ducted Air Medium Underground Transport (DAMUT)

230 kV - 1 500 MVA



Projet Hydro-Ontario - 1974
Canada

CABLES A ISOLATION GAZEUSE (CIG ou LIG)

Première liaison installée dans le monde :
1971 aux USA - 345 kV, 2000 A, 1195 MVA, 122m
Posée au dessus du sol.



**CROISEMENT DE LIGNES :
1975, CIG, SF₆,
500kV, 3000A, 2598 MVA,
Enterrée, longueur : 192m.**



**Site : Sickler - Raver,
Ellensburg, Washington, USA.**

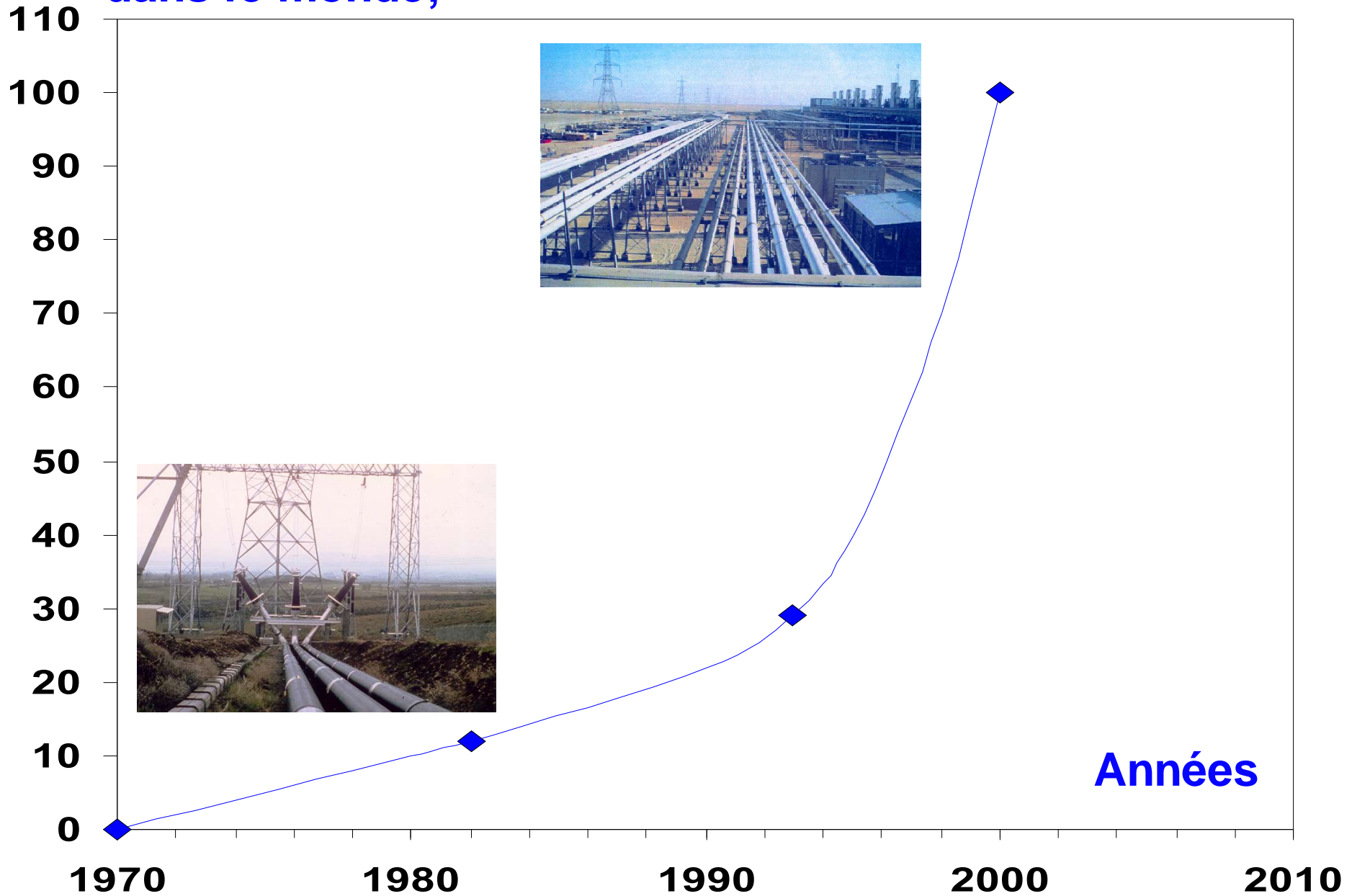
EVACUATION DE CENTRALE :
1981, CIG, SF₆,
400kV, 1580 A, 1095 MVA,
Pose au dessus du sol,
longueur : 483 m + 525 m.



Site : Centrale nucléaire,
Chinon, France.

Longueurs cumulées de liaisons CLG triphasées dans le monde;

dans le monde;



CABLES A ISOLATION GAZEUSE : Avantages

- . Capacités de transport élevées,
- . Possibilité technique de transport à grande distance,
- . Matériel statique,
- . Pertes réduites,
- . Rayonnement électromagnétique très faible dans son environnement,

CABLES A ISOLATION GAZEUSE : Inconvénients

- . **Coûts élevés,**
- . **Mise en oeuvre de SF⁶,**
- . **Encombrement important,**
- . **Nécessité d'un contrôle de pression,**
- . **Difficultés de mise en oeuvre : mise sous vide, ...**
- . **Longues durées de réparation.**

CÂBLES A ISOLATION GAZEUSE

Quelques réalisations récentes

Pays	Liaison	I Amp.	U kV	MVA	Longueur	Mise En service	Gaz Diamètre gaine L unitaire
Japon	CEPCO Shinmeika - Tokai	6 300	275	1300 to 2850	3,25 km	1998	SF⁶ 4,4 bar abs. 480 mm, 14 m
Arabie Saoudite	PP9	1200	420	900	5,6 km	2000	SF⁶ 6,5 bar abs. 464 mm, 10,9 m
Suisse	PALEXPO (en galerie)	2000	230	800	0,4 km	2001	20% SF⁶, 80% N² 7 bar abs. 512 mm, 14 m
Thaïlande	SAI NOI	4000	550	3800	1,2 km	2003	60% SF⁶, 40% N² 7 bar abs. 517 mm, 18 m
GB	Hams Hall	4000	420	2900	0,545 km	2003	10% SF⁶, 90% N² 10,3 bar abs. 520 mm, 11,5 m

