

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 47 (1956)
Heft: 1

Rubrik: Production et distribution d'énergie : les pages de l'UCS

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 18.01.2025

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

Production et distribution d'énergie

Les pages de l'UCS

De l'influence des machines à laver le linge sur la charge d'un réseau

Par W. Pfaehler, Winterthour et Ch. Morel, Zurich

621.311.153 : 648.23

Les machines à laver le linge ont certaines particularités quant à la charge qu'elles provoquent dans les réseaux. Les méthodes statistiques modernes fournissent à ce propos un moyen d'investigation extrêmement fructueux. De la distribution observée des charges, on peut déduire la valeur que la charge totale ne dépassera pas avec une probabilité donnée, que ce soit de façon générale ou pour un moment déterminé de la journée. La présente étude traite tout d'abord des machines à laver dans les maisons familiales. Les auteurs calculent la responsabilité probable des machines à laver à la pointe du réseau. Ils montrent dans quelle mesure la responsabilité à la pointe diminue lorsque le nombre d'appareils raccordé augmente. Ils examinent enfin le cas des machines à laver dans des maisons locatives, pour lesquelles la responsabilité à la pointe est plus élevée, par suite d'une utilisation plus intensive.

La première partie de cette étude a fait l'objet d'un rapport au Congrès de Londres de 1955 de l'Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'Énergie Électrique.

Die elektrischen Waschmaschinen weisen hinsichtlich der Netzbelastung einige Eigentümlichkeiten auf. Die modernen statistischen Methoden bilden diesbezüglich ein wertvolles Untersuchungswerkzeug. Von der beobachteten Verteilung der Belastung kann auf denjenigen Wert der Totalbelastung geschlossen werden, der mit einer gegebenen Wahrscheinlichkeit nicht überschritten wird, sei es ganz allgemein oder zu einer bestimmten Tageszeit. Im ersten Teil dieser Studie wird der Fall der Waschmaschinen in Einfamilienhäusern untersucht. Die mutmassliche Waschmaschinenspitze wird ermittelt und ihr Zusammenhang mit der Netzspitze gezeigt. Schliesslich wird die Abhängigkeit des Spitzenanteils von der Anzahl angeschlossener Waschmaschinen erörtert. Der zweite Teil befasst sich mit den gemeinsam benutzten Waschmaschinen von Mehrfamilienhäusern. Entsprechend der höheren Benutzung ist auch der Spitzenanteil dieser Maschinen höher.

Der erste Teil dieser Studie war Gegenstand eines Berichtes am Kongress der «Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'Énergie Électrique» in London, 1955.

Introduction

Les machines à laver le linge sont une des récentes applications de l'électricité en passe de prendre, en Suisse au moins, une extension remarquable. Or, ce développement n'est pas sans donner quelque inquiétude à l'exploitant soucieux d'égaliser, dans la mesure du possible, sa courbe de charge. En effet, les machines à laver le linge ont une puissance unitaire assez élevée — 5 à 10 kW pour les machines familiales et davantage pour les installations commerciales — et les habitudes des usagers sont les mêmes dans un même réseau. Il en résulte des pointes appréciables qui peuvent devenir désagréables, surtout si elles coïncident avec la pointe générale du réseau, sans parler des sections élevées qu'elles nécessitent et de la puissance à mettre à disposition dans les postes de transformation locaux.

Il est donc indispensable de se rendre compte non seulement de la charge que ces machines vont provoquer, mais de la structure de cette charge en rapport avec la charge générale du réseau.

Le problème se pose de façon un peu différente suivant le genre de machines considéré. Les installations commerciales sont d'utilisation assez régulière. Leur charge est indépendante des conditions extérieures et se répartit assez régulièrement sur les heures de travail des jours ouvrables; elle peut être assimilée à une charge industrielle normale.

Les machines à laver de maisons locatives n'ont pas une utilisation aussi régulière, bien qu'elles soient soumises à un cycle bien établi. En effet, les locataires peuvent disposer chacun de la machine commune pendant deux ou trois jours suivant leur nombre et lorsque chacun y a passé, le cycle recommence. Là déjà, on peut observer une influence du temps, mais celle-ci est très limitée, car il faut faire la lessive lorsque la machine est à disposition.

En outre, l'utilisation est relativement élevée, car la même machine est en service deux ou trois fois par semaine.

Il n'en est pas de même lorsque chaque abonné possède sa propre machine et peut en disposer à sa guise. Il choisira pour sa lessive un jour de beau temps, s'il n'obéit pas à une règle établie selon laquelle la lessive doit se faire un jour déterminé, le lundi par exemple.

Nous commencerons notre étude par ce dernier cas, le plus simple à traiter, pour passer ensuite au second.

