Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 66 (1975)

Heft: 1

Rubrik: Für Sie gelesen = Lu pour vous

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Perspectives à long terme de l'industrie de l'énergie électrique en Europe, 1970–1985

Extrait d'un document établi par le secrétariat de la Commission économique pour l'Europe (CEE)

1. Introduction

Une étude de perspectives à long terme vise surtout à dégager les principales tendances de l'évolution et à esquisser ainsi le cadre où des études plus précises à court et à moyen terme pourront utilement avoir lieu. Des études de ce genre sont particulièrement nécessaires à l'industrie de l'énergie électrique, car il s'agit d'une industrie qui met en œuvre de grands équipements à longue durée de vie et qui, par conséquent, doit s'engager dans de gros investissements à long terme. Les erreurs d'appréciation d'ordre économique risquent ainsi d'être lourdes de conséquences: une unité électrique commandée aujourd'hui ne sera mise en service que dans cinq à sept ans et doit fonctionner pendant vingt ou trente ans.

Il se peut qu'avant la fin de cette décennie l'industrie de l'énergie électrique soit secouée par de fortes tensions dues aux difficultés qu'on rencontre pour faire face à une demande d'électricité toujours croissante avec des prix de revient du kilowatt-heure plus élevés, car tous les coûts réels de production et de distribution, y compris notamment les coûts sociaux d'environnement, y seront incorporés progressivement.

Même si la croissance continue aux taux du passé ne peut plus être acceptée comme la seule hypothèse de base, il ne serait pas réaliste de songer à un fléchissement appréciable de la tendance actuelle de la demande d'électricité, à moins que des changements profonds ne soient aussi envisagés dans la façon dont la société est appelée à se développer qualitativement et quantitativement.

Pour diversifier la fourniture, pour «fixer» d'une certaine manière le prix, fortement influencé par le marché, du fuel lourd, pour éviter les conséquences d'une crise majeure du combustible, l'industrie de l'énergie électrique s'est de plus en plus intéressée à l'énergie d'origine nucléaire. Les résultats de cette politique sont les quelque 30 000 mégawatts électriques d'origine électronucléaire actuellement installés dans la région de la CEE, dont la moitié à peu près en Europe. Avant la fin de cette décennie, pratiquement tous les pays européens disposeront de centrales nucléaires ou auront, au moins, fixé des programmes précis. Pourtant les difficultés ne cessent ces derniers temps de s'accumuler en ce qui concerne la production électro-nucléaire: préventions du public, escalade des coûts, longues attentes pour l'obtention du permis de construction, critiques d'environnement à l'égard des filières actuellement exploitées (faible utilisation de l'uranium et décharges thermiques élevées en particulier), un avenir prometteur mais chronologiquement incertain vis-à-vis du développement technologique (filières à haute température, surgénérateurs, fusion).

Il se peut que, si des mesures ne sont pas prises dès maintenant, si une planification soigneuse et pour des périodes d'avenir relativement longues n'est pas entreprise, si un effort de recherches et développement technologique n'est pas entamé, si la coopération internationale dans le domaine de l'énergie électrique, y compris les combustibles, ne s'intensifie pas, les déséquilibres entre demande et production pourraient déjà se faire sentir au cours de cette décennie et ils auraient tendance à s'approfondir avec le risque de déboucher dans une crise de pénurie d'électricité qui serait longue à surmonter.

Ce rapport a été établi en ayant en vue trois buts:

– dégager les principales tendances du développement de l'énergie électrique en Europe pendant la période 1970–1985;

– effectuer des projections, sur une base de comparaisons internationales, des principaux paramètres technico-économiques qui caractérisent ce développement; et

– soulever les principales questions qui mériteraient l'attention des gouvernements et des agents de décision et qui seraient susceptibles de faire l'objet d'une coopération internationale dans le secteur de l'énergie électrique.

2. Développement de l'industrie de l'énergie électrique et activité économique générale

Il est incontestable que le développement de l'industrie de l'énergie électrique est étroitement lié à l'activité économique générale, notamment dans les secteurs de l'industrie et des transports, et que l'importance du rôle joué par l'électricité dans le développement de l'économie dépasse de loin ce que l'on pourrait espérer de sa modeste participation à la formation du produit économique. En 1970, la valeur ajoutée par les secteurs «électricité et gaz»[1]) n'a représenté que 4,8 % du produit industriel pour l'ensemble de l'Europe[2]) (tableau I).

L'électricité est caractérisée par son développement particulièrement dynamique à l'intérieur du secteur énergétique. Tandis que celui-ci montre une tendance à long terme de dédoublement tous les quinze ans, la consommation d'énergie électrique se voit doubler toutes les décennies.

Lorsqu'on essaie d'expliquer pourquoi l'électricité a subi, et subit encore, un essor de croissance particulièrement soutenu, nettement supérieur à celui de l'ensemble du secteur énergétique, il faut tenir compte de ce que l'électricité est la forme la plus évoluée de l'énergie, qu'elle dispose d'un quasi-monopole pour certaines utilisations telles que l'éclairage, ou le traitement et la transmission de l'information, l'électrochimie ou l'électrométallurgie et que, d'autre part, elle est en mesure de desservir les mêmes usages que les autres formes d'énergie. Il faut également rappeler que l'électricité est, en principe, le support de l'exploitation de la production électronucléaire qui semble appelée à assurer à terme une partie importante des besoins énergétiques. L'électricité présente aussi des atouts qui la rendent très attractive pour l'utilisateur (commodité d'emploi, facilité de transformation et absence de toute pollution), atouts qui jouent sans doute dans le sens d'encourager la consommation de l'électricité par rapport aux autres formes d'énergie.

Indicateurs du rôle de l'industrie de l'énergie électrique dans l'ensemble de l'activité industrielle en Europe Tableau I

Indicateurs	Secteur industriel		Secteur énergétique		Secteur électricité et gaz	
	1970	Taux annuel 1963–70	1970	Taux annuel 1963–70	1970	Taux annuel 1963–70
Valeur ajoutée (en 10^9 dollars)	476	7,2 %	41	5,6 %	22,7	8,1 %
Nombre d'employés (en millions)	90,9	1,7 %	5,1	−1,3 %	2,0	1,5 %
Valeur ajoutée par employé (en 10^3 dollars)	5,2	5,4 %	8	7 %	11,4	6,5 %

[1]) A l'exclusion du gaz naturel.

[2]) Dans ce rapport, sauf indication contraire, les termes «Europe» ou «pays européens» se réfèrent à l'ensemble des pays de la CEE, à l'exception des Etats-Unis d'Amérique et du Canada.

Toute modification du niveau de population ainsi que du revenu par tête est de nature à déterminer une variation de la demande d'électricité. Néanmoins, la corrélation mathématique que l'on pourrait établir entre la consommation européenne d'électricité et le produit économique ne saurait être très représentative, car la consommation d'électricité au niveau national est fortement influencée par les facteurs caractéristiques de chaque pays tels que la structure industrielle ou la disponibilité de certaines ressources énergétiques primaires. D'autre part, le recours à de nouvelles sources d'énergie, telles que le nucléaire, ou le développement d'utilisations de l'électricité à caractère nouveau telles que la climatisation des locaux, ou de substitution, telles que le chauffage ou le transport, peuvent avoir une incidence positive appréciable sur le nombre de kilowatts-heures consommés pour un même niveau de revenus. Malgré toutes ces considérations, il n'en reste pas moins intéressant de tenir compte de l'évolution du rapport consommation d'électricité-produit économique, car il reflète l'effet plus ou moins grand de résonance qui peut en résulter sur le secteur électrique comme conséquence des fluctuations caractéristiques de l'activité économique.

3. Projections de la demande d'énergie électrique de 1970 à 1985

La consommation d'énergie électrique en Europe, l'Union des Républiques socialistes soviétiques exclue, s'est assez exactement ajustée au long des cinquante dernières années à une «loi» de dédoublement décennal, exception faite de la période conjoncturelle influencée par la deuxième guerre mondiale (tableau II).

L'accroissement de la consommation a tendance à diminuer au fur et à mesure que la consommation spécifique par habitant augmente. Le fléchissement de l'accroissement est particulièrement rapide dans les premières étapes de l'électrification et semble entamer un processus de saturation dès que l'on dépasse un certain niveau. Dans la fig. 1, on a représenté la consommation par habitant en 1960 et le taux de croissance moyen 1960–1970 de la consommation totale pour les différents pays européens. On peut y constater qu'à partir d'un certain niveau de consommation, les taux de croissance ont tendance à se stabiliser entre 6 et 8 %.