Arabie Saoudite : Liaison PP9 - 1200 A, 420 kV, 900 MVA, 3,5 km

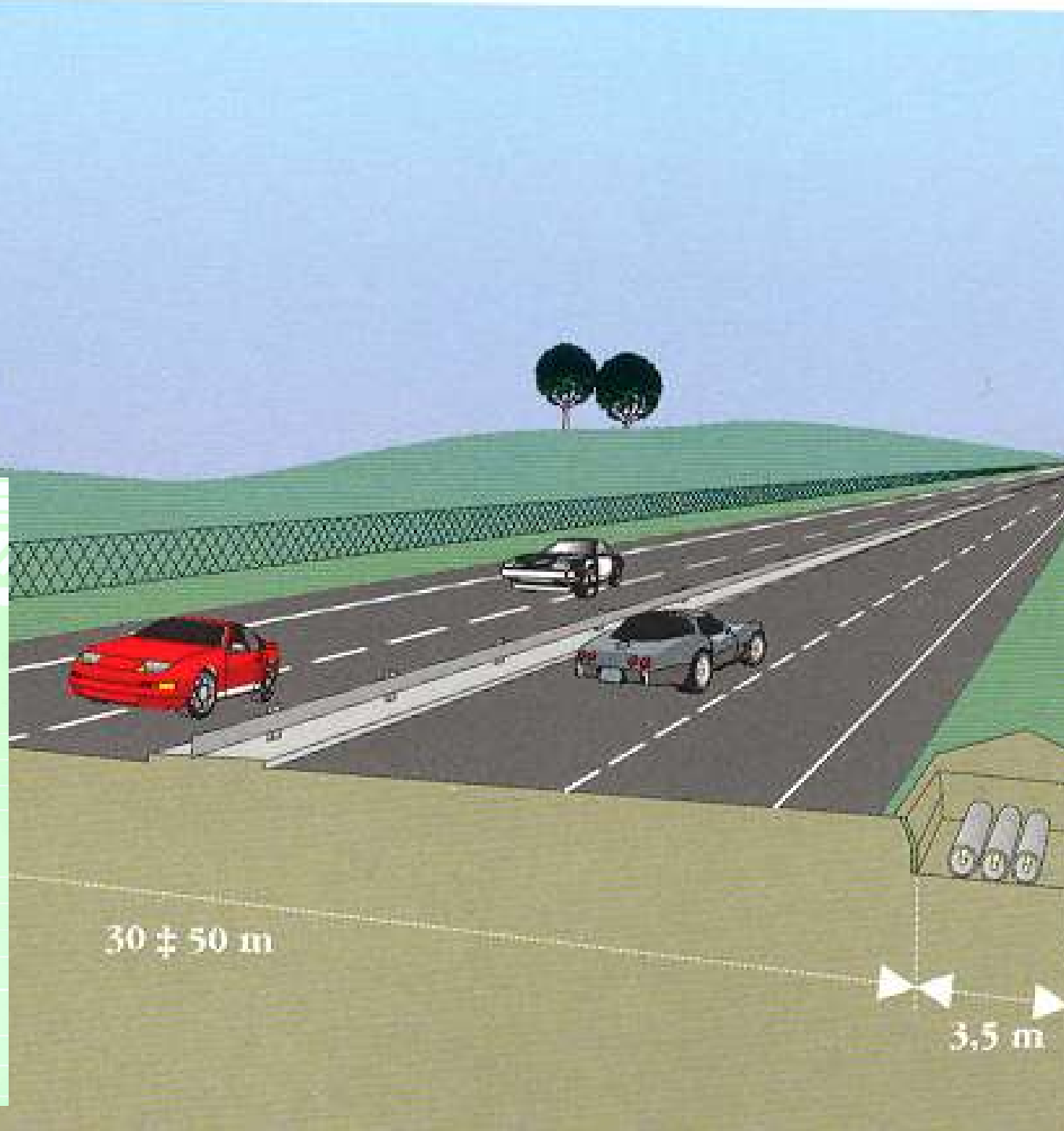


218

**GAS INSULATED
TRANSMISSION LINES
(GIL)**

Joint Working Group
23/21/33.15

February 2003

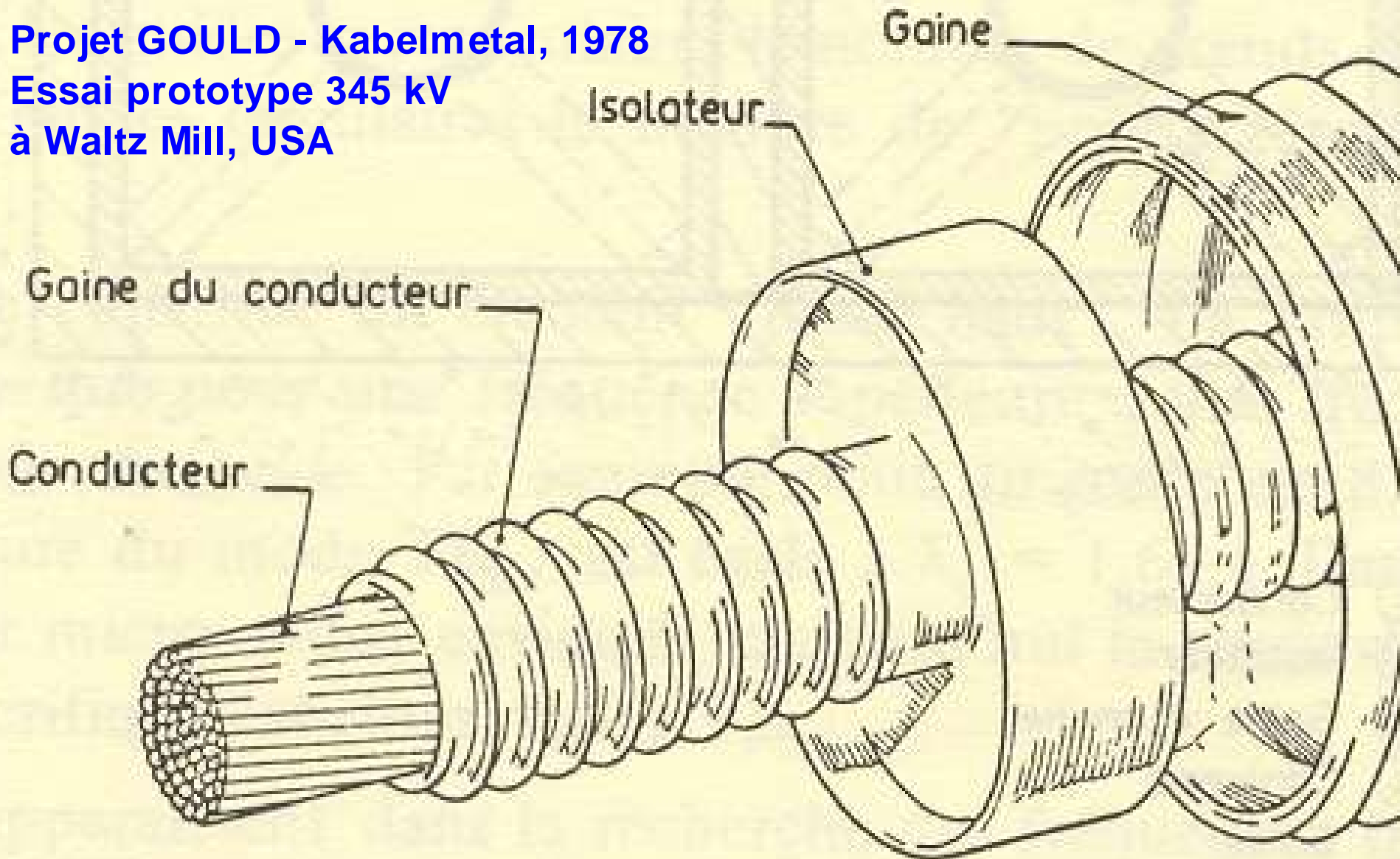


CIG DE STRUCTURE SOUPLE

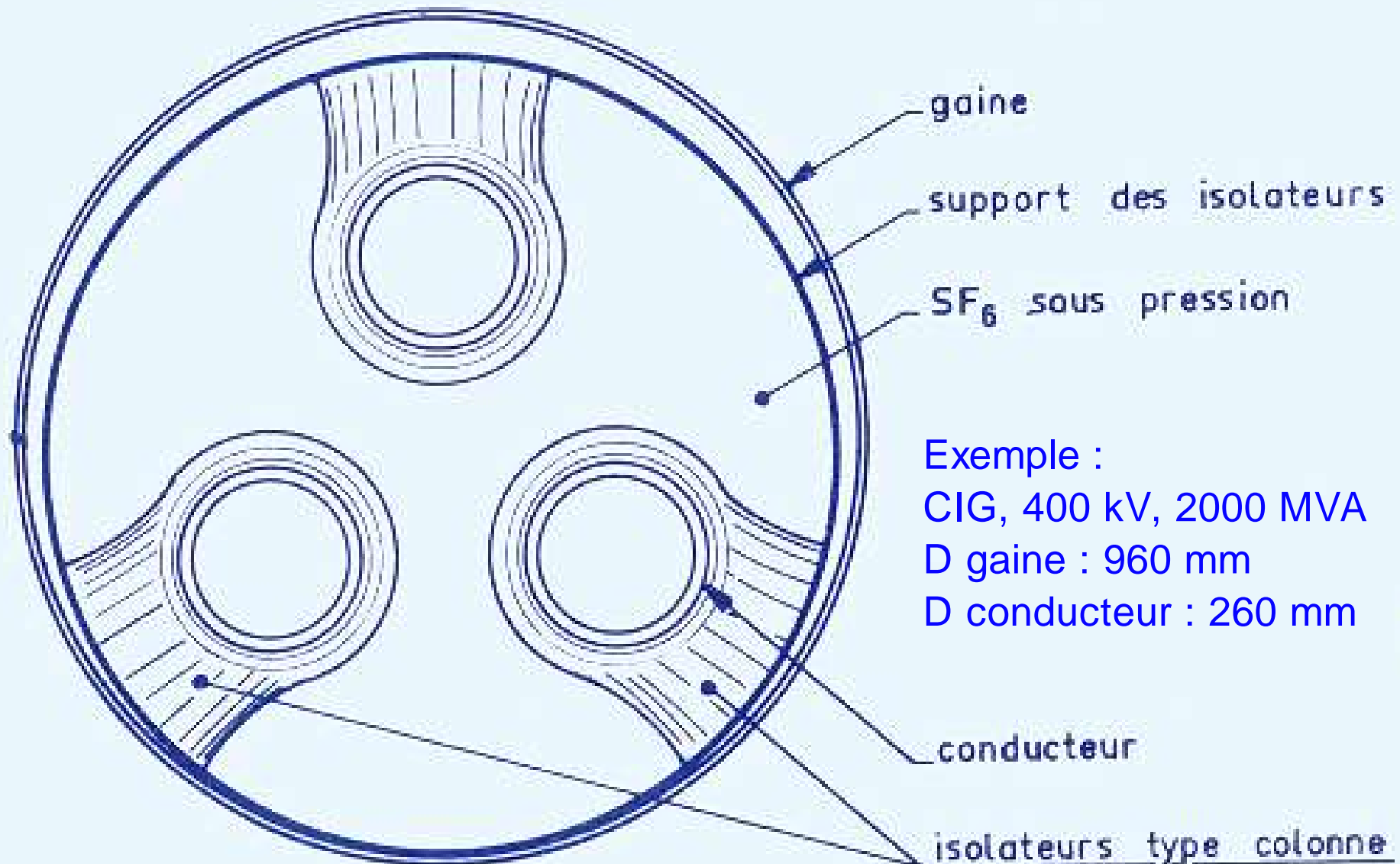
Projet GOULD - Kabelmetal, 1978

Essai prototype 345 kV

à Waltz Mill, USA



CIG DE STRUCTURE TRIPOLAIRE



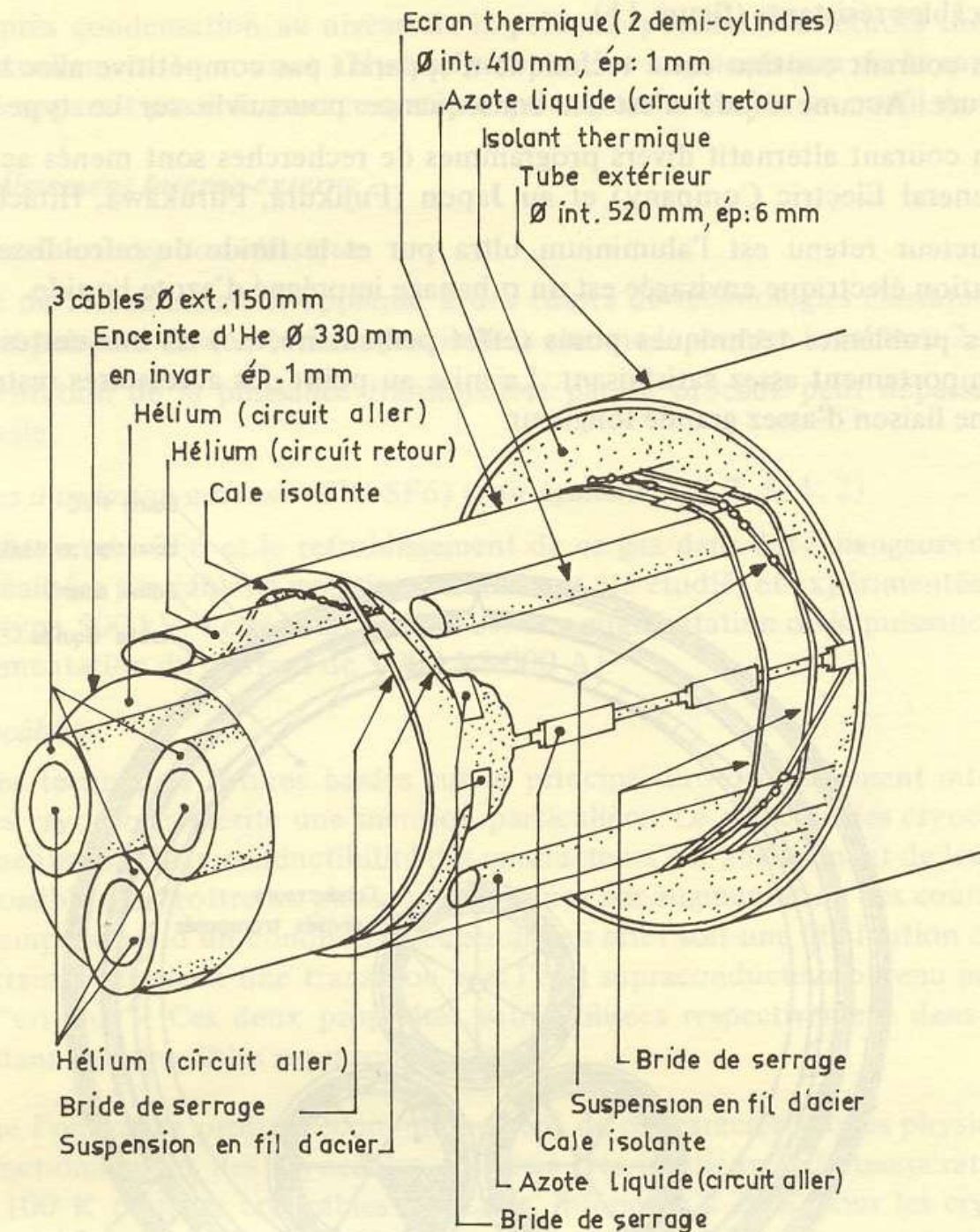
CRYOCABLES SUPRACONDUCTEURS



**Maquette de cryocâble supraconducteur à courant alternatif
Nb / Hélium - R. W. Meyerhoff, Union Carbide / ERC, 1970**

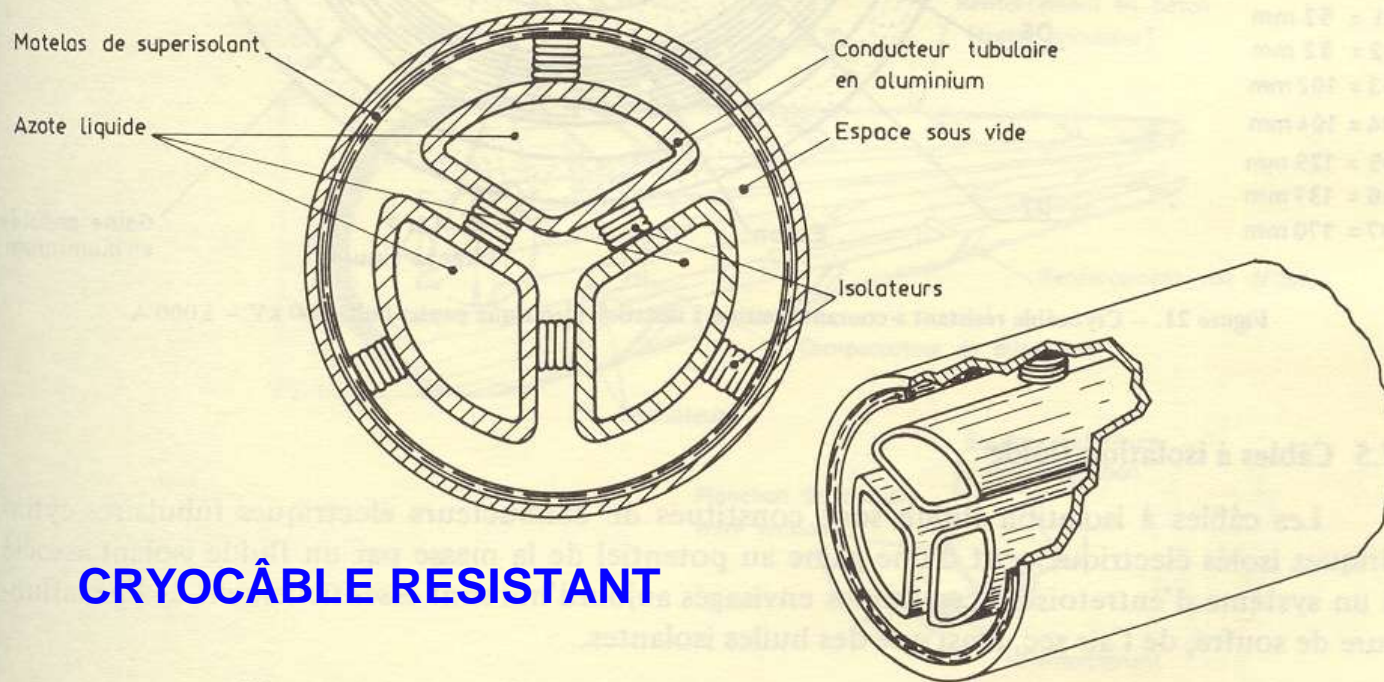
Projet CGE - Air Liquide 1972

Cryocâble Supraconducteur
Courant alternatif
3000 MVA, 140 kV, 12 400 A
Cond. Nb / Cu, Isol. : Pe

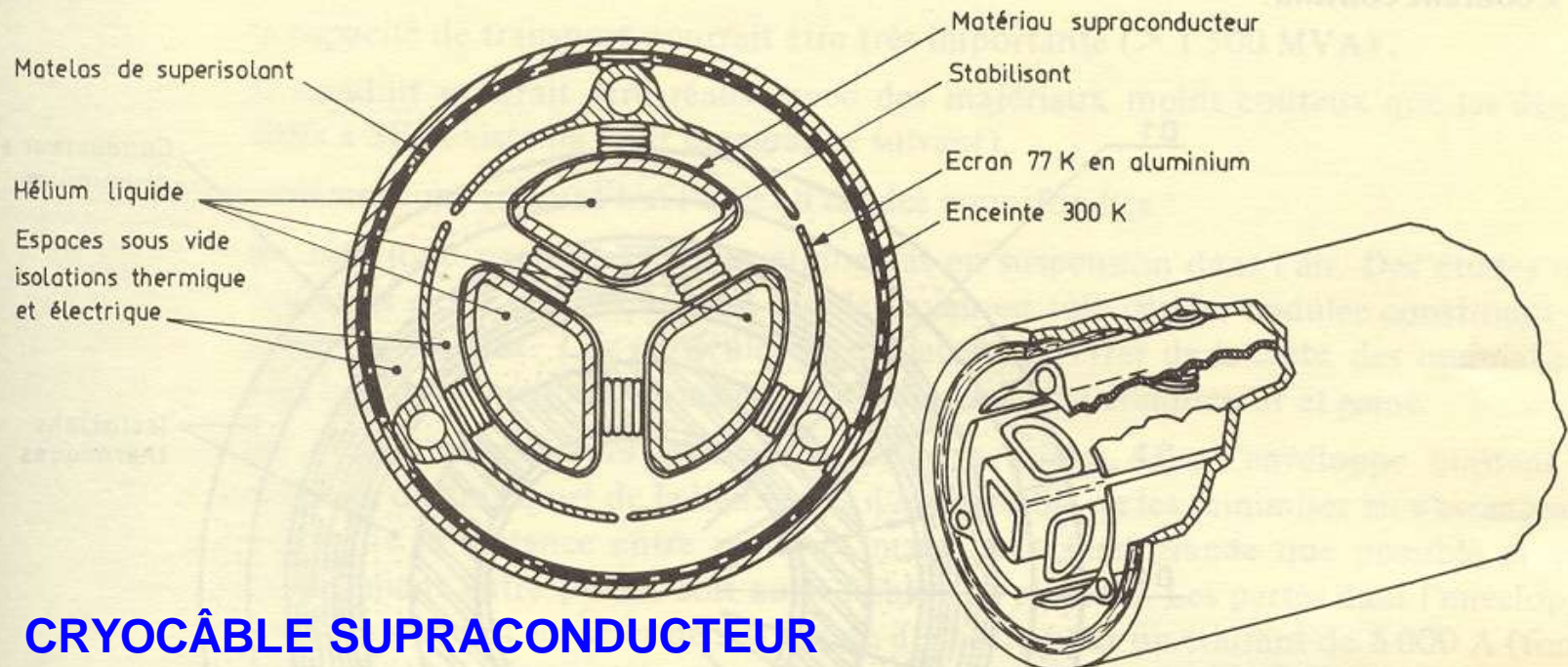


ISOLATION ELECTRIQUE PAR LE VIDE

Peter Graneau
EPRI 1976



CRYOCÂBLE RESISTANT



CRYOCÂBLE SUPRACONDUCTEUR

Cryocâbles supraconducteurs à basse température critique

Prototypes expérimentés (1980).