A. Machines à laver dans les maisons familiales

1. Données initiales

Cette étude se rapporte à une colonie d'habitations de banlieue, entièrement électrifiée à l'exception du chauffage des locaux. Cette colonie compte, entre autre, 17 machines à laver le linge identiques, de 5,5 kW chacune. On a relevé pendant deux mois, du 26 avril au 26 juin 1954, à l'aide d'un wattmètre enregistreur, le diagramme de charge journalier du transformateur alimentant cette colonie. Comme le corps de chauffe des machines n'est pas subdivisé, il est aisé de reconnaître sur les diagrammes les enclenchements et déclenchements successifs de ces machines. Ceci a permis d'établir, par un dépouillement minutieux, le diagramme des machines à laver seules, dont une partie est reproduite à la figure 1. Pour des raisons de simplicité, on a indiqué en ordonnée non la puissance, mais le nombre n de machines en service.

Quant à la charge générale du réseau, on a constaté qu'au cours des 16 dernières années, des 64 maximums (4 par an) intervenant pour l'achat d'énergie (l'entreprise en question n'a pas de production propre), 62 se sont produits entre 7 h et 8 h 30 du matin.

Tableau I

Nombre de machines simultanément en service	0	1	2	3	4	5	6
Durée totale de l'enclenchement (nombre d'intervalles à 3 min chacun)	6152	3680	1620	510	166	83	29

La question qui se pose est double: quelle est la charge probable des machines à laver et quelle est leur responsabilité à la pointe?

2. Analyse de la charge

Le dépouillement du diagramme de charge des machines à laver seules (fig. 1) permet les constatations suivantes:

a) Déduction faite des dimanches et jours fériés, l'étude a porté sur 51 jours ouvrables. Elle comprend l'intervalle situé entre 6 h du matin et 18 h du soir, soit 12 h par jour, au total $51 \times 12 = 612$ heures;

b) La consommation totale d'énergie des 17 machines a été de 2668 kWh, soit une moyenne de 80 kWh par machine et par mois en chiffre rond. Cela correspond à une charge moyenne de 0,793 machine ou 4,36 kW pendant l'intervalle considéré (jours ouvrables de 6 h à 18 h);

c) En formant, de demi-heure en demi-heure, la charge moyenne des 51 jours, on obtient la courbe de charge journalière moyenne reproduite à la figure 2. Cette courbe permet de constater que la pointe des machines à laver se produit généralement le matin, entre 7 h et 8 h. Après 8 h, la charge décroît progressivement au cours de la journée, avec deux reprises passagères, l'une avant midi et l'autre avant 18 h. Cependant, cela n'est qu'une moyenne et l'étude du diagramme montre que de fortes charges peuvent aussi se produire l'après-midi, par exemple lorsque le temps s'éclaircit soudain après plusieurs journées pluvieuses.

3. Distribution de la charge

Si l'on reprend le diagramme dont une partie est reproduite à la figure 1, en choisissant comme unité de temps un intervalle de 3 min, on obtient pour le nombre de machines simultanément en service la distribution figurant au tableau I.

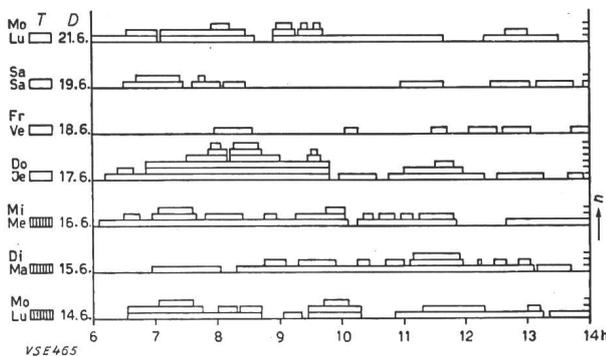


Fig. 1

Partie du diagramme de charge de 17 machines à laver de maisons familiales

- temps clair
- ▨ temps couvert
- temps pluvieux
- T temps
- D date
- n nombre de machines en service

La moyenne μ de cette distribution se chiffre par 0,793 machine, comme il a déjà été dit plus haut.

En principe, il s'agit là d'une distribution binomiale de la forme:

$$\varphi(x) = \binom{m}{x} p^x (1-p)^{m-x}$$

où p est la probabilité élémentaire d'un enclenchement et m le nombre maximum d'enclenchements simultanés possible. Dans le présent cas, on a:

$$p = \mu : m = 0,793 : 17 = 0,0466.$$

Avec ces éléments, il serait possible de calculer la distribution théorique (distribution de l'univers) et de la comparer avec la distribution observée sur l'échantillon. Le calcul en est cependant fastidieux, de sorte que l'on préfère lui substituer la distribution de Poisson qui donne, sous ces conditions, des résultats presque aussi exacts, mais dont la formule de récurrence est plus simple et, partant, le calcul plus aisé.