Tendances de la consommation d'énergie électrique dans la région de la CEE durant les cinquante dernières années (Indices) Tableau II

Année	Europe	URSS	Etats-Unis
1921	17	–	15
1926	26	–	22
1931	33	–	30
1936	48	–	31
1941	65	–	47
1946	61	47	70
1951	100	100	100
1956	148	198	158
1961	221	338	203
1966	321	560	387
1971	430	814	395

A partir du modèle économétrique on a obtenu les projections (indice = 100 pour 1970) de la consommation d'énergie électrique en Europe suivantes, pour un niveau de confiance de 95 %:

Année	Valeur probable	Max.	Min.
1975	146	152	140
1980	213	223	204
1985	311	322	292

Ces chiffres, qui indiquent un taux d'accroissement moyen par an, au cours de la période considérée, entre 7,4 et 8,1 %, légèrement supérieurs au dédoublement décennal, se trouvent d'ailleurs confirmés par ceux qui ont pu être obtenus à partir des estimations par pays contenues dans la documentation soumise au Colloque sur les perspectives à long terme de la situation de

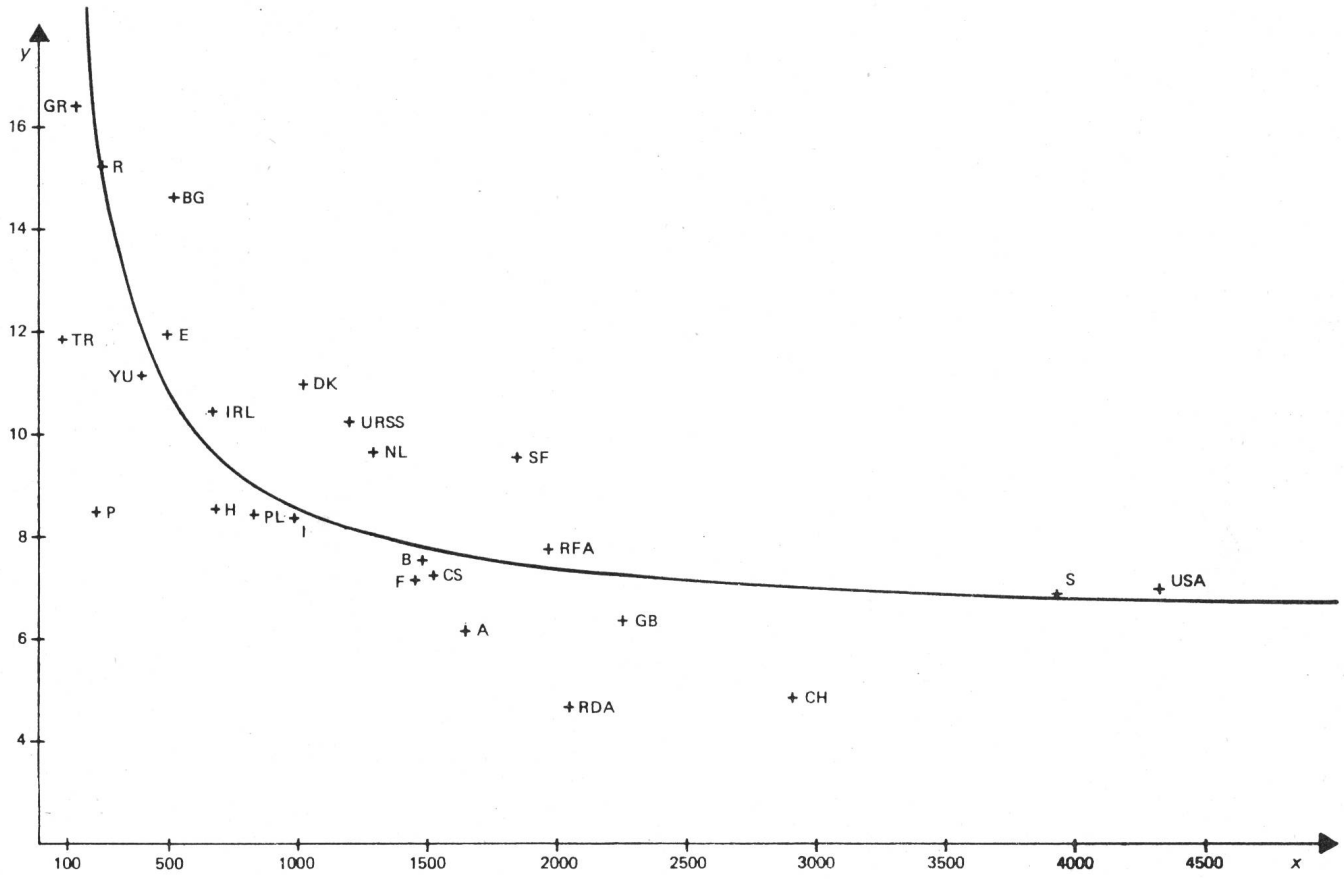

Fig. 1 Taux d'accroissement de certains pays européens

x: Consommation nette d'énergie électrique par tête (1960), en kWh

y: Taux d'accroissement annuel de la consommation nette d'énergie électrique (1960 à 1970)

Estimations par pays utilisées dans la préparation du rapport Tableau III

Pays	Demande d'énergie électrique (TWh)					Population (en millions)					kWh pour unité de produit intérieur brut (en dollars E.-U.)			
	1970	1975	1980	1985	Taux annuel (%)	1970	1975	1980	1985	Taux annuel (%)	1965	1975	1985	Taux annuel (%)
Allemagne, Rép. féd. d'	234,7	333,3	424,8	666,6	7,2	60,7	62,0	63,0	64,2	0,38	1,50	1,94	2,47	2,5
Autriche	23,8	31,9	42,6	57,1	6	7,4	7,6	7,8	8,0	0,52	1,72	1,92	1,99	0,7
Belgique	29,3	40,7	55,7	76,2	6,6	9,7	9,9	10,1	10,4	0,46	1,13	1,50	1,86	1,6
Bulgarie	19,4	33,8	58,4	82,4	10,1	8,5	8,9	9,1	9,4	0,67	1,42	2,52	3,25	4,2
Danemark	14,7	22,0	34,0	49,0	8,4	4,9	5,1	5,3	5,5	0,77	1,04	1,65	2,41	4,2
Espagne	52,4	88,4	142	230,6	10,4	33,2	34,8	36,4	38,0	0,91	1,00	1,61	2,29	2,2
Finlande	21,7	32,8	46,2	64,7	7,6	4,7	4,8	4,9	5,0	0,42	1,93	2.84	3,54	3,0
France	140,1	198,9	281,6	400,7	7,3	51,1	53,1	55,3	57,6	0,80	1,29	1,60	2,06	2,4
Grèce	9,4	18,7	28,0	39,0	10,0	8,9	9,2	9,5	9,7	0,58	0,67	1,47	1,57	4,3
Hongrie	16,5	25,1	37,6	55,0	8,4	10,3	10,5	10,8	11,0	0,44	1,10	1,50	2,02	3,0
Irlande	5,8	...	...	...	...	3,0	3,1	3,3	3,5	1,03	0,97	...	...	...
Italie	116,8	151,8	262,8	373,8	8,1	53,7	55,7	57,9	60,0	0,74	1,31	1,47	2,16	2,5
Norvège	56,8	81,2	105,6	130,6	5,7	3,9	4,1	4,3	4,5	0,96	7,39	8,24	8,54	0,7
Pays-Bas	38,8	55,9	80,3	103,6	6,8	13,0	13,7	14,5	15,3	1,09	1,07	1,61	1,90	5,6
Pologne	59,9	87,4	127,0	198,3	8,3	33,0	34,7	36,6	38,2	0,98	1,26	1,56	1,98	2,3
Portugal	7,2	11,0	17,0	25,0	8,6	9,6	9,9	10,3	10,7	0,73	0,74	0,86	1,05	1,4
Rép. dém. Allemande	61,5	...	...	...	...	17,3	17,4	17,7	18,0	0,27	2,19	...	...	...
Roumanie	32,7	58,5	101,0	169,1	11,5	20,3	21,4	22,4	23,3	0,92	1,27	2,22	3,23	4,8
Royaume-Uni	233,3	...	...	...	...	56,0	57,7	59,5	61,8	0,66	1,75	...	...	...
Suède	64,7	100,9	145,6	198,6	7,8	8,0	8,3	8,6	8,7	0,56	2,88	4,00	5,21	3,0
Suisse	28,4	38,3	45,4	56,8	4,7	6,3	6,6	7,0	7,4	1,08	2,07	...	...	...
Tchécoslovaquie	44,9	61,5	82,2	112,2	6,3	14,7	15,2	15,8	16,2	0,65	1,60	1,88	2,12	1,4
Turquie	8,2	15,9	26,1	40,1	11,2	35,6	40,7	46,5	52,8	2,66	0,45	...	...	...
URSS	735,7	1085,9	1603,1	2366,4	8,1	242,6	255,6	270,6	286,9	1,13	2,08	2,47	2,98	1,8
Yougoslavie	25,0	44,2	64,2	93,0	9,2	20,6	21,7	22,8	23,8	0,96	1,13	1,54	1,53	1,5

l'énergie électrique, qui a eu lieu à Stockholm en septembre 1972. En effet, le taux moyen pour l'Europe obtenu à partir des estimations contenues dans tableau III à un niveau de confiance de 95 %, est compris entre 7,5 et 8,1 %.

Il ressort du tableau III, qu'il existe une dispersion importante des taux de croissance selon les différents niveaux de consommation par habitant. Afin de réduire l'écart type de l'échantillon, on a séparé les pays européens en deux groupes. Pour le groupe I (pays avec une consommation par habitant en 1970 supérieure à 2500 kWh, voir fig. 2 le taux de croissance obtenu à partir des estimations nationales, à un niveau de confiance de 95 %, se situe entre 6,7 et 7,2 % par an; tandis que pour le groupe II le taux de croissance moyen se situerait entre 9 et 9,5 % par an. Il faut noter que puisque le groupe II ne représente que 26 % de la consommation en 1970, le taux élevé de ce groupe a une influence moins importante sur le taux moyen européen.

Dans les fig. 2 et 3 on a représenté la consommation totale et par habitant d'énergie électrique en 1970, resp. les projections pour l'année 1985.

Dans le tableau IV, on a indiqué les projections de la consommation d'énergie électrique en Europe, URSS exclue, obtenues par quatre procédés différents. On peut constater que les résultats atteints sont parfaitement comparables.

Projections de la consommation européenne d'énergie électrique, 1970/1985 (Indice pour 1970 = 100) Tableau IV

Procédé employé	1975		1980		1985	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
1. Modèle économétrique de tendance 1955–1970	140	152	204	223	292	322
2. Modèle économétrique de tendance 1960–1970	139	148	199	215	283	312
3. Estimations par pays	142	146	203	213	292	312
4. Corrélation avec le PIB	140	150	201	219	289	320
Valeurs limites	139	152	199	223	283	322

Il serait intéressant de comparer l'évolution de la consommation brute d'électricité par habitant dans trois grandes subrégions de la CEE (projections «moyennes» en kilowatts-heures):

	1970	1985	Indice augmentation de la consommation totale 1970–1985
Europe, URSS exclue	2608	6 933	308
URSS	3031	8 265	322
Etats-Unis	8009	18 800	289

On peut constater que, malgré la consommation actuelle par habitant relativement élevée des Etats-Unis (trois fois celle de l'Europe), le rythme de croissance prévu n'est que légèrement inférieur.