Supra. LTSC	BNL USA	Univ. Graz Autriche	KPRI URSS
Supraconducteur	Nb³Sn	Nb	Nb³Sn
Longueur (m)	2 x 130	50	50
Courant (A)	4000	1000	1200
Tension (kV)	80	60	63
Puissance (MVA)	330	60	76

- Conclusion :**
- Faisabilité technique
 - Coût élevé,
 - Disponibilité problématique

MATERIAUX SUPRACONDUCTEURS

*Evolution des températures
critiques*

Basses T_c :

4,15 K : Hg

9,2 K : Nb

18 K : Nb₃Sn

23,3 K : Nb₃Ge

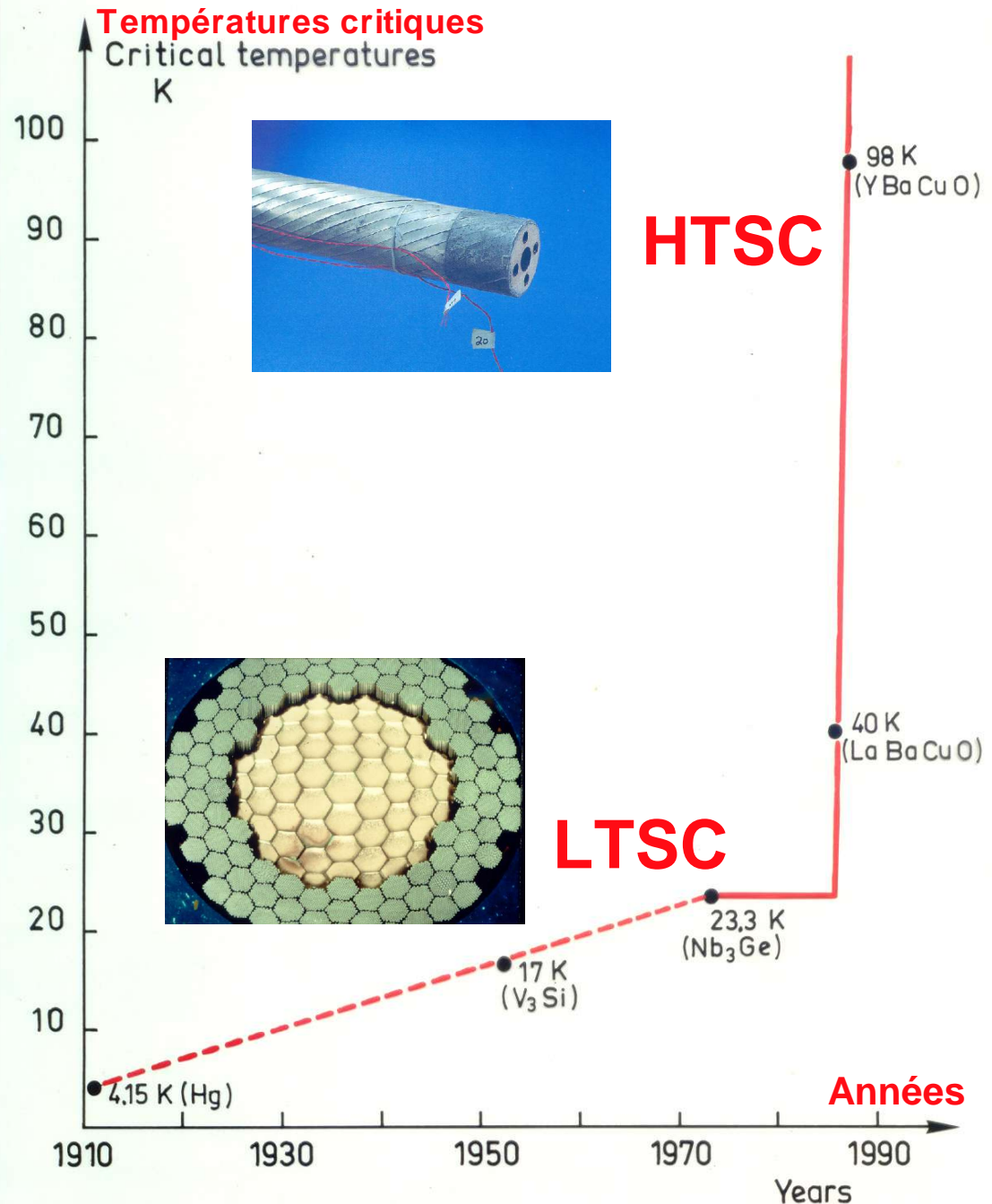
Hautes T_c :

3 K : Cs₂Rb.C₆₀
(Cristal de Fullerène)

95 K : Y₁Ba₂Cu₃O₇

115 K : Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀

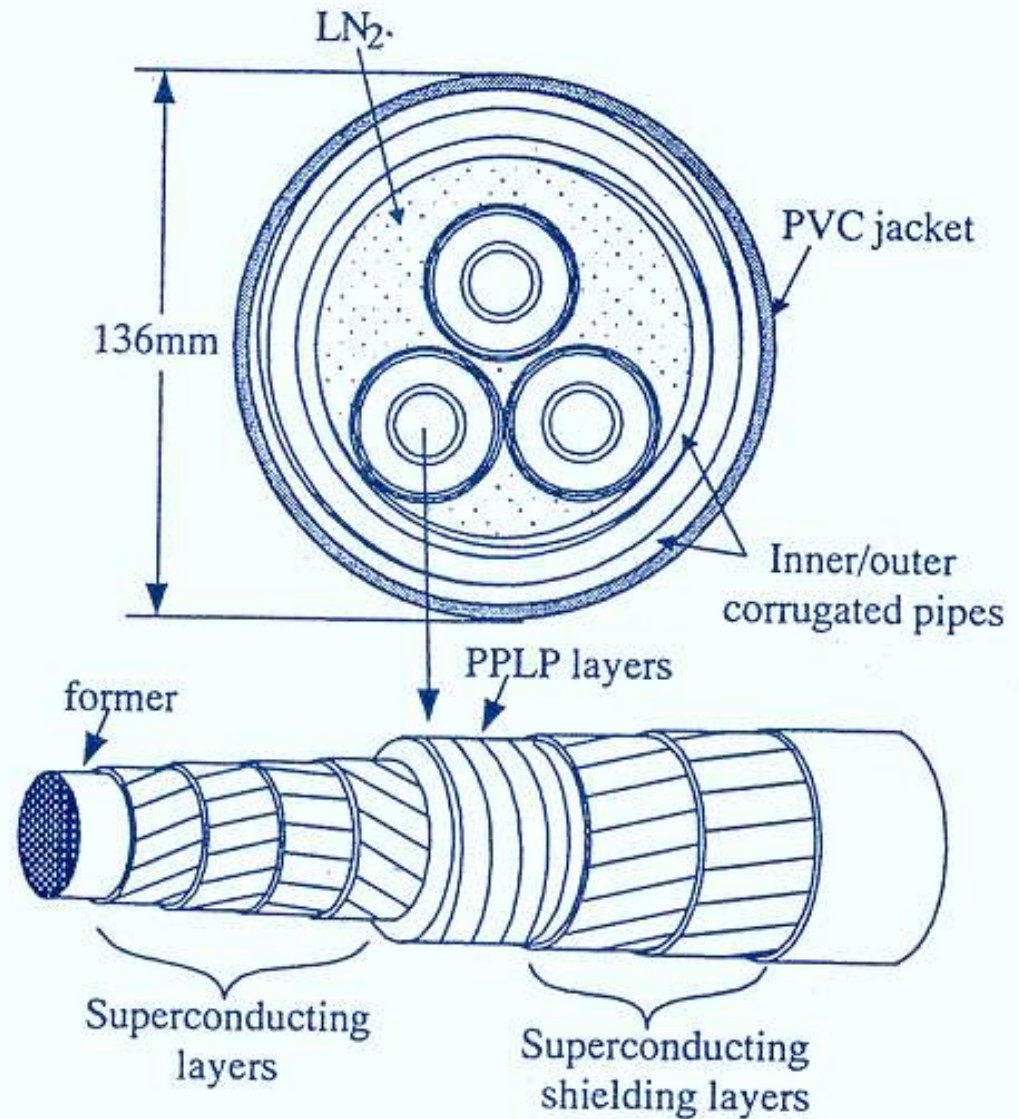
125 K : Tl₂Ba₂Ca₂Cu₃O₁₀



CABLES SUPRACONDUCTEURS SHTC



**Prototype 66 kV
Japon (2003)**



CÂBLES SUPRACONDUCTEURS : Les avantages

- . **Capacités de transport élevées**,
- . **Compacité** (facteur 5 avec les câbles classiques),
- . **Pertes réduites** (moins de 1% comparativement à 5 à 8% pour les câbles classiques),
- . **Indépendance thermique** avec l'environnement,
- . **Rayonnement électromagnétique** très faible dans son environnement,

CABLES SUPRACONDUCTEURS : Propriétés recherchées pour les conducteurs SHTC

- . Transmettre des densités de courant élevées :
? 1 000 A / mm²,**
- . Avoir une bonne stabilité électrique,**
- . Avoir un minimum de pertes en courant alternatif,**
- . Avoir un bon comportement mécanique,**
- . Avoir un bon comportement thermomécanique.**

CABLES SUPRACONDUCTEURS : Le développement

- . **Objectif économique** : 10\$ / kA.m
(actuellement : 200\$ / kA.m, Cu : 10\$ / kA.m et Al : 2\$ / kA.m),
- . **Constructeurs** : Pirelli (I), Nexans (F), NKT (DK), Sumitomo et Furukawa (J), Southwire (USA), LG Cabels (Korea), Condumex (Mexico),
- . **Prototypes** : 400 m de câbles à Detroit (USA), 90 m à Copenhague (DK),
- . **Projets** : Colombus (USA), Detroit (USA), Copenhague (DK), Long Island (USA),
- . **Perspectives** : Industrialisation dans 10 ans (2015?) (selon constructeurs).

CABLES SUPRACONDUCTEURS : Projet LIPA de Long Island aux USA - Remplacement d'une liaison classique fin 2005

- . Puissance : 600 MW, alimentation de 300 000 foyers
- . Trois phases séparées dans des cryostats distincts,
- . Tension : 138 kV,
- . Longueur : 610 m,
- . Maître d'oeuvre : AMSC,
- . Partenaires : NEXANS et Air Liquide,
- . Perspectives : si OK, extension à 3,6 miles.
- . Coût : 30 M\$ dont 15 M\$ pris en charge par le DOE,



TESF
TRANSMISSION D'ENERGIE SANS FIL

TESF : Diffraction

$$D_e \cdot D_r = 2,44 \cdot \lambda \cdot L$$

D_e = Diamètre de l'antenne d'émission en m

D_r = Diamètre de l'antenne de réception en m

L = Distance entre antennes en m

λ = Longueur d'onde en m

F GHz	λ cm	Distance entre Antennes : L
2,45	12,24	3 km
5,8	5,17	7 km
24	1,25	30 km
35	0,86	43 km
Laser	1000 nm	368 000 km