Cette distribution a la forme:

$$\varphi(x) = \frac{\lambda^x}{x!} e^{-\lambda}$$

et sa formule de récurrence s'écrit:

$$\varphi(x+1) = \varphi(x) \frac{\lambda}{x+1}$$

Dans cette formule, λ est la moyenne de la série observée (0,793) et $\varphi(x)$ la probabilité d'enclenchement simultané de x machines.

L'ajustement de la distribution observée à la distribution théorique, en d'autres termes le contrôle si l'échantillon en cause est vraiment issu de l'univers dont la moyenne est identique, se fait à l'aide du test χ^2 . La manière de procéder dans ce cas ressort du tableau II ci-dessous.

Tableau II

x	Fréquence observée o	Fréquence théorique c	o - c	(o - c) ²	$\frac{(o-c)^2}{c}$
0	6152	5539	613	375 769	67,9
1	3680	4392	-712	506 944	86,6
2	1620	1741	-121	14 641	8,4
3	510	460	50	2 500	5,4
4	166	91	75	5 625	61,8
5	83	15	68	4 624	307,6
6	29	2	27	729	364,5
Total	12 240	12 240	-	-	762,1

La somme de la dernière colonne $S \frac{(o-c)^2}{c} =$

762,1 est la valeur cherchée de χ^2 pour laquelle on trouve dans les tables que la probabilité est inférieure à 0,001. La distribution observée s'écarte donc sensiblement de la distribution théorique correspondante, bien que par sa forme elle lui ressemble

fortement. Cela pousse à rechercher les causes de cet écart. Les fortes divergences se situent aux deux extrémités de la distribution, pour des valeurs d' x égales à 0, 1, 4, 5 et 6. Quelle peut en être la cause ?

Il semble en premier lieu que l'utilisation des machines n'est pas absolument indépendante des circonstances extérieures. L'examen des graphiques montre que le temps exerce une forte influence. Lorsqu'il fait beau, les ménagères en profitent pour faire la lessive et, lorsqu'il pleut, les machines restent au repos. Mais si le mauvais temps dure quelques jours, l'activité reprend malgré tout, car les ménagères ne peuvent attendre trop longtemps, surtout s'il y a des enfants en bas âge dans la famille. C'est là une des raisons du déplacement constaté vers les extrémités de la courbe, au détriment des valeurs moyennes.

On remarque ensuite une concentration de l'utilisation des machines à laver au début de la journée. Cela n'est pas étonnant, car le linge doit pouvoir sécher avant le soir, mais cela fausse également le jeu du hasard sur lequel repose la distribution théorique, et ceci en faveur des fortes valeurs de la variable x .

Ces quelques réflexions incitent à abandonner la distribution générale pour examiner de plus près la répartition de la charge aux différentes heures de la journée. Si l'on prend par exemple la demi-heure la plus chargée de la journée, l'influence des facteurs étrangers mentionnés plus haut se fait beaucoup moins fortement ressentir. La distribution observée devra donc se rapprocher plus fortement de la distribution théorique. Le demi-heure la plus chargée est en outre la plus intéressante, car c'est elle qui fournit la pointe due aux machines à laver.

4. Etude de la demi-heure la plus chargée

Selon le diagramme de la figure 2, la demi-heure la plus chargée est celle comprise entre 7 h 30 et 8 h. La charge moyenne de cette demi-heure est égale à 1,5804 machine (8,70 kW).

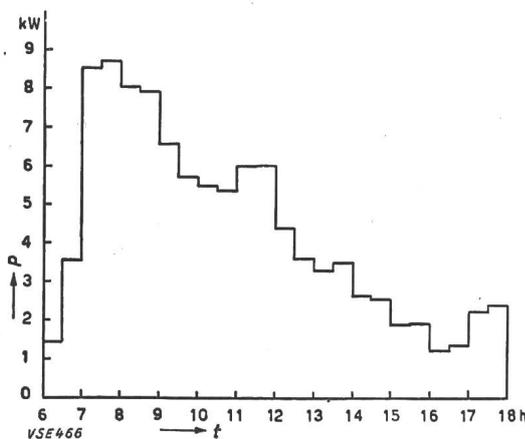


Fig. 2

Courbe de charge journalière moyenne de 17 machines à laver de maisons familiales

P puissance semi-horaire
t temps

Il est intéressant de connaître pour cette demi-heure, d'une part la probabilité simple $P_s(x)$ d'enclenchement simultané de 0, 1, 2... x machines et

d'autre part la probabilité $P_c(x)$ qu'une charge égale à x machines ne soit pas dépassée (probabilité d'enclenchement simultané de x machines ou moins). Comme la seconde probabilité repose sur une alternative: *ou aucune, ou une, ou deux... ou x machines*, elle est égale à la somme des probabilités simples de 0 à x .