Traditionnellement, le secteur industriel a été le grand consommateur d'électricité. Pourtant, par suite du développement économique et de l'augmentation du niveau de vie, la consommation pour des usages domestiques et assimilés a montré, et montre toujours actuellement, un grand dynamisme qui fait fléchir l'importance relative de la demande industrielle.

L'accroissement de la consommation ménagère d'électricité est étroitement lié à l'augmentation du pouvoir d'achat de la population que l'on constate actuellement en Europe, et au progrès technologique qui fait déboucher continuellement sur le marché des nouvelles possibilités d'utilisation ménagère de l'électricité. La croissance démographique, la multiplication du nombre des foyers par famille, la lutte contre la dégradation de l'environnement dans les agglomérations urbaines, qui se fait pressante, et l'accessibilité à l'équipement électroménager suite à l'industrialisation intensive, sont également des atouts qui jouent dans le sens d'une augmentation de la consommation d'électricité dans le secteur domestique.

L'électricité se révèle être la seule source d'énergie capable de fournir et de combiner les besoins en lumière, force motrice, chaleur et froid exigés par le désir de confort des foyers, parallèle à l'augmentation du pouvoir d'achat de la population.

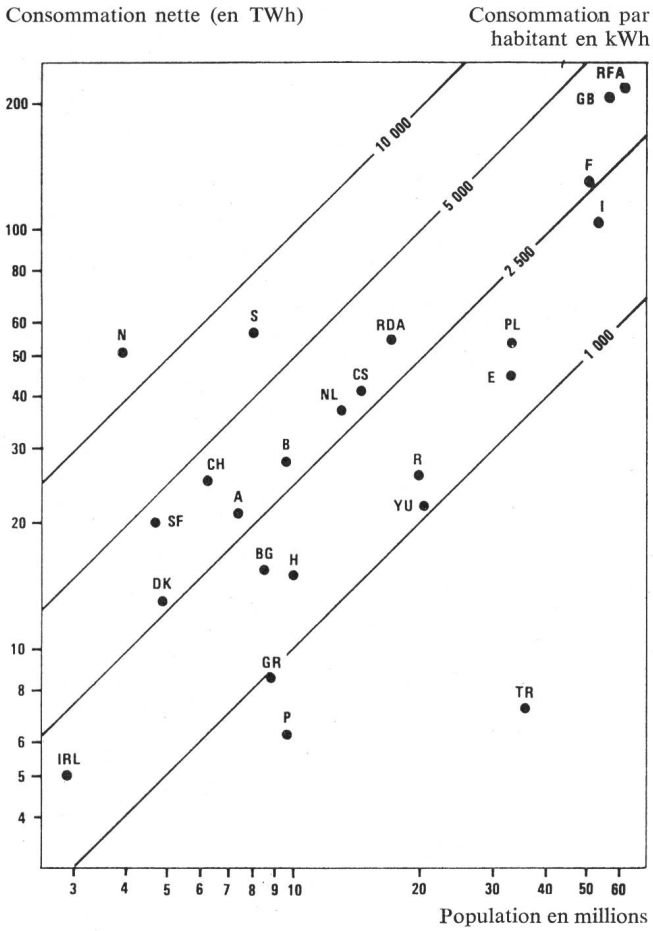

Fig. 2 Consommation totale et par habitant d'énergie électrique dans les pays européens, en 1970

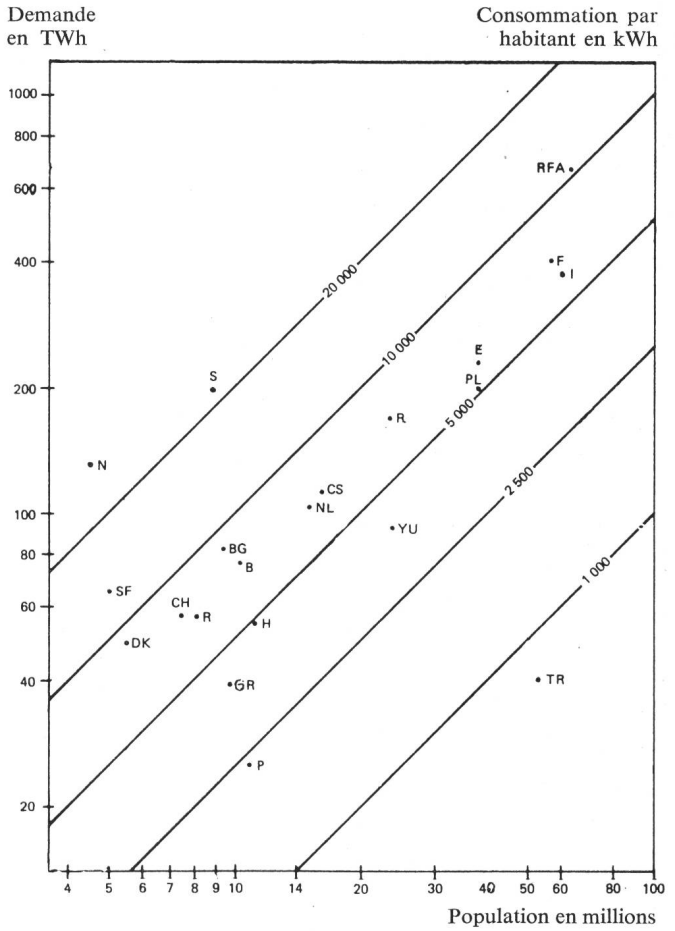

Fig. 3 Consommation totale et par habitant d'énergie électrique dans les pays européens, estimations pour 1985

4. Facteurs pouvant influencer la demande future d'énergie électrique

Parmi les facteurs susceptibles d'influencer le développement futur de l'industrie de l'énergie électrique, on a retenu ici: l'évolution démographique, le développement de l'activité économique, les préoccupations d'environnement, le progrès technologique et le développement possible du chauffage électrique et des véhicules électrifiés.

4.1 Evolution démographique

La population européenne en 1970 était de 737 millions d'habitants (dont l'URSS 243 millions) qui représentaient 20 % de la population mondiale. Néanmoins, à cette date, la région européenne a consommé 2000 milliards de kWh, ce qui représente 44 % de la consommation mondiale d'électricité. En 1985, la population européenne pourrait atteindre 850 millions d'habitants, dont 287 millions en URSS, et représenter 17 % de la population mondiale. D'ici là, la quote-part de l'Europe dans la consommation d'électricité tendra à diminuer par suite de l'accroissement plus rapide de la consommation dans les pays en voie de développement.

Dans le tableau V, on a indiqué les chiffres de population prévus entre 1970 et 1985 correspondant à l'ensemble de l'Europe, l'URSS et les Etats-Unis. On indique également les taux de croissance moyens annuels tout au long de la période envisagée, à savoir 1970–1985, et les pourcentages de la population mondiale qu'ils représentent.

On constate à partir du tableau VI que, pour les quatre régions de l'Europe qui y sont considérées, la population urbaine s'accroît à un taux annuel nettement supérieur à celui de la population totale.

Dans le secteur industriel, on assiste à la diminution relative des industries de base, grandes consommatrices d'électricité, qui

Estimations de l'évolution démographique dans la région de la CEE, 1975–1985 (millions d'habitants) Tableau V

	1975		1980		1985		1970–1985
	Total	Pourcentage [1])	Total	Pourcentage [1])	Total	Pourcentage [1])	Taux annuel
Europe	516	12,8	539	12,1	563	11,5	0,87
URSS	256	6,4	271	6,1	287	5,9	1,13
Etats-Unis	219	5,5	235	5,3	253	5,2	1,36

[1]) De la population mondiale.

Estimations de l'accroissement de la population urbaine en Europe, 1970–1990 Tableau VI

	1970		1990		Taux annuel 1970–1990 (%)	
	Total [1])	Pourcentage [2])	Total [1])	Pourcentage [2])	Pop. totale	Pop. urbaine
Europe occidentale	108	72	137	85	0,6	1,2
Europe orientale	57	55	60	67	0,7	1,7
Europe méridionale	65	51	95	63	0,8	1,9
Europe du Nord	62	76	76	82	0,7	1,0
URSS	139	57	214	71	1,1	2,2

[1]) En millions d'habitants.
[2]) De la population totale.

Evolution de la structure sectorielle de la demande d'énergie électrique, 1960–1985 (Indice pour la demande 1970 = 100) Tableau VII

	Année	Demande totale		Usage industriel		Usages domestiques et assimilés	
		E [4])	E [5])	E [4])	E [5])	E [4])	E [5])
Europe [1])	1960	48,3	47,8	31,6	31,6	14,9	14,4
	1965	69,5	70,6	43,5	43,8	23,6	24,4
	1970	100,0	99,4	59,6	59,1	37,5	37,3
	1975	143,8	–	81,9	–	59,7	–
	1980	206,8	–	112,4	–	94,9	–
	1985	297,3	–	154,3	–	150,8	–
Groupe I [2])	1960	51,9	51,1	33,2	33,0	16,8	16,2
	1965	71,9	73,4	43,3	44,1	26,1	27,0
	1970	100,0	99,4	56,7	56,4	40,6	40,1
	1975	138,8	–	74,0	–	63,1	–
	1980	192,7	–	96,7	–	98,1	–
	1985	267,6	–	126,3	–	152,6	–
Groupe II [3])	1960	38,1	38,3	27,0	27,1	9,1	9,2
	1965	61,9	61,8	43,0	42,7	16,3	16,7
	1970	100,0	98,9	68,4	66,5	28,7	29,1
	1975	161,9	–	108,8	–	51,5	–
	1980	261,6	–	173,3	–	88,6	–
	1985	422,8	–	275,6	–	156,0	–

[1]) URSS exclue.
[2]) Pays européens avec une consommation d'électricité par habitant en 1970 supérieure à 2500 kWh (voir fig. 2).
[3]) Pays européens ayant une consommation d'électricité par habitant en 1970 inférieure à 2500 kWh (voir fig. 2).
[4]) estimé [5]) observé

auront tendance d'autre part, à l'avenir, à s'installer dans des pays en voie de développement munis d'abondantes ressources énergétiques.