pour

$$D_e = 30 \text{ m}$$

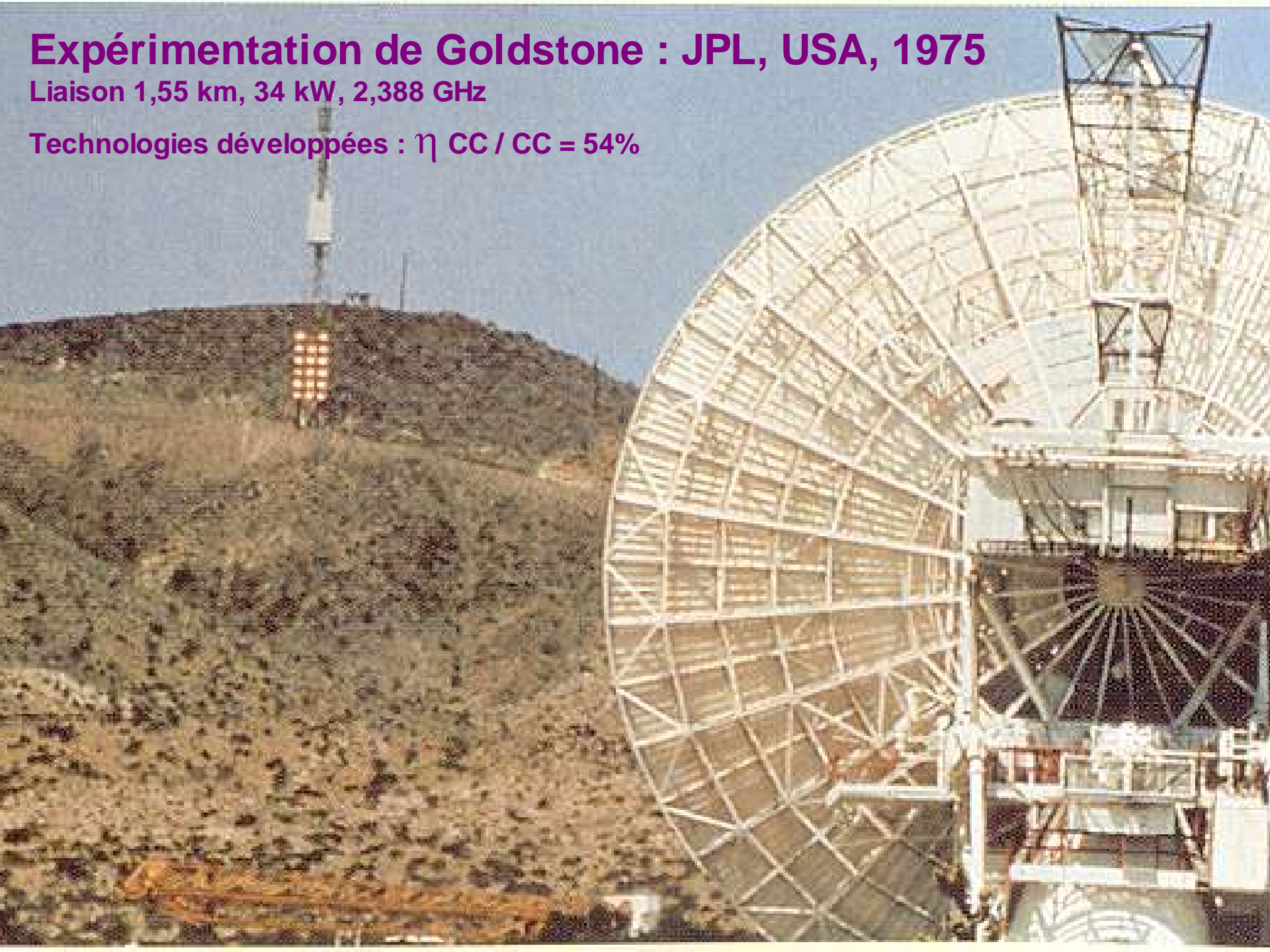
$$D_r = 30 \text{ m}$$

$$\eta = 84 \%$$

Expérimentation de Goldstone : JPL, USA, 1975

Liaison 1,55 km, 34 kW, 2,388 GHz

Technologies développées : $\eta_{CC/CC} = 54\%$



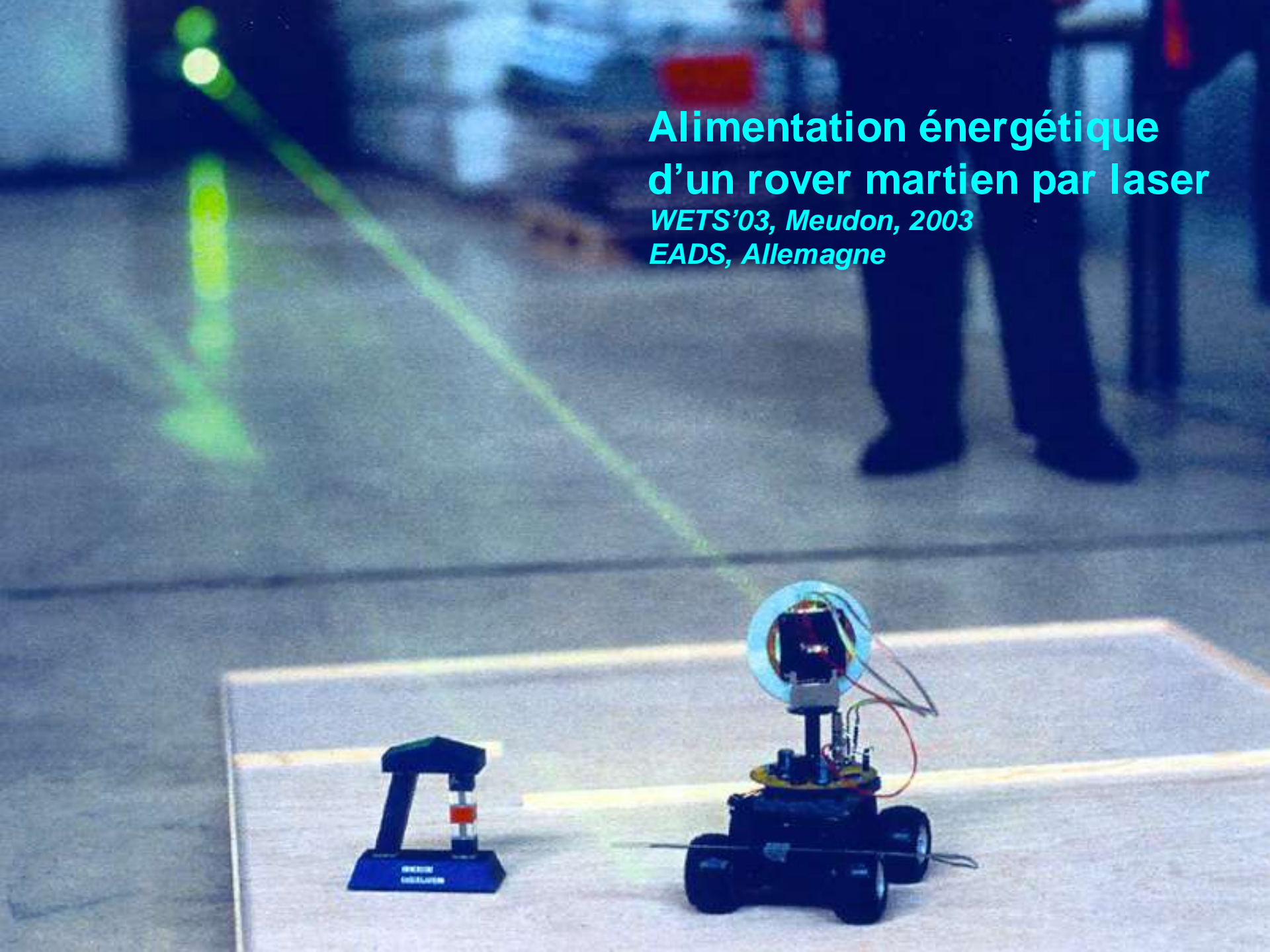
TESF : Des perspectives d'applications

1. Liaisons point à point sol-sol,
2. Alimentation énergétique de mobiles,
3. Alimentation de plate-formes stratosphériques ou de ballons,
4. Liaisons espace-espace,
5. Liaisons sol-espace,
6. Liaisons sol-espace-sol,
7. Liaisons espace-sol.

Alimentation énergétique d'un rover martien par laser

WETS'03, Meudon, 2003

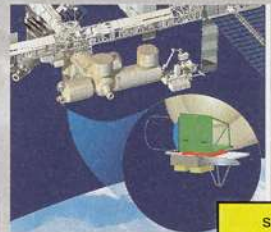
EADS, Allemagne



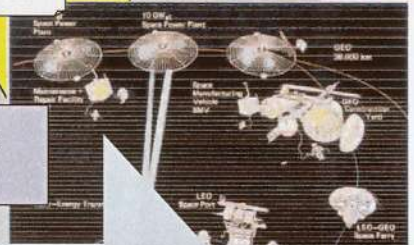
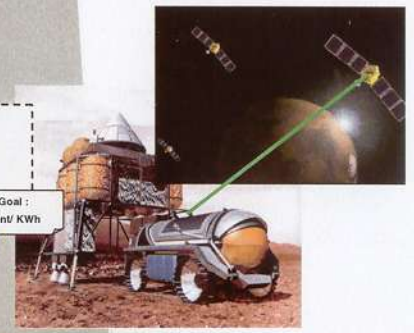
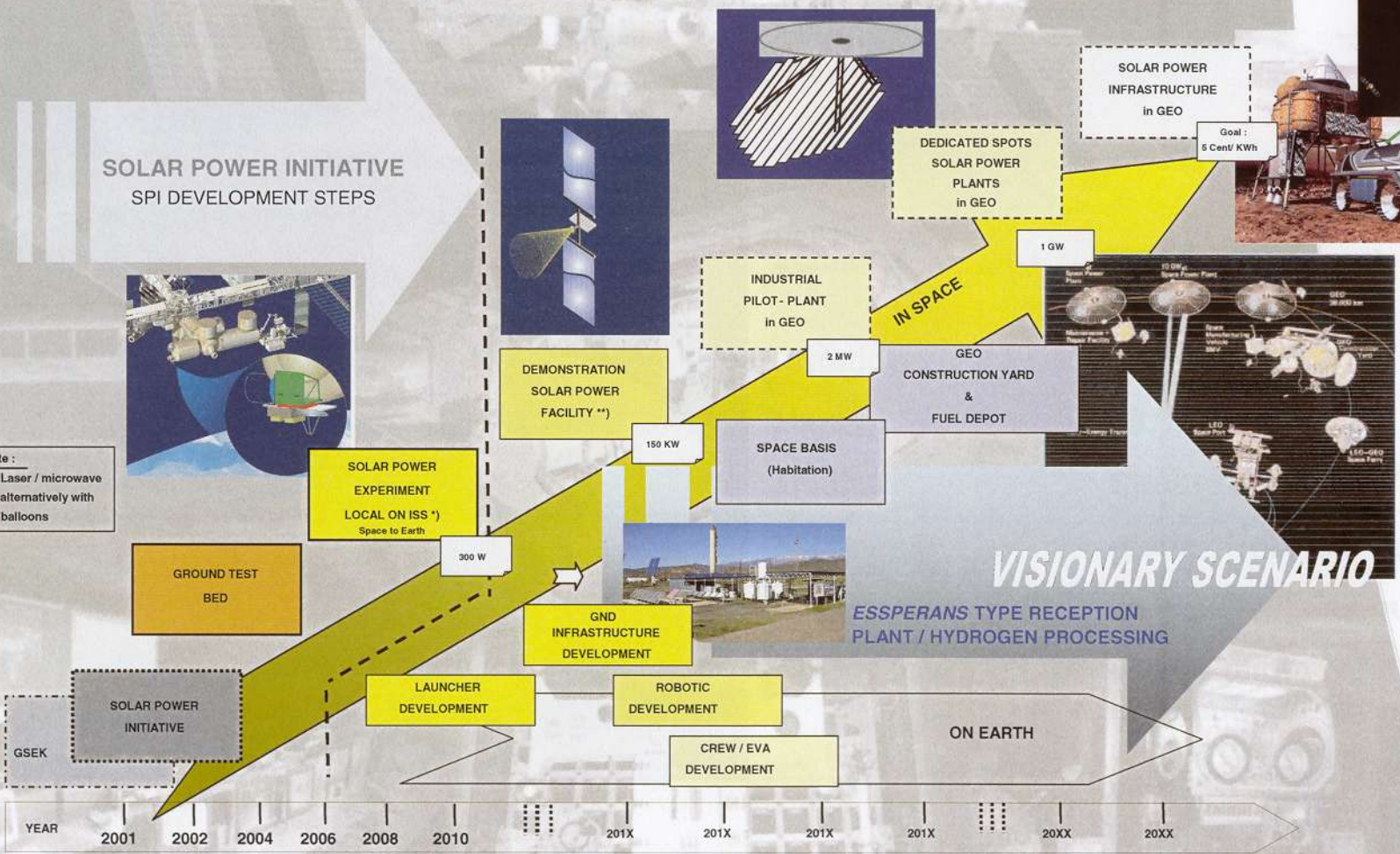
Wireless Power Technology Roadmap

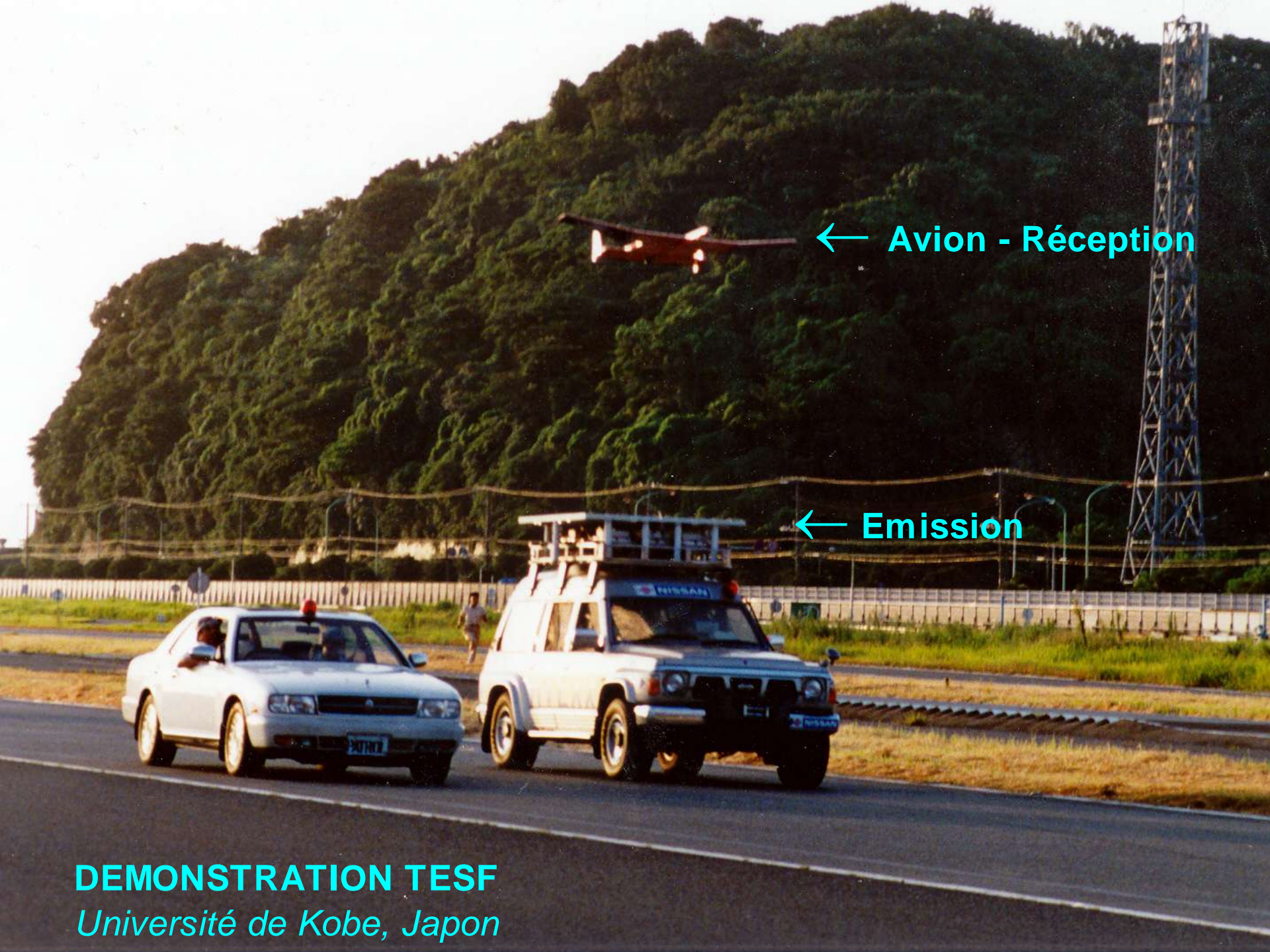
Establishing the SPI Roadmap

SOLAR POWER INITIATIVE SPI DEVELOPMENT STEPS



Note :
*) Laser / microwave
**) alternatively with balloons





← Avion - Réception

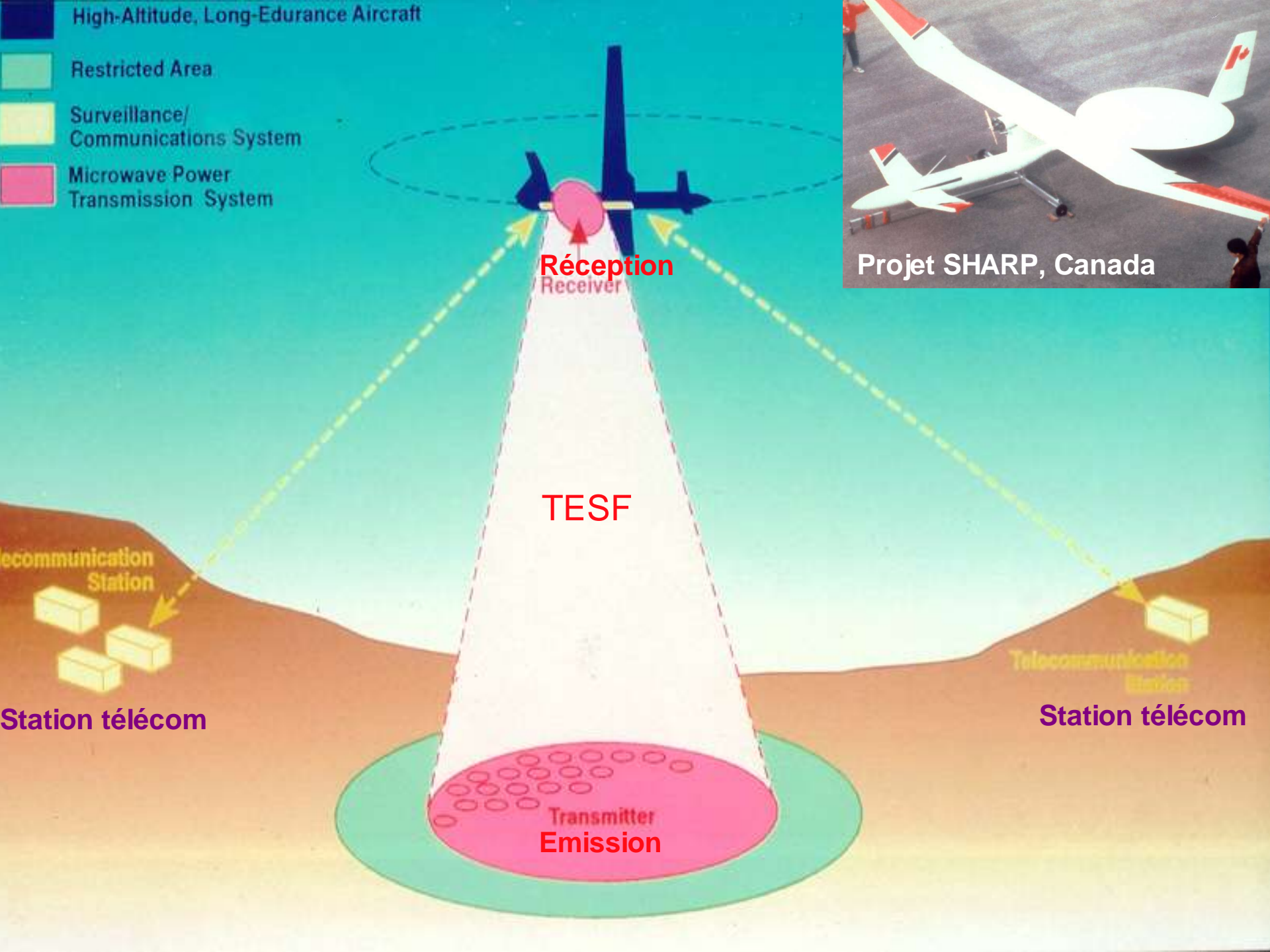
← Emission

DEMONSTRATION TESF
Université de Kobe, Japon

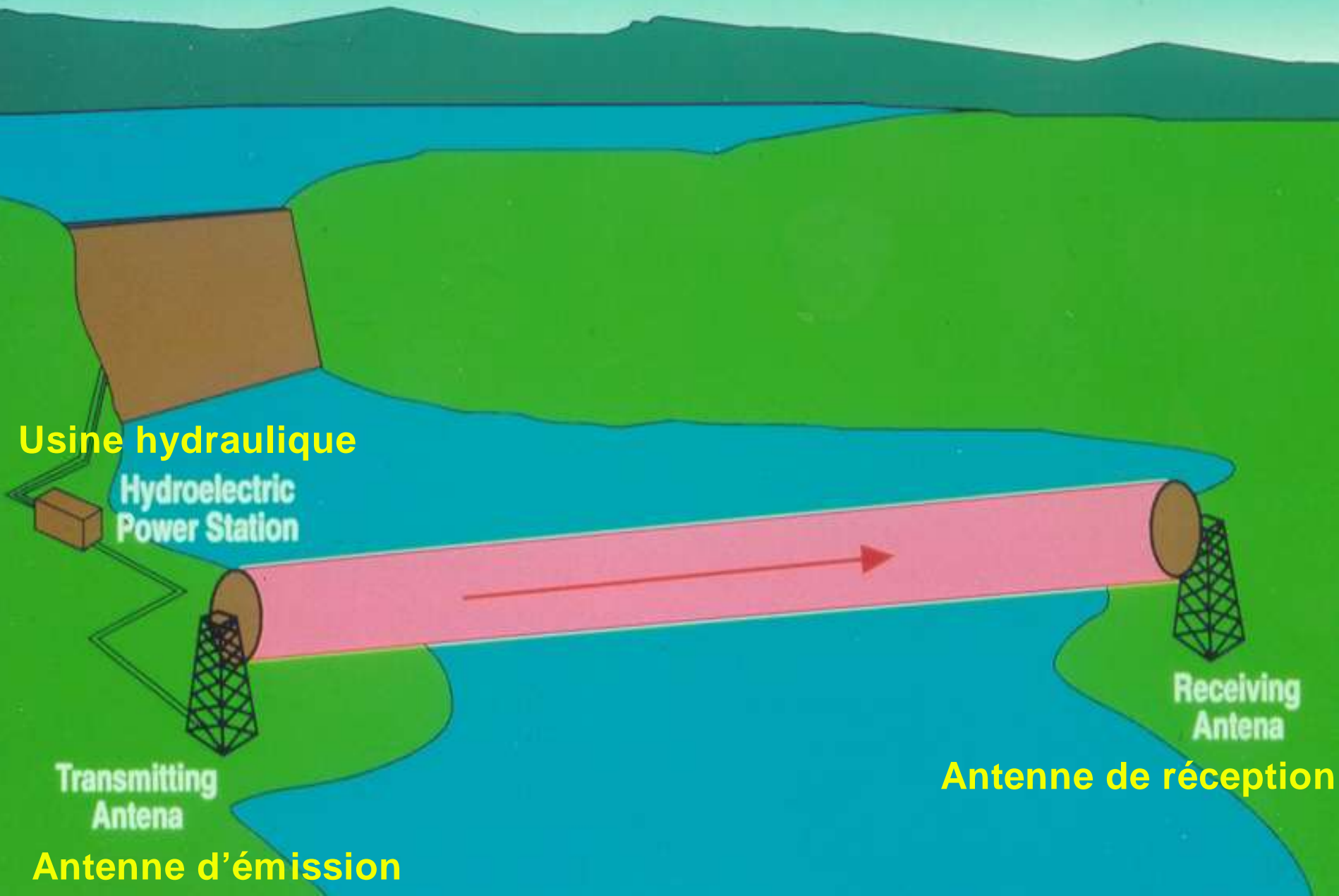
- High-Altitude, Long-Edurance Aircraft
- Restricted Area
- Surveillance/ Communications System
- Microwave Power Transmission System



Projet SHARP, Canada

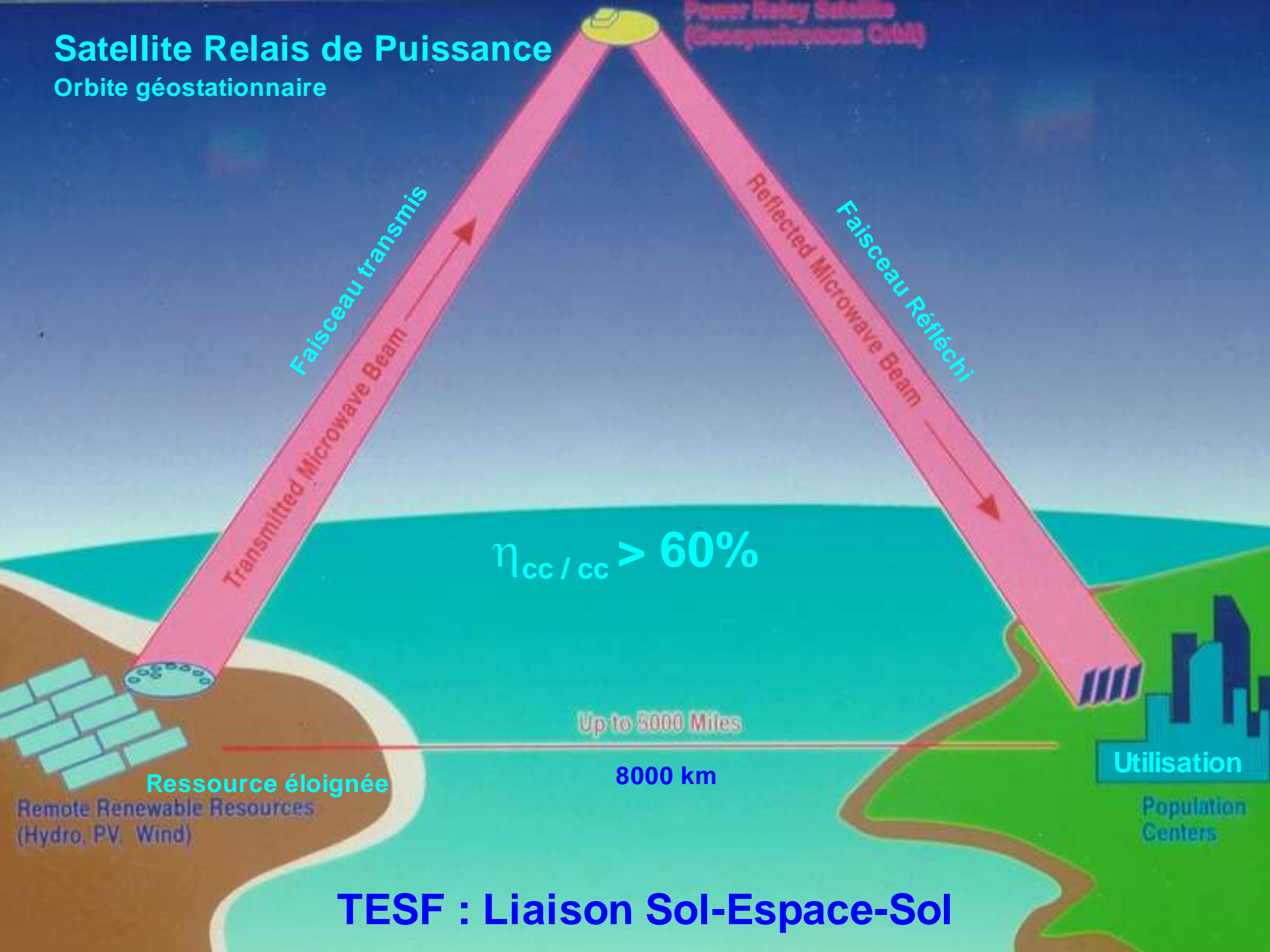


Projet « ALASKA 21 », 100 kW, 15 miles, 2,45 GHz, $\eta = 25\%$, 19,9 M\$, 199



Satellite Relais de Puissance

Orbite géostationnaire



Power Relay Satellite
(Geostationary Orbit)