Néanmoins, les tendances que l'on observe dans l'activité industrielle ne permettent pas de songer à un fléchissement de la demande d'électricité dans ce secteur. En effet, l'activité industrielle européenne est de nos jours caractérisée par la croissance soutenue de la production, la fabrication de produits techniquement très élaborés, une tendance à la mécanisation et à l'automatisation des processus de production, l'utilisation intensive des systèmes informatiques, l'amélioration des conditions de travail et une préoccupation accrue de l'augmentation de la productivité. Il faut également tenir compte du développement d'applications technologiques de l'électricité comme, par exemple, la production de très hautes températures.

Les projections obtenues à l'aide de modèles économétriques des tendances constatées au cours de la dernière décennie pour les consommations destinées à des usages industriels ainsi qu'à des usages «domestiques et assimilés» sont indiquées dans le tableau VII.

L'exode rural est à l'origine d'une pénurie croissante de main-d'œuvre dans les campagnes, qui tend à être compensée par une augmentation de la productivité par voie d'une mécanisation et d'une automatisation accrues des processus dans les exploitations agricoles, ce qui est grandement favorisé par l'électrification. L'électrification a également des répercussions sociales très favorables pour les habitants des zones rurales.

Il faut également retenir que la concentration urbaine accroît les besoins publics d'énergie électrique. C'est notamment le cas pour l'éclairage des voies publiques, l'exploitation des stations d'épuration et les transports. D'autre part, la lutte contre la pollution atmosphérique, particulièrement difficile dans les grandes agglomérations, va s'appuyer en grande partie sur l'électricité, particulièrement pour ce qui concerne les transports.

4.2 Développement économique

Les aléas de l'activité économique générale ne manqueront pas d'avoir une répercussion importante sur le développement de l'industrie de l'énergie électrique. On peut s'attendre à ce que le développement futur de l'économie européenne soit basé, en grande partie, sur les industries à valeur ajoutée élevée et sur le secteur tertiaire. Ce développement sera notamment caractérisé par une productivité croissante.

La recherche d'une augmentation de la productivité fait toujours appel à une mécanisation et une automatisation plus poussées. Ceci va entraîner un accroissement de la consommation d'énergie électrique. Des effets analogues résulteront de l'amélioration des conditions de vie et de travail qui accompagnent le développement économique.

On a retenu, comme indicateur du développement économique, les produits intérieurs bruts (PIB) ainsi que leurs projections.

On trouvera dans le tableau III les kWh par unité de PIB correspondant aux différents pays européens. Ces projections s'arrêtent, dans cette étude susmentionnée, à 1980. Faute de mieux, on a estimé qu'elles pourraient être extrapolées jusqu'à 1985, aux fins de cette analyse.

Le modèle économétrique à régression multiple a permis d'obtenir les projections de la consommation d'électricité indiquées ci-dessous (100 = indice pour 1970) à partir des projections du PIB:

Année	$E_{probable}$	E_{max}	E_{min}
1975	145	150	140
1980	210	219	201
1985	304	320	289

Ceci représente des taux moyens d'accroissement de la demande d'électricité entre 7,3 et 8 % par an, ce qui est tout à fait comparable aux résultats obtenus à partir des autres procédés utilisés pour l'estimation des projections de la demande d'énergie électrique (tableau IV).

Ce qui pourrait être appelé «degré d'intensité d'utilisation de l'énergie électrique dans l'activité économique», représenté par le nombre de kilowatts-heures par unité de produit économique, est relativement variable pour les différents pays européens; on peut le constater dans le tableau III. Voici les chiffres globaux correspondant à certaines sous-régions, en kilowatts-heures par dollar:

	1965	1975	1985	Taux annuel moyen 1970–1985
Europe, URSS exclue	1,52	1,94	2,54	2,6
dont, Europe occidentale	1,52	1,94	2,52	2,5
Europe orientale	1,54	1,96	2,61	2,7
URSS	2,08	2,47	2,98	1,8

4.3 Intérêt pour l'environnement

Personne ne discute les avantages indéniables d'ordre mésologique que présente l'électricité: il s'agit de la seule forme d'énergie qui s'avère tout à fait «propre» et particulièrement «sûre» à l'utilisation. Ces qualités, associées à la souplesse et à la facilité d'emploi qui caractérisent cette forme d'énergie «presse-bouton» sont de nature à encourager sa consommation. Mais un environnement «tout électrique», un endroit libre de toute pollution où les industries, les maisons d'habitation et les transports ne consomment que de l'électricité a, actuellement, sa contrepartie dans les lieux de production et transport de l'énergie électrique où sont occasionnés des effets secondaires lesquels, lorsqu'ils atteignent un certain volume, peuvent exercer une action nuisible sur l'environnement. On peut citer, à cet égard, la pollution de l'air, le dégagement de produits radioactifs, le stockage des déchets, le bruit, le dégagement de chaleur, l'occupation de l'espace et la dégradation du paysage.

Pour surmonter dans une certaine mesure ces effets négatifs, l'industrie électrique dispose des atouts consécutifs au dédoublement spatial production-utilisation et à la concentration des investissements. Dans la mesure où l'industrie de l'énergie électrique s'avère capable de maîtriser les problèmes d'environnement posés au stade de la production, du transport et de la distribution de l'électricité, elle sera appelée à jouer un rôle de plus en plus actif à l'intérieur du secteur énergétique dans la lutte contre la dégradation du milieu.

4.4 Progrès technologique

Le progrès technologique peut agir directement sur la demande en mettant à la disposition des consommateurs de nouvelles possibilités d'utilisation de l'énergie électrique. Le progrès technologique peut également agir dans le sens de réduire le prix des appareils branchés au réseau électrique, ce qui présente un effet multiplicateur sur la quantité des appareils électriques utilisés. On ne peut pas considérer que cet effet ait un caractère additif vis-à-vis de la consommation d'électricité, car il faut normalement s'attendre à une diminution de l'utilisation par appareil. Pourtant, dans l'ensemble, cet effet provoque de nouveaux besoins en électricité et certainement un appel de puissance plus grande.

Le progrès technologique agit également à l'intérieur de l'industrie de l'énergie électrique aux stades de la production, du transport et de la distribution, en améliorant sa fiabilité d'exploitation et sa productivité et, par voie de conséquence, son niveau de compétitivité par rapport aux autres formes traditionnelles d'énergie. Le progrès technologique se fera tout particulièrement sentir dans les centrales nucléaires qui semblent appelées à jouer un rôle important dans l'ensemble de la production énergétique européenne d'ici la fin du siècle, provoquant ainsi un «glissement» de la consommation d'énergie vers l'électricité.

Le progrès technologique peut enfin donner lieu à de nouvelles techniques de production d'électricité à partir de sources autres que les classiques: géothermie, marémotrice, fusion, solaire, etc.

4.5 Chauffage et climatisation des locaux

Jusqu'ici, l'électricité a généralement été considérée comme une source d'énergie onéreuse pour satisfaire les besoins de chauffage. Pourtant, cet état de choses pourrait être renversé par des considérations telles que les avantages pour l'utilisateur du «tout électrique» (dès que l'équipement électrique pour la fourniture des besoins autres que le chauffage devient important), l'installation des accumulateurs de chaleur qui permettent la consommation d'électricité «creuse» à meilleur marché et l'influence de l'intérêt porté à la protection de l'environnement.

L'impact psychologique lié au désir de confort qui augmente avec le niveau de vie peut également favoriser le développement du chauffage électrique. Le chauffage électrique offre des avantages en raison de la simplicité de son emploi, de son confort, de sa propreté ainsi que du silence, de la souplesse et de la sûreté de son utilisation.

Le chauffage direct n'apporte pas d'amélioration dans le facteur d'utilisation des installations de production et transport. Par contre, le chauffage à accumulation «placé» entièrement dans les zones «creuses» de la courbe de charge est produit à des coûts marginaux (pratiquement prix du combustible et pertes). Cependant, les possibilités de l'utilisation exclusive des périodes creuses pour le chauffage restent assez limitées. D'autre part, il ne serait pas justifié de supprimer les avantages du tarif réduit pour les heures creuses une fois que les usagers sont équipés en fonction de ces avantages. En conséquence, un développement massif du chauffage électrique basé exclusivement sur le procédé d'accumulation ne semble pas en principe justifié. Quant au chauffage direct, il est en général trop cher dans les logements anciens. Par contre, il semble devenir compétitif pour les nouveaux bâtiments adaptés dès leur construction à ce type de chauffage.

Sur la base d'une dépense importante d'énergie, l'activité humaine a tendance à se dérouler en dehors du milieu naturel, ce qui risque pourtant d'avoir d'importantes implications écologiques. C'est pourquoi la question de la climatisation des locaux sera considérée avec grand soin à la lumière des préoccupations actuelles d'environnement. Le développement de la climatisation des locaux pourrait entraîner l'utilisation croissante de la pompe à chaleur pour le chauffage, ce qui impliquerait des investissements plus importants mais des consommations d'énergie beaucoup plus faibles que pour le chauffage à résistance.