Faisceau transmis
Transmitted Microwave Beam

Reflected Microwave Beam
Faisceau Réfléchi

$$\eta_{cc/cc} > 60\%$$

Up to 5000 Miles

8000 km

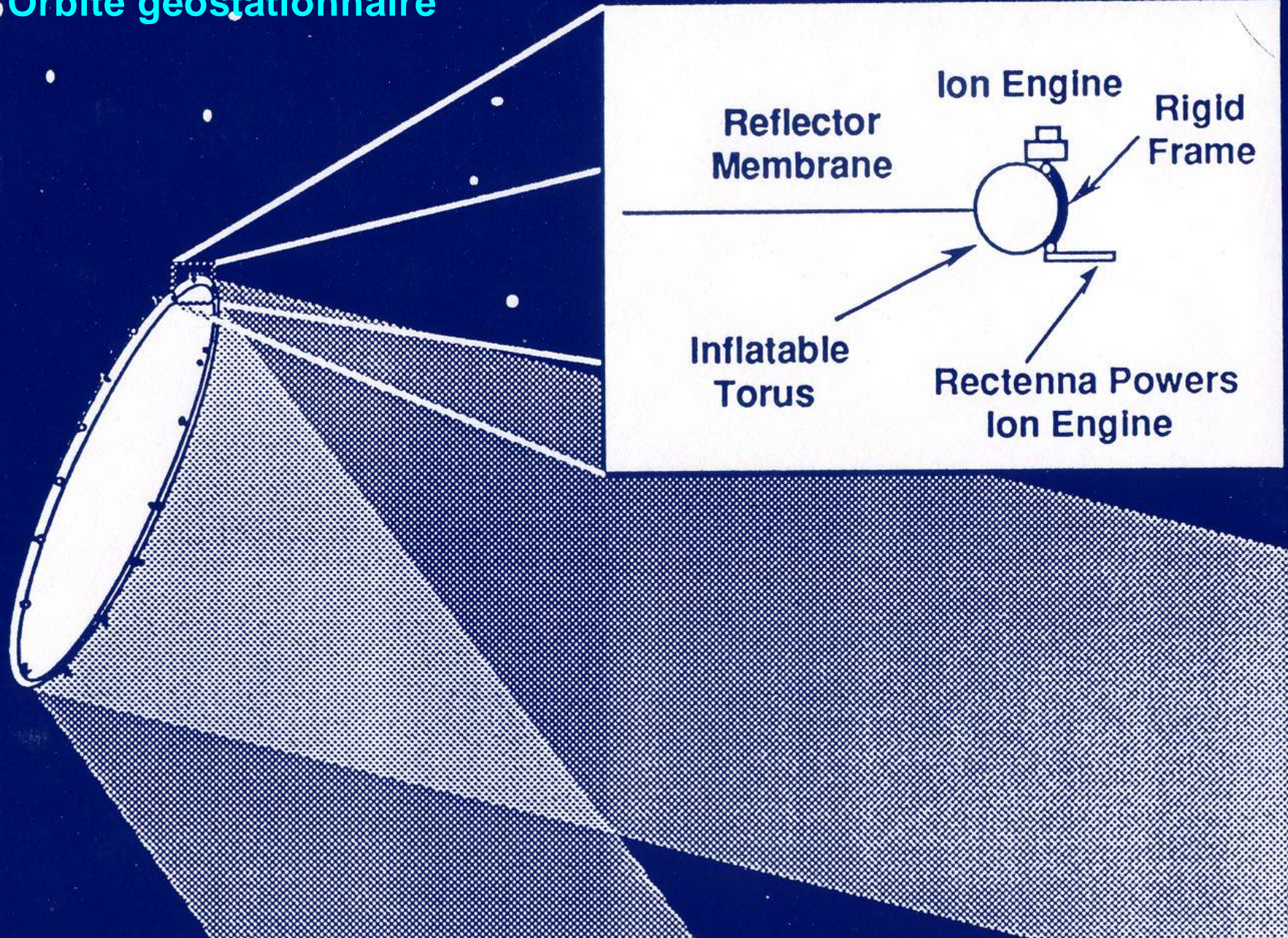
Ressource éloignée
Remote Renewable Resources
(Hydro, PV, Wind)

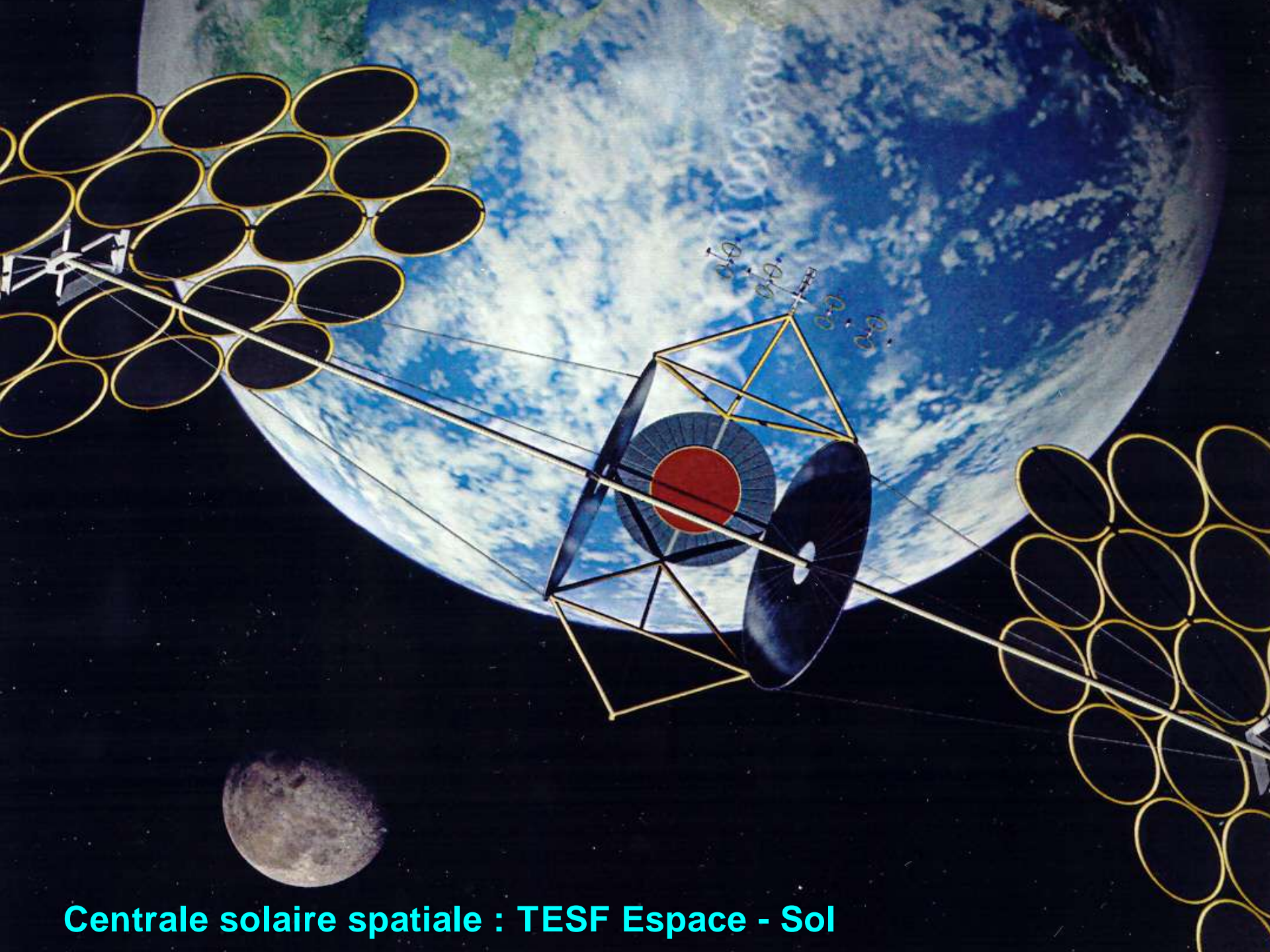
Utilisation
Population Centers

TESF : Liaison Sol-Espace-Sol

Satellite Relais de Puissance

- Orbite géostationnaire





Centrale solaire spatiale : TESH Espace - Sol

TRANSMISSION D'ENERGIE SANS FIL (TESF) :

Etat de l'art 2002, les meilleures performances obtenues

	Microondes	Lasers
Rendement conversion CC / Ondes EM	83%	56%
Conv CC / Ondes EM - Puis. Unit. Max.	500 kW	1080 W
Rendement conversion Ondes EM / CC	91,4%	59%
Conv Ondes EM / CC - Puis. Unit. Max.	10 kW	1,7 W
Rendement total CC / CC	54%	< 1%
Puissance CC max. délivrée	34 kW	> 1W
Distance max. de Transmission	1,55 km	inconnue
Coût conversion CC / Ondes EM	0,02 €/ W	20 €/ W
Coût conversion Ondes EM / CC	25 €/ W	10 €/ W
Coût système TESH : €/ MW.km	10 M€	inconnue

GUIDES D'ONDES DE TRANSPORT D'ENERGIE

Exemples de dimensionnements (1972)

A.D. Little pour l'Electric Research Council, USA

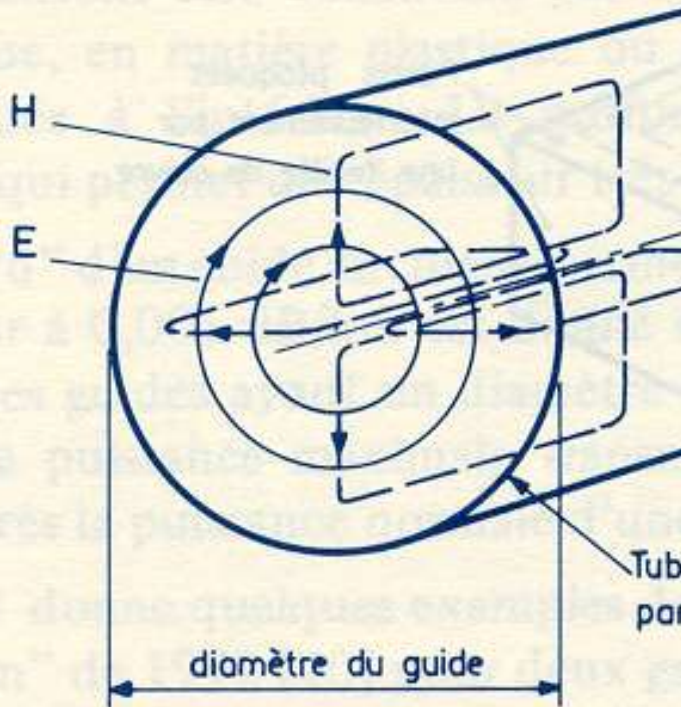
Mode	Dimension du guide m	Tolérances mm	Fréquence MHz	Capacité de transport GW	Pertes en W/m à 1 GW	Longueur correspondant à une perte de 1dB en km
TE ₁₀	36 m × 18 m rectangulaire	A : ± 50	6,9	2 400	374 0,0016 dB/km	625
TE ₁₀	6 m × 6 m carré	A : ± 12.5	37	154	3 477 0,015 dB/km	66
TE ₀₁	∅ 3 m circulaire	A : ± 0,13 DetE : ± 0,25	1 000	30	374 0,0016 dB/km	625
TE ₀₁	∅ 1,8 m circulaire	A : ± 0,07 DetE : ± 0,25	3 000	10	374 0,0016 dB/km	625

A : alignements, variations admises pour 30 m.

D : diamètre,

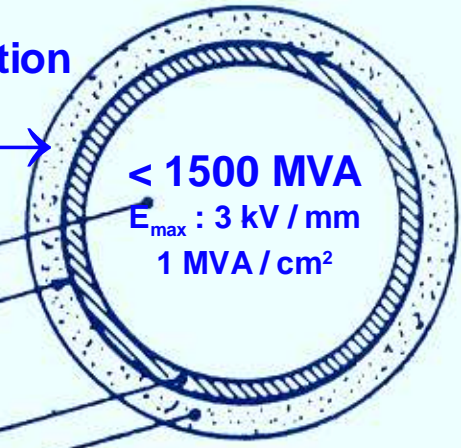
E : aplatissement du diamètre (faux rond)

} variations admises pour 15 m



Exemple de réalisation

Diamètre : 45 cm →

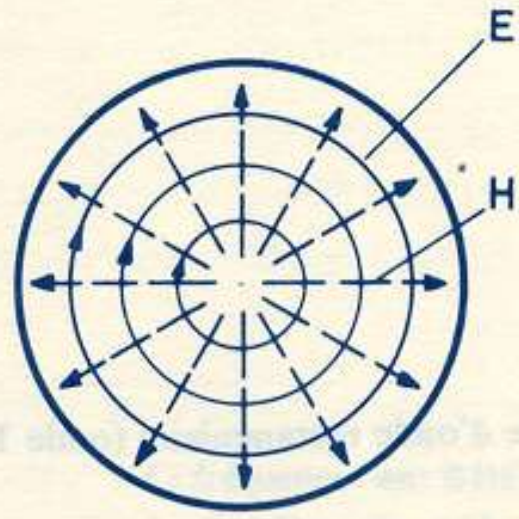
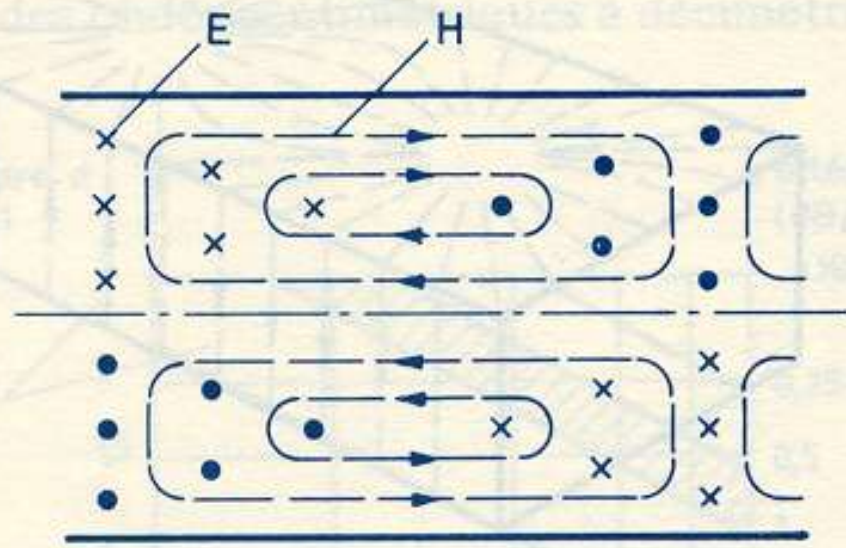