4.6 Véhicule électrique

Il est peu probable que, d'ici 1985, le véhicule électrique devienne un moyen de transport routier important. Il pourrait pourtant se voir peu à peu confier le transport à l'intérieur des villes où les problèmes de pollution se font de plus en plus aigus. D'autre part, compte tenu de leurs caractéristiques techniques ainsi que de leurs performances actuelles, ils sont mieux adaptés pour ce type de transport. Quant au transport interurbain, il appartiendrait plutôt au chemin de fer électrifié d'en prendre la charge.

Un accroissement du rôle du chemin de fer serait d'ailleurs susceptible d'entraîner une économie notable de ressources énergétiques:

	kcal par tonne-km	kcal par passager-km
Chemins de fer	105	250
Voitures et camions	350	700
Avions	5750	1500

Des nouveaux procédés, basés sur l'électricité, sont envisagés tels que les aéroglisseurs guidés (Etats-Unis, France, Royaume-Uni) ou la suspension magnétique (République fédérale d'Allemagne). On pense ainsi atteindre des vitesses entre 300 et 450 kilomètres/heure.

Ce qui est surtout à l'origine du nouveau regain d'intérêt pour le véhicule électrique, c'est l'attention accrue portée à la protection de l'environnement. Les avantages du véhicule électrique pour l'environnement sont évidents. Il suffit de rappeler l'absence de pollution de l'air et du bruit. Malgré ces avantages, le véhicule électrique trouvera des difficultés pour percer un marché où le moteur à combustion est bien implanté. Compte tenu de ses possibilités techniques actuelles, il est possible que ce soit dans le domaine des véhicules utilitaires de faible charge et dans le transport urbain en commun qu'il pourra trouver un premier débouché. Il pourrait également trouver sa place dans le transport urbain individuel sous forme de taxis, probablement sans chauffeur, gérés par ordinateur. Des véhicules hybrides, combinant le moteur à explosion et la batterie électrique, pourraient se voir confier le transport entre la ville et la zone suburbaine.

L'intérêt que suscite actuellement le véhicule électrique relève plutôt de ces avantages pour l'environnement que des progrès décisifs dans son développement technologique. Il est vrai que l'utilisation de la commande électronique présente sans doute une amélioration appréciable, car elle permet de mieux profiter de l'énergie stockée dans les accumulateurs pour l'alimentation des moteurs. Pourtant, les performances du véhicule électrique sont très liées à celles des batteries d'accumulateurs qui n'ont pas subi de changements très importants ces dernières années. Même si elles ont augmenté la densité d'énergie, elles se trouvent toujours loin des combustibles liquides, car, à poids égal, elles accumulent de l'ordre de cinquante fois moins d'énergie.

La recherche n'a pas encore mis au point des piles à combustibles suffisamment intéressantes du point de vue économique pour concurrencer, soit le moteur à batteries, soit le moteur à explosion dans les transports avant la prochaine décennie.

5. Aspects d'environnement du développement de la production d'électricité

Il est certain que l'industrie de l'énergie électrique n'est ni la seule ni même celle qui produit le plus de nuisance à l'environnement. Pourtant, par l'importance de ses investissements et le fait qu'ils soient relativement concentrés, ses répercussions sur l'environnement se font particulièrement sentir.

Il ne peut plus s'agir de choisir entre énergie électrique dans un environnement dégradé et un environnement intact sans électricité. Dans un environnement physique et social qui a subi des dommages irréparables à la suite de l'urbanisation rapide, de l'expansion industrielle et de l'explosion démographique, l'énergie électrique fait partie intégrante de la qualité de vie. Les efforts doivent être plutôt orientés vers une utilisation plus rationnelle de l'énergie électrique ainsi que vers une réduction ou élimination, le cas échéant, des nuisances à l'environnement occasionnées aux stades de sa production, son transport et sa distribution afin de mettre en valeur les avantages d'ordre mésologique que l'électricité offre à l'utilisateur.

Parmi les effets secondaires inhérents à la production d'électricité susceptibles de provoquer des nuisances à l'environnement, on pourrait notamment citer: les émissions dans l'atmosphère par la cheminée des centrales thermiques classiques, dont les oxydes

de soufre et d'azote, qui ne sont pas encore parfaitement maîtrisés, retiennent tout particulièrement l'attention; les décharges thermiques aux cours d'eau dues aux besoins de refroidissement des centrales qui, chauffant les eaux naturelles au-dessus de certaines limites, peuvent occasionner des perturbations écologiques qui, jusqu'à présent, n'ont pas toujours été bien évaluées; le bruit de certaines installations de production ou de transformation de tension, lorsqu'elles sont implantées dans des zones habitées; les déchets provenant de la combustion du charbon; les déchets des usines de retraitement des combustibles nucléaires pour lesquels on n'a pas encore trouvé de solution définitive à l'écartement permanent du cycle biologique de certains éléments à longue vie; l'encombrement des installations ainsi que les effets esthétiques négatifs sur le paysage. Le rendement des centrales thermiques classiques est actuellement supérieur à 40 %. En ce qui concerne les centrales nucléaires, la situation est différente: les centrales équipées de réacteurs à eau légère ont un rendement d'environ 33 %, ce qui est nettement inférieur au thermique classique et, de plus, en l'absence des gaz de combustion qui évacuent à travers la cheminée quelque 10 % de la chaleur produite, les centrales nucléaires versent dans l'eau de refroidissement pratiquement la totalité de la chaleur à éliminer. Les centrales nucléaires sont donc actuellement en position défavorable vis-à-vis des décharges thermiques. Mais cet état de chose a tendance à évoluer: les filières AGR (réacteur avancés réfrigérés au gaz) ont déjà des rendements comparables au thermique classique actuel, il en sera de même pour les réacteurs à haute température (HTR) et pour les surgénérateurs (FBR). Ainsi donc, en ce qui concerne le rendement, les centrales nucléaires vont, dans un avenir proche, s'aligner aux côtés des centrales thermiques classiques.

Une amélioration appréciable du rendement des centrales pourrait être obtenue par l'incorporation des générateurs magnéto-hydrodynamiques (MHD), en remplacement des turbines et alternateurs actuellement utilisés. Il apparaît que les premières grandes centrales électriques équipées de générateurs MHD à cycle ouvert pourraient avoir un rendement global de 50 %. Cette technologie se trouve au premier stade de son développement. On s'attend à ce que le rendement puisse être poussé jusqu'à 60 % par élévation des températures d'entrée des gaz et de l'intensité des champs électriques dans le générateur. Mais cette technologie est encore trop récente pour pouvoir atteindre la compétitivité avec les procédés classiques avant 1985.

L'énergie thermique résiduelle des centrales électriques peut trouver, dans certains cas, des utilisations particulières.

Une des façons fondamentales consiste à faire en sorte que la turbine débite sur une installation de réutilisation de la vapeur plutôt qu'à vide sur le condenseur. Il faut néanmoins considérer qu'en général cette production mixte crée des contraintes tant du point de vue de l'exploitation de la centrale que de son implantation. Les contraintes d'exploitation sont proportionnellement réduites lorsque la vapeur utilisée (obtenue dans ce cas par soutirage de la turbine) ne représente qu'une partie du total.

Lorsqu'on ne trouve pas d'utilisation à l'énergie thermique dégagée par les centrales électriques, il faut prendre des précautions pour éviter au maximum que la dissipation de la chaleur ne provoque des perturbations écologiques.

Le problème à long terme que présente la gestion des déchets à grande radioactivité provenant des centrales nucléaires et des usines de retraitement du combustible risque de devenir une difficulté majeure pour l'incorporation massive du nucléaire à la production d'électricité.

La production européenne d'électricité d'origine nucléaire prévue pour les environs de 1985, qui est de 80 millions de mégawatts-jours (MWj), suppose, avec le rendement actuel des centrales, la production de quelque 240 millions de MWj thermiques. Si l'on accepte que l'on peut tirer 30 000 MWj par tonne de combustible, on produira, vers 1985, 8000 tonnes environ de combustibles irradiés par an, avec une radioactivité totale de plus de 30 milliards de curies. Les éléments combustibles retiennent normalement 99,9 % des produits de fission qui ne sont récupérés qu'ultérieurement dans l'usine de retraitement. La plupart des produits de fission ont une période relativement courte qui permet d'atteindre pratiquement la stabilité avant même d'être amenés à l'usine de retraitement, pendant le délai de «refroidissement» dans la piscine de la centrale, où les éléments combustibles séjournent de trois à quatre mois. Néanmoins, 2 % de l'activité originale requièrent des soins spéciaux afin d'éviter des dommages à longue échéance.

Ce sont les radioéléments à longue période qui exigent une attention toute particulière. Des radio-isotopes tels que le Sr-90 ou le Cs-137 avec des périodes de l'ordre de trente ans avec, par conséquent une activité mille fois plus faible dans trois cents ans pourraient, à la rigueur, être tenus à l'écart du cycle chronologique sans difficulté majeure. Mais le problème se pose de façon différente lorsqu'il s'agit de garantir le stockage étanche pendant des centaines de milliers d'années; tel est le cas du Pu-239 (période, 24 000 ans) ou du I-129 (période, 17 millions d'années). Ce dernier avec le Kr-85 et le tritium constituent le groupe le plus important de radio-isotopes à longue période versés dans la biosphère par l'industrie nucléaire. Même si les faibles concentrations actuelles ne permettent pas de parler d'un danger réel, la situation pourrait devenir critique à la suite d'un développement rapide de l'industrie nucléaire et obliger à réduire les doses permises déversées dans l'environnement et à augmenter les contrôles.

Actuellement, la plupart des déchets à grande activité sont stockés sous forme liquide dans des réservoirs en acier inox appropriés dans les usines de retraitement. Leur activité s'étend entre 10^4 et 10^6 Ci/m^3 et le volume produit est de l'ordre de 400 à 800 litres par tonne d'uranium retraité. Ce stockage sous forme liquide ne peut être considéré que comme une situation intérimaire jusqu'à ce que l'on trouve une solution définitive à ce problème. A cet égard, le stockage souterrain dans des mines de sel se présente actuellement comme la solution la plus prometteuse. Il s'agit de formations géologiques inaccessibles aux courants d'eau souterrains, permettant de creuser des grandes cavités, suffisamment plastiques pour éviter les fissures, avec de bonnes propriétés de conduction de la chaleur et relativement abondantes. La répercussion sur le prix de revient de l'électricité de ce stockage a été chiffré entre 0,037 à 0,045 dollars par mégawatt-heure. Même si le stockage des déchets radioactifs ne relève pas actuellement d'une façon directe de l'industrie de l'énergie électrique car d'autres organismes s'en occupent, il ne faut pas oublier que les frais de stockage font néanmoins partie du prix de revient du kilowatt-heure.

D'une façon générale, comme l'a signalé le Commissariat français à l'énergie atomique, le problème important de l'élimination des déchets radioactifs ne trouvera sa solution définitive que dans le cadre d'une coopération internationale et devrait constituer pour les vingt ans à venir un sujet de premier ordre. En particulier, si la solution du stockage dans des mines de sel est retenue, il conviendrait d'établir des accords internationaux pour l'utilisation conjointe de telles mines car tous les pays n'en disposent pas.

Afin de surmonter des difficultés auxquelles peut se heurter le développement normal de l'industrie électrique, par suite des contraintes d'environnement, et pour éviter ainsi des pénuries d'électricité, certaines mesures devraient être envisagées:

– augmenter les délais des prévisions, ce qui permettrait de mieux tenir compte des contraintes de l'environnement dans la planification de l'énergie électrique par suite d'une analyse plus complète des coûts entraînés et des bénéfices à obtenir;

– procéder à une normalisation poussée des composantes des installations ainsi que de leurs paramètres caractéristiques; cela aurait comme conséquence un meilleur contrôle, une plus grande fiabilité, faciliterait les réparations et raccourcirait les délais pour la concession des permis de construction et de mise en service;

– encourager la coordination aujourd'hui insuffisante entre l'industrie électrique et les services responsables de la protection de l'environnement au stade de la planification, afin d'éviter au maximum des difficultés et des retards pendant la construction;

– intensifier l'effort de recherche afin de surmonter les difficultés d'environnement que présentent les systèmes actuels de production, mettre au point certaines technologies (surgénérateurs) et maîtriser de nouvelles sources d'électricité notamment la fusion thermonucléaire naturelle (énergie solaire) ou artificielle (réacteurs à fusion) ainsi que la chaleur disponible à l'intérieur de la Terre (géothermie en profondeur).

6. Evolution future de la structure de production d'électricité

L'évolution de la structure de la production entre 1970 et 1985 sera caractérisée par l'incorporation des centrales nucléaires et la diminution relative de la production hydraulique primaire, la production thermique restant relativement constante en pourcentage et ayant une tendance à diminuer vers la fin de la période considérée. Ainsi le nucléaire, qui ne représente que 3 % de la production électrique en 1970, pourrait couvrir 28 % des besoins en électricité en 1985, tandis que l'énergie hydro-électrique verra son importance relative fortement réduite, en raison de l'épuisement progressif des aménagements économiquement exploitable.

On s'attend à ce que vers la fin de cette décennie la production thermique, à partir des combustibles fossiles, cède progressivement le pas à la production électronucléaire. La diminution de l'importance relative du thermique classique est en partie expliquée par le fait que, comme le nucléaire ne fournit, pour l'instant, qu'une énergie de base, il oblige la production thermique à se déplacer vers la partie modulée du diagramme et, par conséquent, vers des utilisations annuelles décroissantes.

L'évolution de la ventilation de la production d'électricité en Europe, URSS comprise (pourcentage de la production totale à l'année correspondante) est représentée dans le tableau VIII.

Il se peut que, à l'avenir, la configuration des systèmes électriques soit plus fortement influencée par la modification de la structure de la production que par la redistribution géographique de la demande. Le fait que les centrales nucléaires soient en train de se substituer aux aménagements hydro-électriques et le recours aux tours de refroidissement par des considérations d'environnement est de nature à donner une plus grande flexibilité au choix des sites pour l'implantation de centrales en permettant de les rapprocher des centres de consommation. Par contre, la taille toujours croissante des unités modèlera fortement, à l'avenir, la disposition des réseaux. Il y aura une tendance à concentrer dans des centrales de 5000 MWe et au-dessus, des unités de grande taille: au-dessus de 1000 MWe pour le thermique classique et encore supérieur pour le nucléaire. Cela rend difficile le choix des sites compte tenu des contraintes d'environnement. D'autre part, si l'on veut profiter des avantages économiques offerts par une augmentation des puissances unitaires sans avoir à payer les pénalisations économiques qui en découlent, il faudrait faire appel à une politique d'interconnexion accrue entre les systèmes électriques des pays européens.

Projections de la production européenne d'électricité Tableau VIII

	1970		1985	
	TWh	%	TWh	%
Hydro-électrique	473	22	740	11
Thermique classique	1612	75	4100	61
Electronucléaire	65	2	1885	28
Total	2150	100	6730	100

Perspectives d'évolution de la structure de la production d'électricité en Europe Tableau IX

	1970		1985	
	GW	%	GW	%
Hydro-électrique	133	26	240	15
Technique classique	370	72	990	62
Electronucléaire	11	2	320	20
Total	514	100	1600	100

Les investissements en 10^6 dollars E.-U. 1970–1985 Tableau X

Pays	Total	Thermique classique	Hydro-électrique	Electro-nucléaire	Réseaux
Allemagne, Rép. féd.	1507,6	389,3	27,4	137,1	953,9
Autriche	147,1	7,7	108,4	–	31,0
Belgique	232	56,2	12,4	25,1	138,3
Finlande	91,2	42,9	11,4	–	36,9
France	1098,4	279,7	179,2	104,2	487,1
Grèce	145,1	50,8	11,1	–	80,9
Hongrie	134,8	70,7	–	3,4	60,7
Italie	967,6	308,1	94,7	[1])	564,8
Norvège	229,1	–	125,5	–	76,2
Pays-Bas	353,6	...	...	...	...
Pologne	337,6	215,7	5,2	–	88,6
Portugal	66,1	5,3	43,9	–	16,9
Royaume-Uni	1154,6	276,7	7,2	289,9	536,6
Suède	421,7	98,6	63,8	98,6	148,9
Suisse	243,3	127,4	[1])	[1])	115,8
Tchéco-slovaquie	133,1	67,3	3,2	7,3	55,3
Turquie	127,1	43,1	42,1	–	42,1
Yougoslavie	223,4	30,8	161,7	–	30,9

[1]) Compris sous thermique classique.

Les projections relatives à la puissance installée en Europe en 1985 sont les suivantes (tableau IX).

Il faut notamment constater le développement particulièrement rapide prévu pour la production électronucléaire (le double environ de celui pour l'ensemble de l'Europe).

Les avantages économiques du nucléaire face au thermique classique résident notamment dans un changement d'échelle et la possibilité de réduire considérablement le poids du combustible: une tonne d'uranium utilisée dans les réacteurs actuels équivaut déjà à quelque 15 000 tonnes d'équivalent charbon; utilisée dans les surgénérateurs de demain, elle pourrait équivaloir à 1 million de tec. Grâce à cet effet de «miniaturisation», les problèmes de sécurité d'approvisionnement deviennent plus aisés à résoudre; le passage de la technique des réacteurs à eau légère à celle des surgénérateurs accroîtra encore plus fortement les disponibilités en énergie, car une légère augmentation du prix de l'uranium naturel suffirait pour multiplier le nombre de gisements exploitables, sans que les coûts de production de l'énergie électrique soient sensiblement influencés. On peut néanmoins objecter que le kilowatt-heure d'origine nucléaire est tout de même nettement plus coûteux en investissements.

Les projections effectuées demandent l'installation, en Europe, de 1100 GWe, entre 1970 et 1985, le double de la puissance électrique disponible en 1970. Le total des investissements nécessaires, à prix constants, pourrait s'élever à plus de 200 milliards de dollars. Si l'on y ajoute les investissements dans le réseau de transport et distribution, on peut s'attendre à une dépense entre 400 et 450 milliards de dollars en quinze ans, à prix constants, pour l'ensemble de l'industrie européenne d'énergie électrique (tableau X).

Total des investissements réalisés en 1970 par l'industrie européenne de l'énergie électrique (URSS exclue) a été environ de 9 milliards de dollars, dont la ventilation a été approximativement la suivante (en milliards de dollars):

Centrales électriques 4,3
dont:
- thermique classique 2,6
- hydro-électrique 0,9
- électronucléaire 0,8

Réseau de transport et de distribution 4,7

Total des investissements en 1970 9,0

Ainsi donc pour mettre en exploitation les équipements nécessaires prévus entre 1970 et 1985, il faudra doubler en moyenne les investissements tous les sept à huit ans et cela dans l'hypo-

thèse d'une invariabilité des investissements unitaires, hypothèse qui ne peut pas être retenue car, au fur et à mesure que la production nucléaire prend la relève du thermique classique, les investissements par kilowatt augmentent. Il faudra donc s'attendre à des périodes de dédoublement légèrement plus longues pendant les premières années qui diminueront progressivement.