< 1500 MVA
 $E_{max} : 3 \text{ kV/mm}$
 1 MVA/cm^2

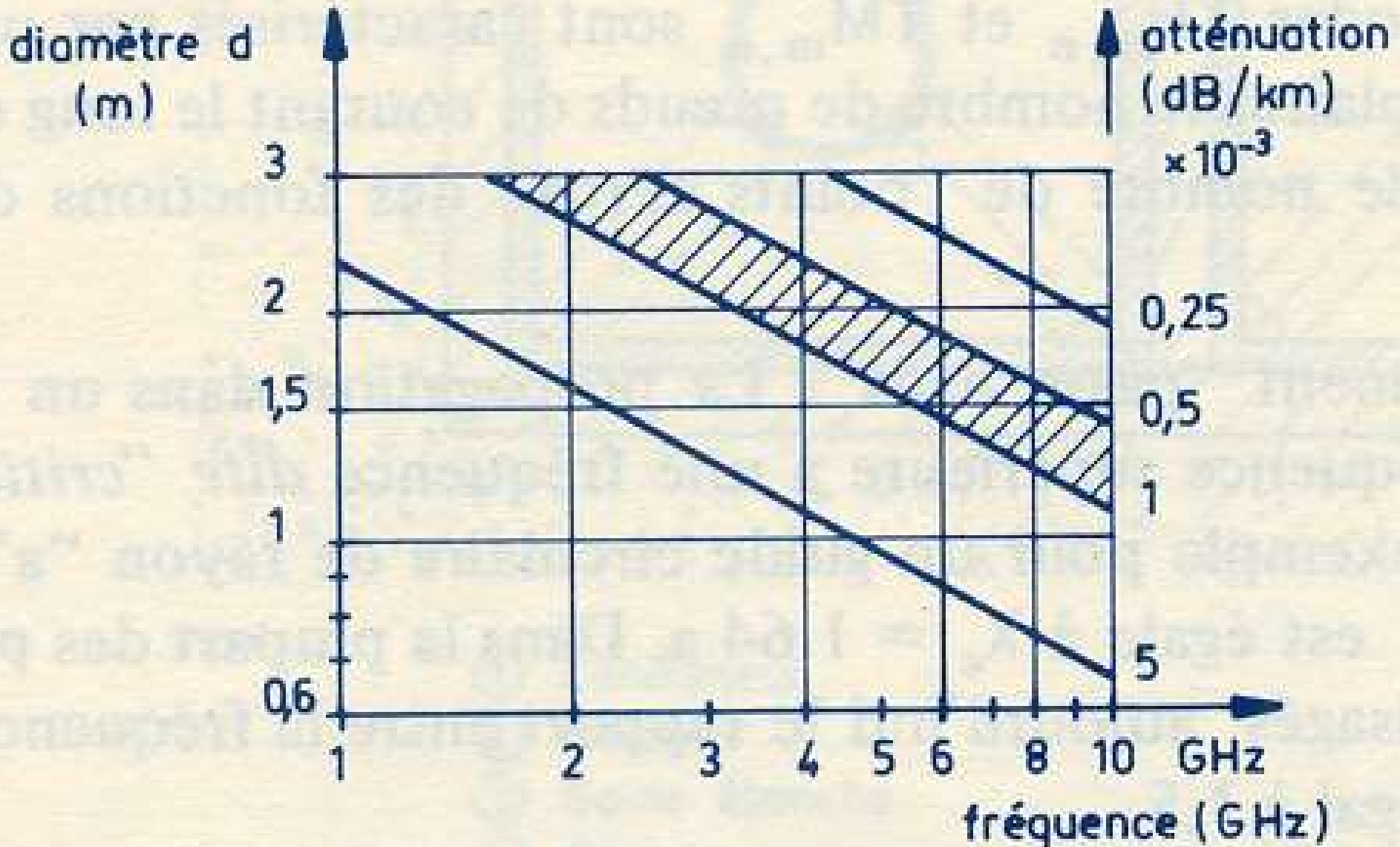
- Circulation d'air - refroidissement
- Film de cuivre
- Film diélectrique à faible angle de pertes
- Mousse plastique

Tube plaqué intérieurement par du cuivre

GUIDE D'ONDE CIRCULAIRE TE_{01}

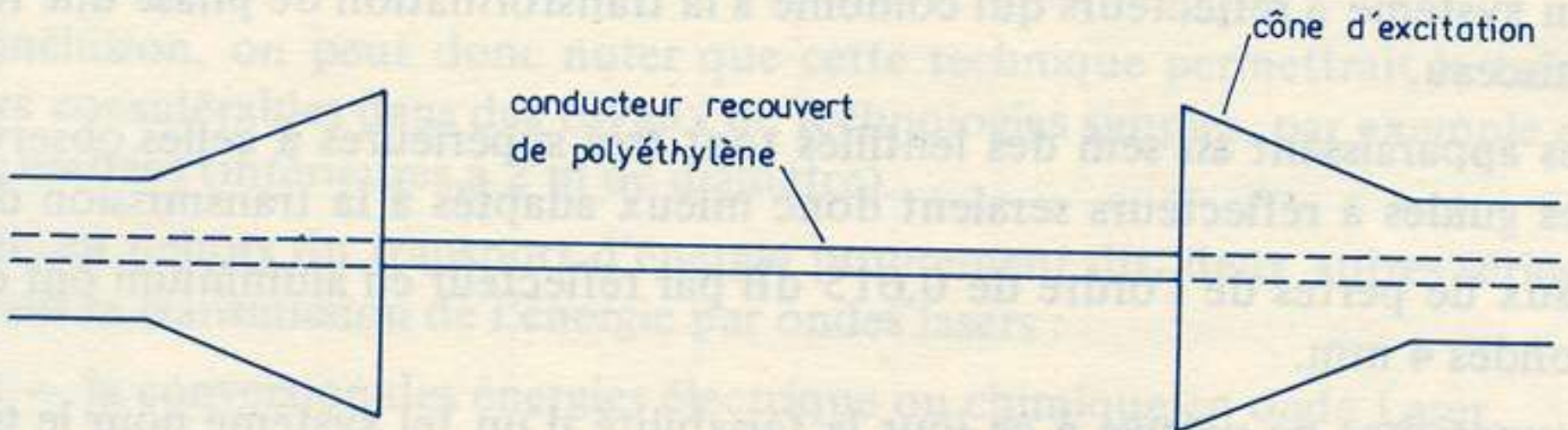
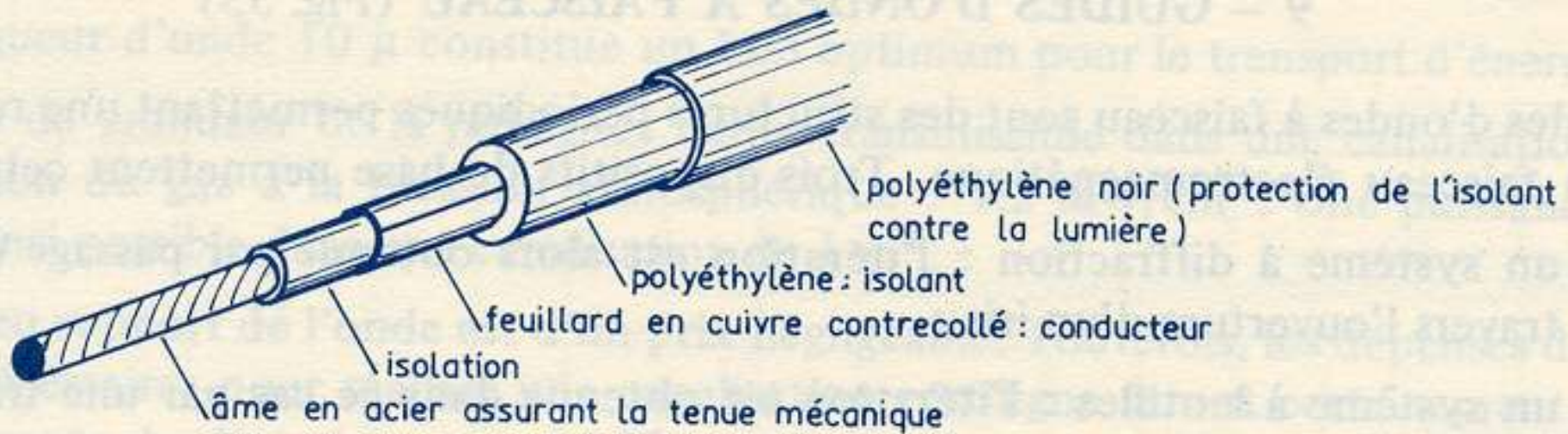


ATTENUATION POUR UN GUIDE CIRCULAIRE EN CUIVRE (onde TE_{01})

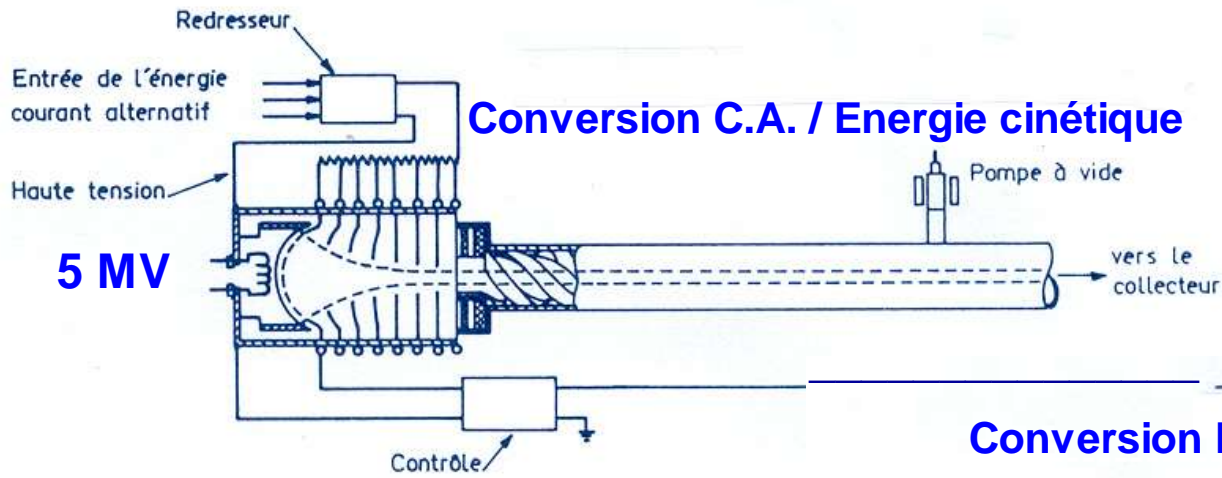


LIGNE DE GOUBAU : LIGNE « G »

Fermeture du courant « conducteur » par des courants de déplacement dans l'air.
Pertes élevées : quelques dB / km

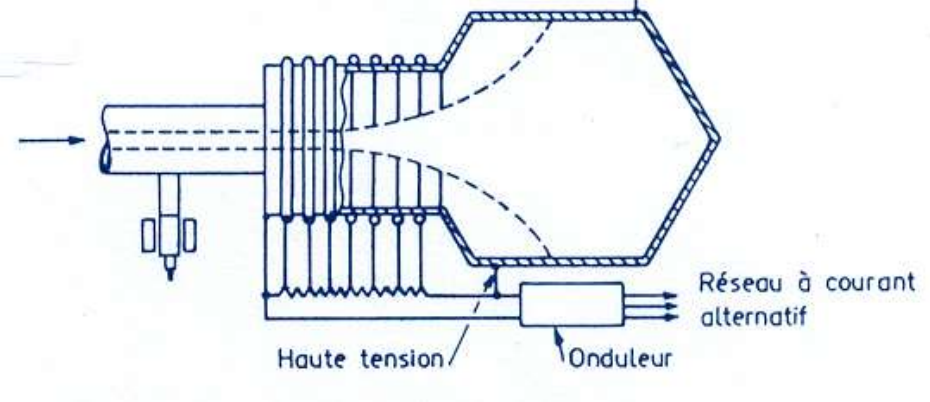


TRANSMISSION D'ENERGIE PAR CINETIQUE DE PARTICULES

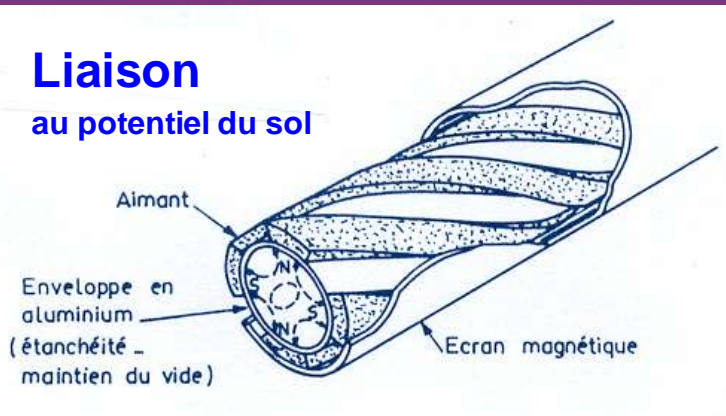


Prototype : 3 MVA
 Projet : 5 000 MVA

Conversion Energie cinétique / C.A.