7. Tendances et perspectives de la production électro-nucléaire

Compte tenu de la structure particulière de leurs coûts de production, les centrales nucléaires sont appelées à fonctionner avec des facteurs de charge élevés. Le kilowatt-heure d'origine nucléaire est en effet caractérisé par des frais fixes élevés (amortissement des investissements) et des frais proportionnels faibles (dépenses de combustible). Les centrales nucléaires sont, par conséquent, particulièrement sensibles à la conjoncture économique (taux d'intérêt, inflation des coûts) mais moins sensibles aux aléas du marché des combustibles. Les coûts proportionnels de production dans les centrales nucléaires sont entre 1,5 et 2,2 fois inférieurs à ceux du thermique classique. Il y a également intérêt à réduire au minimum les délais de construction (actuellement de cinq à sept ans) afin de diminuer la répercussion des intérêts intercalaires.

D'une façon générale, les centrales nucléaires ne sauraient être compétitives avec le thermique classique au-dessous d'une certaine taille unitaire. Compte tenu de la différence de structure des coûts de production la comparaison économique entre les deux types de centrales exige un examen approfondi qui tiendrait compte notamment du taux d'intérêt, de la durée de vie de la centrale, de son facteur de charge, etc. Sauf pour des situations très particulières, il semble difficile de justifier économiquement la construction des unités nucléaires inférieures à 450 MWe, et cela en acceptant l'hypothèse, très favorable, d'un facteur de charge supérieur à 75 %.

D'ici 1985, le marché des centrales nucléaires sera contrôlé par les filières à eau légère (LWR). Elles représentent 60 % de la puissance actuellement installée dans le monde et 80 % de celle en construction. Les deux variantes à eau sous pression (PWR) et à eau bouillante (BWR) présentent des performances économiques très rapprochées, même si elles ont des caractéristiques techniques différentes. La taille de la plus grande unité LWR mise en service dépasse 800 MWe et des unités de plus de 1100 MW sont en construction. Même si la technologie actuelle pourrait permettre d'atteindre le palier des 2000 MWe, des mesures visant à imposer un plafond à ces puissances seront probablement prises. Aux Etats-Unis, la Commission de l'énergie atomique (CEA) vient de fixer à 3800 MWe la puissance thermique maximale des réacteurs à eau légère. La CEA cherche ainsi à encourager la normalisation de l'équipement afin d'améliorer la fiabilité et la sécurité d'exploitation et d'accélérer la procédure d'octroi d'autorisation de construction et de mise en service. L'importance croissante acquise par les filières LWR semble surtout due au bon équilibre existant entre leur niveau technologique et les besoins d'exploitation des producteurs d'électricité. Pourtant, ces filières ne sont pas exemptes de reproches dont les plus importants se réfèrent à leurs paramètres thermodynamiques de fonctionnement peu favorables qui occasionnent un rendement relativement bas, entraînant davantage de décharges thermiques et une plus faible utilisation de l'uranium.

Estimation des frais d'investissement pour des centrales de 1000 MWe mises en service en 1977 Tableau XI

	Nucléaire		Thermique classique	
	en millions de dollars E.-U.	en pourcentage du total	en millions de dollars E.-U.	en pourcentage du total
Frais direct de construction	168,6	49,8	144,6	52,6
Frais indirects de construction	42,4	12,5	29,0	10,6
Faux frais divers	13,5	4,0	11,4	4,2
Total frais de construction	224,5	66,3	185,0	67,4
Ajustement de prix pendant la construction	61,9	18,3	56,7	20,6
Intérêts intercalaires	52,1	15,4	33,1	12,0
Total frais d'investissement	338,5	100,0	274,8	100,0

Les frais d'investissement des centrales LWR sont à peu près le double de leurs coûts proportionnels. Ces frais d'investissement se sont vu augmenter depuis 120 dollars/kWe, au début des années soixante, à plus de 300 dollars/kWe, pour une centrale mise en service en 1977. Pendant cette même période le délai pour le projet, l'autorisation et la construction d'une grande centrale a passé de quatre ans à cinq-six ans, à partir de la signature du contrat. Les erreurs dans le calcul de la disponibilité et du délai de construction peuvent actuellement avoir une répercussion plus importante sur l'économie de la centrale que les écarts dus à des estimations des coûts eux-mêmes. Le tableau XI contient une comparaison des frais d'investissement estimés pour des centrales nucléaires et classiques avec une puissance nominale de 1000 MWe pour être mises en service en 1977. Mais le coût des deux types de centrales ne semble pas stabilisé et il faut s'attendre à une hausse due notamment à la répercussion des coûts d'environnement ainsi qu'à l'ajustement des prix. On a estimé que ces facteurs pourraient faire monter les frais de construction de 224 dollars/kWe à 248 dollars/kWe, pour une centrale nucléaire, et de 185 dollars/kWe à 234 dollars/kWe pour une centrale thermique classique. Les augmentations de coût, en dollars par kWe, étant ventilées de la façon suivante:

	Nucléaire	Thermique à charbon
Contrôle accru de la radioactivité	10,0	–
Elimination du soufre	–	33,0
Tours de refroidissement	8,0	6,0
Disponibilité de la centrale	2,0	4,0
Contrôle de qualité	1,0	2,0
Esthétique	0,8	0,4
Frais divers	1,7	3,6
Augmentation des frais de construction	23,5	49,0

Même si elles se heurtent à des difficultés, les filières à eau lourde (HWR) sont spécialement attrayantes par le faible coût de leur cycle de combustible, l'utilisation de l'uranium naturel et leur taux de conversion en plutonium favorable.

Il n'y a pas de doute en ce qui concerne le grand avenir qui s'ouvre à terme devant les réacteurs surgénérateurs (FBR). Mais d'ici 1985, ils ne joueront pas de rôle significatif dans la production d'électricité. Aujourd'hui la filière technologiquement la plus développée est celle LMFBR, qui utilise du sodium comme fluide caloporteur. Des réacteurs surgénérateurs en concurrence avec les LWR ne seront pas en exploitation avant 1980. C'est la nette amélioration dans l'utilisation du combustible qui fera de cette filière la préférée dans la production électro-nucléaire dès qu'elle atteindra le niveau de compétitivité. On a estimé que le coût d'une centrale LMFBR de 1000 MWe ne devrait pas excéder le double de celui des centrales à neutrons rapides de 250 MWe actuellement en construction, compte tenu de l'effet de taille et des améliorations technologiques prévues. Si cela s'avère certain, les frais d'investissement seraient comparables à ceux des filières LWR. D'autre part, les coûts d'exploitation ne sauraient être très différents.

Entre-temps, on peut s'attendre à un certain développement des filières à haute température (HTR). Ces filières HTR ont retenu les principales caractéristiques des filières à gaz. Il est peu probable que cette filière soit exploitée commercialement en Europe avant la prochaine décennie. Cette filière présente certains avantages par rapport à celle LWR: diminution des décharges thermiques, possibilité de disposer d'un cycle direct avec turbines à gaz, augmentation de la sécurité d'exploitation par la

Ressources d'uranium estimées en 1973 (en milliers de tonnes d'U)

Tableau XII

Pays	A moins de 10 $ par livre d'U_3O_8		De 10 à 15 $ par livre d'U_3O_8	
	Réserves	Ressources addition-nelles estimées	Réserves	Ressources addition-nelles estimées
Afrique du Sud	202	8	62	26
Australie	71	78	30	29
Canada	185	190	122	219
Etats-Unis	259	538	141	231
France	37	24	20	25
Niger	40	20	10	10
Suède	–	–	270	40
Autres pays	72	58	35	52
Total	866	916	680	632

Evolution du coût du cycle de combustible nucléaire 1975–1985 (en mils/kWh)

Tableau XIII

	LWR		PHWR		AGR
	1975	1985	1975	1985	1975
Achat U_3O_8	0,36	0,43	0,28	0,32	0,43
Conversion à UF_6	0,04	0,03	–	–	0,04
Enrichissement	0,41	0,40	–	–	0,38
Fabrication des éléments	0,16	0,16	0,33	0,26	0,13
Retraitement	0,13	0,12	–	0,28	0,09
Crédit du plutonium	(0,22)	(0,35)	–	(0,49)	(0,25)
Intérêts intercalaires	0,40	0,43	0,09	0,11	0,41
Total	1,28	1,22	0,70	0,48	1,23

présence de graphite au cœur du réacteur et une meilleure utilisation du combustible nucléaire.

Toutes les filières actuellement en exploitation industrielle utilisent l'uranium comme combustible. Elles produisent toutes également du plutonium comme sous-produit. Les réserves raisonnablement assurées à moins de 10 dollars la livre de U_3O_8 s'élèvent à environ 900 000 tonnes d'uranium. Ce chiffre se verrait augmenter de presque 75 % si l'on admet que les prix de l'U_3O_8 peuvent aller jusqu'à 15 dollars la livre. Si l'on ne se limite pas seulement aux réserves plus ou moins assurées mais on tient également compte des estimations, on peut s'attendre à disposer de quelque 1,8 million de tonnes d'uranium à des prix inférieurs à 10 dollars la livre d'U_3O_8, auquel on peut ajouter environ 1,3 million à des prix entre 10 et 15 dollars la livre (tableau XII). Il faut souligner que les chiffres avancés aujourd'hui pour les ressources en combustibles nucléaires ont un caractère provisoire du fait que les perspectives géologiques dans ce domaine ont été entamées à une époque relativement récente.

Le coût de l'uranium a une répercussion relativement faible sur le prix de revient du kilowatt-heure, notamment dans les surgénérateurs. Même dans le cas extrêmement improbable où le minerai d'uranium atteindrait un prix de 500 dollars la livre, sa répercussion sur le prix de revient du kilowatt-heure produit dans un surgénérateur serait de moins de 0,1 cent de dollars. On trouverait suffisamment de ressources d'uranium à 500 dollars la livre dans les schistes, les granites et même l'eau de mer pour l'alimentation en énergie électrique pendant des siècles.

On a indiqué dans le tableau XIII le coût du cycle de combustible nucléaire.