Liaison
 au potentiel du sol



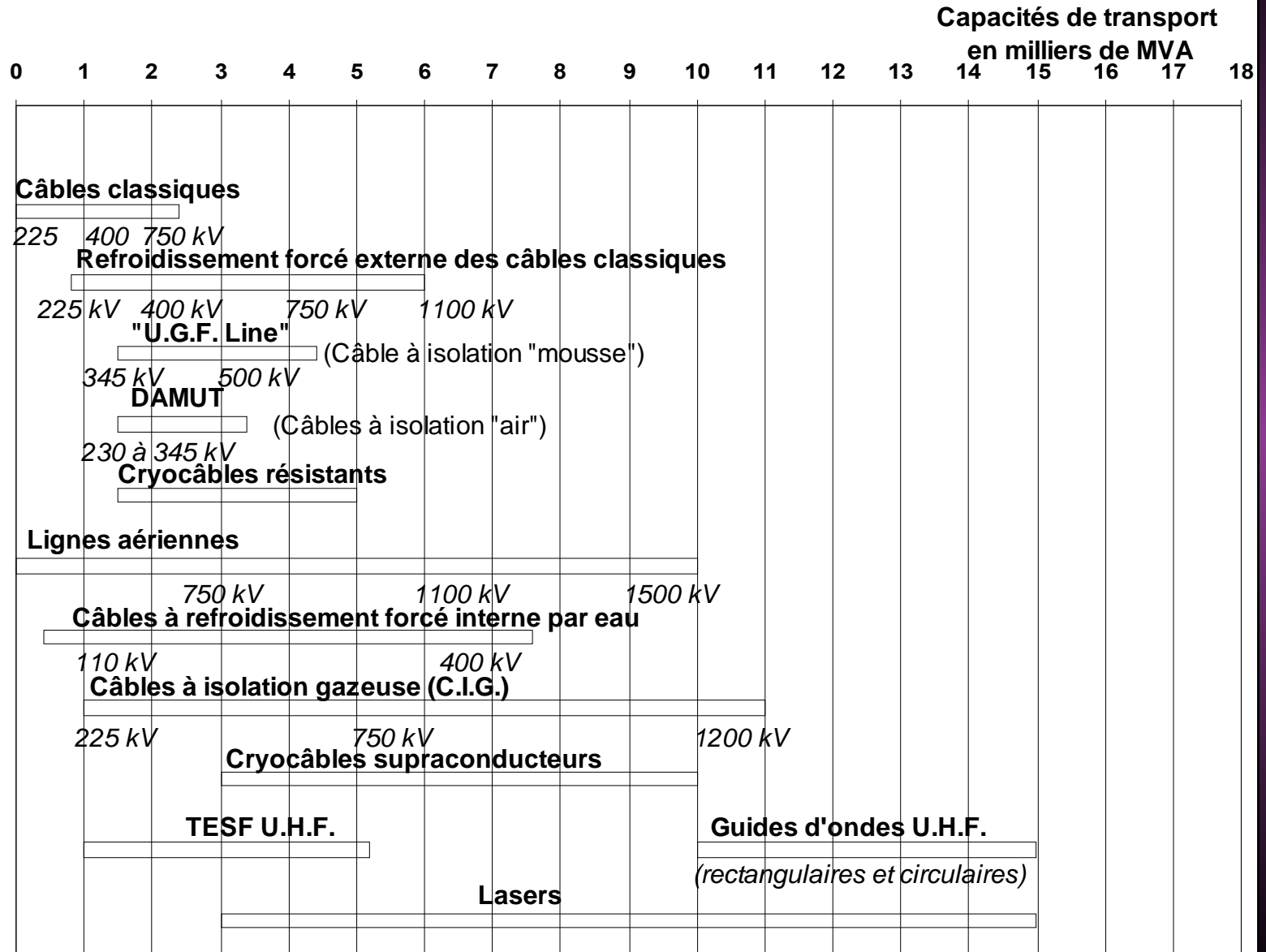
Transmission d'énergie par cinétique de particules
 Varian Laboratory - USA - 1974

8 - COMPARAISON DES TECHNIQUES

Critères de comparaison

1. CAPACITE DE TRANSPORT,
2. DISTANCE DE TRANSPORT,
3. CARACTERISTIQUES ECONOMIQUES,
4. DISPONIBILITE,
5. PROBLEMES D'ENVIRONNEMENT,
6. UTILISATION DE RESSOURCES EPUISABLES,
7. CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES,
8. CARACTERISTIQUES ENERGETIQUES.

TECHNIQUES FUTURES DE TRANSPORT D'ENERGIE ELECTRIQUE



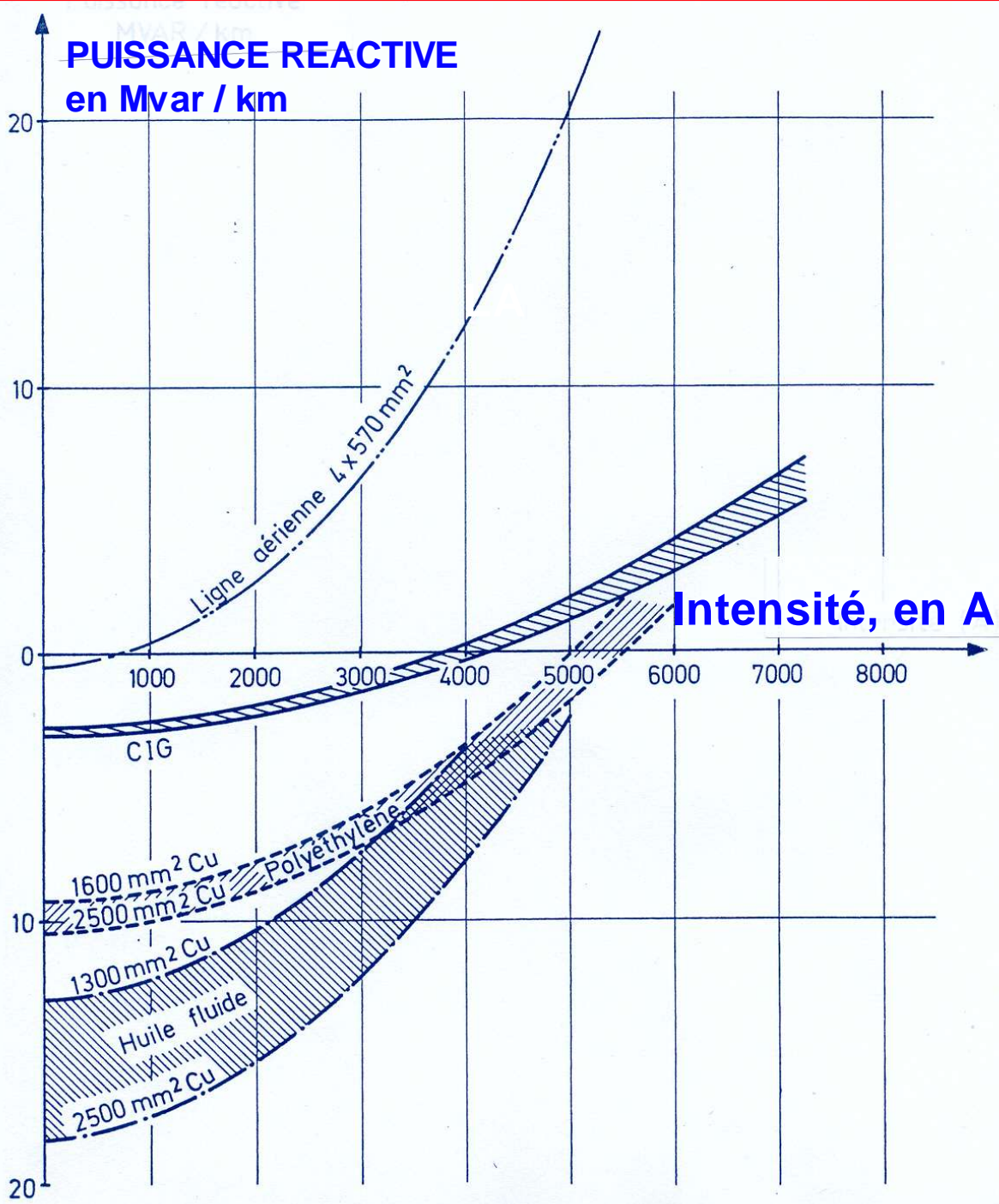
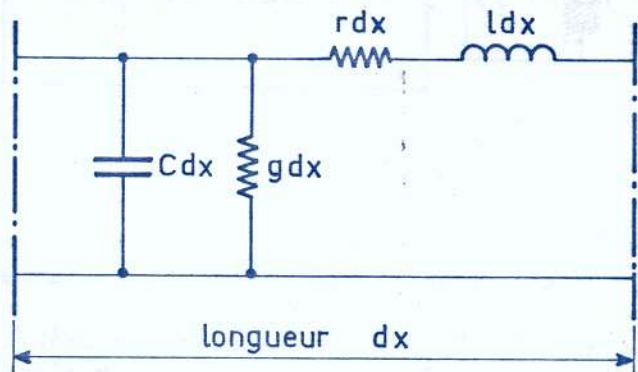
Caractéristiques électriques

Ligne / Câble / CIG - 400kV - 3000A - 2000 MVA

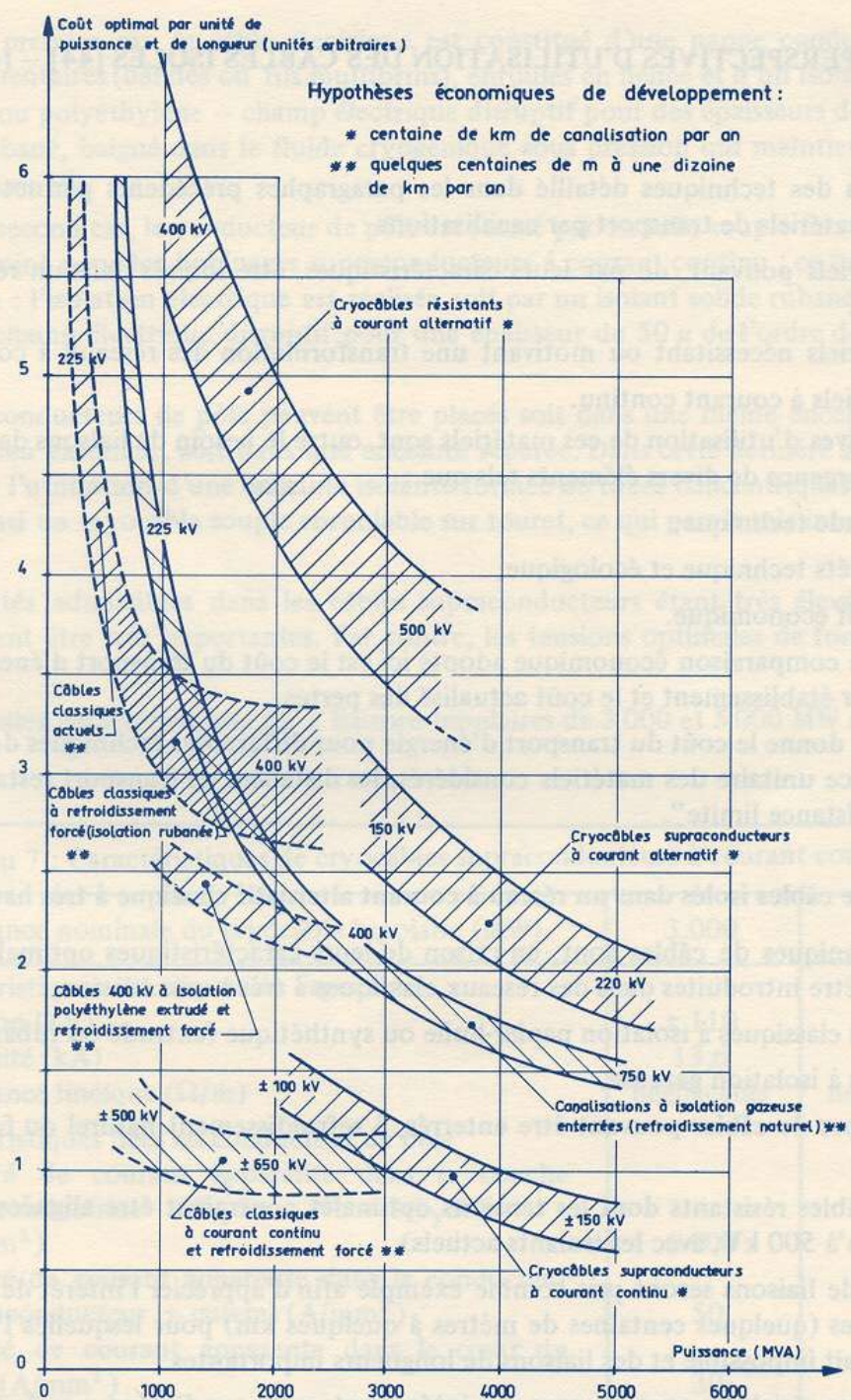
	Lignes aériennes	CIG / GIL	Câbles PRC
Technologie	3 x 570 mm ²	280 / 630 mm, buried	2 x 2000 mm ² Cu
Pertes resist. Wm⁻¹	540	180	166
Pertes diél. Wm⁻¹	2,4	-	15
Pertes totales Wm⁻¹	542,4	180	181
r linéique μΩm⁻¹	20	6,7	6
l linéique nHm⁻¹	892	162	189
c linéique pFm⁻¹	13	68,6	426
Impéd. caract. Ω	263	48,6	21
Puiss. caract. MW	608	3292	7619

Puissance réactive : Comparaison Lignes / Câbles

Schéma équivalent



TECHNIQUES FUTURES de câbles d'énergie : Coûts en fonction de la puissance transportée.



RAPPORTS DES COÛTS

« Liaisons souterraines / Liaisons Aériennes »

Rapport CE 10 décembre 2003

	380 / 400 kV	150 / 220 kV	Source
Autriche	8	-	Verbund APG Styria link
Belgique	-	-	Elia
Danemark	7,2	4,0	Eltra / Elkraft
Finlande	3,5	-	
France rurale	10	2,2 à 3	RTE - Rapport Piketty
GB	15 à 25	-	National Grid
Irlande	-	7,7	ESB National Grid
Italie	5,9	5,5	Electricity Authority
Norvège	6,5	4,5	Statnett

Impact sur l'environnement

1. OCCUPATION DE L'ESPACE,
2. IMPACT VISUEL,
3. BRUIT,
4. ECHAUFFEMENT,
5. CHAMP ELECTRIQUE,
6. CHAMP MAGNETIQUE,
7. POLLUTION,
8. IMPACT SUR LES ETRES VIVANTS.

COMPARAISON DES CARACTERISTIQUES D'ENVIRONNEMENT

Liaisons 2000 MVA par :	Lignes aériennes	CIS	CIG	Cryocâbles SHTC
Occupation espace Largeur Couloir / Tranchée	50 à 100 MVA / m	400 MVA / m	700 MVA / m	2000 MVA / m
Impact visuel	oui	Limité aux extrémités	Limité aux extrémités	Limité aux extrémités
Bruit	30 à 54 dB (A)	0	0	0
Echauffement	non	oui	oui	non
Champ électrique	5000 V / m	0	0	0
Champ magnétique	10 μ T	100 μ T	< 1 μ T	0
Pollution air, eau, sol, ...	non	Non Techno. sans Pb ni PVC	Mise en œuvre de SF ⁶	non
Effets sur êtres vivants	Electrocution d'oiseaux	0	0	0

9 - CONCLUSION : DES SOLUTIONS POUR L'AVENIR

En conclusion

- **Un large portefeuille de solutions techniques existe.**
- **Approfondir l'étude des solutions prometteuses répondant aux besoins prévisibles et les comparer.**
- **Améliorer les solutions existantes et développer des techniques nouvelles susceptibles de répondre aux attentes de la société.**