8. Tendances et perspectives de la production thermique classique

Le développement de la production d'électricité par des centrales thermiques classiques, pendant la période considérée, sera plutôt caractérisé par des problèmes soulevés par les aléas du marché des combustibles que par des modifications importantes dans l'équipement disponible.

Pour la couverture des pointes de charge de très courte durée, les turbines à gaz légères, du type *turbo-jet*, conviennent parfaitement. Mais la puissance unitaire des turbines à gaz est assez limitée (100 MWe actuellement) et on ne peut guère espérer de l'accroître sensiblement.

9. Rôle futur des aménagements hydro-électriques – accumulation par pompage

L'épuisement progressif des sites hydrauliques économiquement aménageables et la compétition avec les grandes unités thermiques, classiques et nucléaires, ont comme conséquence la réduction de la part correspondante à l'hydraulique dans les systèmes de production et la modification du rôle qui lui est réservé.

L'importance des aménagements hydrauliques pour l'approvisionnement en électricité primaire diminue progressivement.

Sauf quelques cas particuliers, les nouveaux aménagements hydro-électriques à vocation purement énergétique semblent être d'une faible rentabilité, principalement en raison du poids des investissements. Les aménagements à fins multiples (production d'énergie, irrigation, approvisionnement en eau des centres de population, navigation) peuvent conduire à une revalorisation des aménagements hydro-électriques qui serait d'autant plus nette que les charges seraient plus équitablement réparties.

Les aménagements hydro-électriques, grâce à leur fiabilité élevée et à leur souplesse d'exploitation, sont actuellement appelés à apporter une contribution importante à la couverture de la partie modulée du diagramme de charge et même pour subvenir aux «pointes». Le coût des turbines représente une part relativement faible quand on le compare aux investissements nécessaires à la construction d'un barrage. Du point de vue économique, cela permet de suréquiper les usines afin d'accroître leur capacité de réponse aux «pointes» de charge. Dans les plans de construction ou de transformation des aménagements hydro-électriques, les centrales à accumulation par pompage occupent la première place.

En 1970, il y avait 17 000 MWe de pompage en service dans le monde dont 8000 MWe en Europe, 6000 MWe aux Etats-Unis et 2600 MWe au Japon; 20 000 MWe en construction; et une quantité équivalente en commande ou à l'étude.

Face à la production thermique, qui manque de souplesse, et alors que les turbines à gaz ne représentent jusqu'à ce jour qu'un faible apport, la production hydro-électrique peut faire valoir ses qualités propres:

– des avantages d'environnement: contrôle et régularisation des crues, création d'un plan d'eau qui valorise l'esthétique du paysage, utilisation du réservoir pour les sports nautiques ou la pêche;

– simplicité d'intervention sur le réseau;

– souplesse de marché qui permet de suivre la «dentelle» du diagramme de charge et d'assurer la couverture des «pointes», de participer activement au réglage de la fréquence, de pallier les conséquences d'un incident inopiné sur un autre moyen de production ou sur le réseau, de participer largement à la compensation d'énergie réactive. La souplesse est une propriété fondamentale des centrales de pompage: le passage rapide de la marche en turbine à la marche en pompe (qui a l'effet d'une puissance négative) double normalement la puissance d'intervention. D'autre part, elles sont également bien adaptées au fonctionnement en réserve tournante alors que celui-ci revient cher lors de l'utilisation des groupes thermiques.

10. Perspectives des réseaux de transmission d'énergie électrique

Un réseau de transmission d'énergie électrique est, en principe, appelé à remplir les deux fonctions suivantes:

– Transporter l'énergie électrique des lieux de production aux grands centres de consommation;

– Interconnecter des réseaux régionaux d'un pays aussi bien que les réseaux de transmission des différents pays. Ces interconnexions sont utilisées notamment pour effecteur des échanges d'énergie électrique dans le but d'optimiser l'exploitation des moyens de production, les coûts de production et les pertes dans

les réseaux, ainsi que pour améliorer la sécurité d'alimentation. Cependant, les lignes d'interconnexion internationale sont parfois utilisées aussi pour des fournitures à long terme.

On constate une tendance à avoir recours aux hautes tensions pour les transmissions, ce qui, d'ailleurs, semble tout à fait logique, ainsi:

Niveau de tension (kV)	Pourcentage de la capacité transportée 1967	1970
60–150	17	12
200–250	59	45
380–400	24	43

Dans la plupart des pays européens, la tension utilisée pour la transmission de grandes quantités d'énergie est actuellement d'environ 400 kV (500 kV en URSS).

Un nouveau palier de tension est adopté à peu près tous les vingt ans. En général, il double par rapport au palier précédent, ce qui quadruple la capacité de transport du réseau qui, de ce fait, suit l'accroissement de la charge. Il est raisonnable de penser que le choix de la nouvelle tension repose principalement sur des considérations d'ordre économique. Le passage au palier de 400 kV s'est effectué vers 1960. Si l'on suit ce raisonnement, il semblerait qu'une tension de 750 kV puisse devenir économiquement justifiée au début de la prochaine décennie et une tension de 1100 kV ou plus vers l'an 2000. Cependant, certains experts estiment que la tension de 765 kV normalisée par la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) constitue un palier trop proche de l'actuel et ils se demandent s'il ne faudrait pas passer directement à une tension légèrement supérieure à 1000 kV. La CEI a d'ailleurs déjà envisagé la normalisation d'un seul niveau de tension, au-dessus de 765 kV, à savoir 1200 kV, qui comporte également l'avantage d'être éventuellement superposable sur les systèmes existants à 765 kV. On a calculé que le passage à une tension de 1050/420 kV revient à 10 % moins cher que l'adoption de la gamme 1430/765/420.

Le transport par courant continu, caractérisé essentiellement par des faibles coûts de transformation et frais d'investissement élevés, ne semble pas appelé à subir un grand développement avant 1985.

Diverse Informationen – Informations diverses

Tiefkühlung gewinnt an Boden

Auszug aus dem Jahresbericht des Schweizerischen Tiefkühl-Instituts (STI)

Der im letzten Jahr in Westeuropa und in den USA allgemein beobachtete starke Zuwachs an Tiefkühllagerraum in den Haushaltungen kann vor allem auf die Preissteigerungen beim Fleisch und andern Lebensmitteln zurückgeführt werden. Diese haben den Konsumenten preisbewusster werden lassen, der nun vermehrt auf günstige Einkaufsgelegenheiten achtet und so für sich die Preise zum Teil einfrieren kann.

Die Tabellen I und II geben einen Überblick über den Absatz der Tiefkühlgeräte und der ***-Kühlschränke in der Schweiz.

Bei den 1973 verkauften Tiefkühlgeräten fällt vor allem auf, dass der Mehrverkauf (20 000 Einheiten) gegenüber dem Vorjahr zu 90 % von den Tiefkühlschränken bestritten wird.

Die kleineren Schränke mit einem Inhalt bis zu 150 l sind mit 45 % an diesem Wachstum beteiligt. Die Raumschwierigkeiten in den modernen Küchen manifestieren sich deutlich in dieser Entwicklung.

Der wachsende Bedarf an Tiefkühllagerraum in der Küche zeigt sich auch im unverminderten Wachstum von 20 % bei den ***-Kühlschränken, deren Anteil am gesamten Kühlschrankabsatz sich 1973 auf 60,4 % (Vorjahr 56,9 %) erhöht hat.

Aufgrund von Erhebungen haben sich

ca. 11,5 % der Schweizer Haushaltungen im Jahre 1973 eine neue Tiefkühllagermöglichkeit (Schrank, Truhe, Fach im ***-Kühlschrank) zugelegt;

57 % aller Haushaltungen dürften gegenwärtig über eine *grössere oder kleinere Tiefkühllagermöglichkeit* verfügen;

ca. 24,6 % der Schweizer Haushaltungen besitzen ein eigentliches *Tiefkühlgerät* (Truhe oder Schrank).

Als Vergleich seien hier noch die Verhältnisse bezüglich separater Tiefkühlgeräte in den Haushaltungen einiger europäischer Länder aufgeführt:

	Haushaltungen mit separatem Tiefkühlgerät
Dänemark	68 %
Norwegen	66,8 %
Deutschland	29 %
Schweiz	24,6 %
Finnland	21,5 %
England	10,5 %
Frankreich	10 %

Gewerbe und Handel

Gemäss den Erhebungen des STI sind im Jahre 1973 260 fest montierte Tiefkühlräume mit total 35 887 m³ Inhalt (Vorjahr 400 Anlagen mit 12 064 m³ Inhalt) sowie 666 demontierbare Anlagen mit total 12 095 m³ Inhalt erstellt worden (Vorjahr 579 Anlagen mit 10 947 m³ Inhalt).

Durchschnittsgrössen:
fest montierte Anlagen: 138 m³ pro Anlage
demontierbare Anlagen: 18,1 m³ pro Anlage

Absatz von Tiefkühleinheiten 1973 — Tabelle I

	Haushalt	Gewerbe	Total	Veränderung gegenüber Vorjahr
Tiefkühltruhen	55 951	2501	58 452	+ 2,7 %
Tiefkühlschränke	52 037	377	52 414	+ 53,8 %
Kühlschränke mit echtem Tiefkühlfach (***-Schrank)			144 268	+ 20,0 %
Total Tiefkühleinheiten			255 134	+ 21,8 %

Grösse der verkauften Tiefkühlgeräte 1973 — Tabelle II

	Grössenklasse	Absatz 1973	Anteil am Gesamten
Tiefkühltruhen	bis 150 l	666	1,2 %
	151–250 l	16 465	28,2 %
	251–350 l	26 047	44,6 %
	351–500 l	13 674	23,4 %
	über 500 l	1 600	2,6 %
		58 452	100,0 %
Tiefkühlschränke	bis 150 l	22 293	42,5 %
	151–300 l	18 390	35,1 %
	über 300 l	11 731	22,4 %
		52 414	100,0 %