La distribution des fréquences et son ajustement à la loi de Poisson ressortent du tableau III.

Tableau III

x	Fréquence observée o	Fréquence théorique c	$o - c$	$(o - c)^2$	$\frac{(o - c)^2}{c}$
0	96	105	- 9	81	0,771
1	186	166	20	400	2,410
2	113	131	-18	324	2,470
3	73	69	4	16	0,232
4	37	27	10	100	3,704
5	3	9	-6	36	4,000
6	2	3	-1	1	0,333
Total	510	510	-	-	6,114

$\chi^2 = 6,114$ pour $\chi^2 = 6,251$ $P = 0,10$
 $n = 3$ pour $\chi^2 = 4,642$ $P = 0,20$

L'ajustement est admissible, la probabilité étant légèrement supérieure à 0,10.

Le calcul détaillé des probabilités donne les résultats consignés au tableau IV.

Tableau IV

x	Probabilité de l'enclenchement simultané de		
	x machines $P_s(x)$	x machines ou moins $P_c(x)$	plus de x machines $P_d(x)$
0	0,20589	0,20589	0,79411
1	0,32539	0,53128	0,46872
2	0,25712	0,78840	0,21160
3	0,13576	0,92416	0,07584
4	0,05358	0,97768	0,02232
5	0,01692	0,99460	0,00540
6	0,00446	0,99906	0,00094

Si l'on admet que, dans un cas sur mille, une certaine charge puisse être dépassée, ce qui correspond à un degré de sécurité relativement élevé, on peut dire qu'entre 7 h 30 et 8 h du matin, il n'y aura pratiquement jamais plus de 6 machines simultanément en service (selon le tableau IV, pour $x = 6$, $P_d(x) = 0,00094 \cong 0,001$).

L'étude ne serait pas complète sans renseignements, si sommaires soient-ils, sur le reste de la journée. Une répétition des calculs sur chaque demi-heure serait toutefois fastidieuse. Nous lui avons préféré une solution graphique qui est d'une exactitude suffisante lorsqu'on se sert, au lieu d'une échelle centésimale ordinaire, de l'échelle dite des probabilités. Cette échelle est obtenue par transformation de la courbe monotone des fréquences de la loi normale (Gauss-Laplace) en une droite.

Une première famille de courbes (fig. 3) donne, pour différents paramètres x , les valeurs de la probabilité simple $P_s(x)$ en fonction de la moyenne λ . La seconde (fig. 4) concerne les probabilités composées $P_c(x)$, également en fonction de λ . Quant à la troisième, issue de la seconde, elle reproduit, pour différentes probabilités particulières choisies comme

paramètres, le nombre de machines en service qui ne sera pas dépassé, en fonction de la moyenne λ (fig. 5).

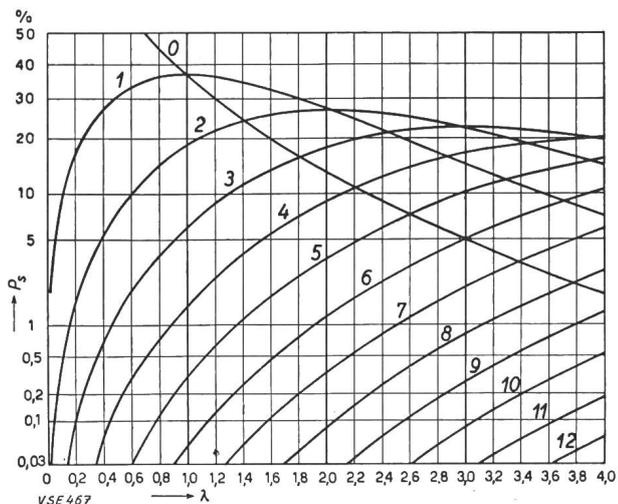


Fig. 3

Probabilité P_s de l'enclenchement simultané de x machines à laver
Les valeurs de x sont indiquées au-dessus des courbes correspondantes
 λ moyenne

A l'aide des graphiques ci-dessus, on peut établir le tableau V indiquant, pour chaque demi-heure, les différentes probabilités.

Il est clair que ces résultats ne sont strictement valables que pour le groupe de 17 machines considéré. On ne saurait les reporter sans autre à l'ensemble du réseau sans tenir compte du phénomène de la diversité. Selon l'expérience, ce phénomène contribue à réduire la part de chaque machine à la pointe dans la mesure où le nombre de machines raccordées augmente. Nous verrons plus loin comment on peut approcher ce problème.

Vu la possibilité d'application de la loi de Poisson, il semble que l'on pourrait procéder également

par une expérience simple à réaliser. Il suffirait d'enregistrer, par des sous-compteurs par exemple,

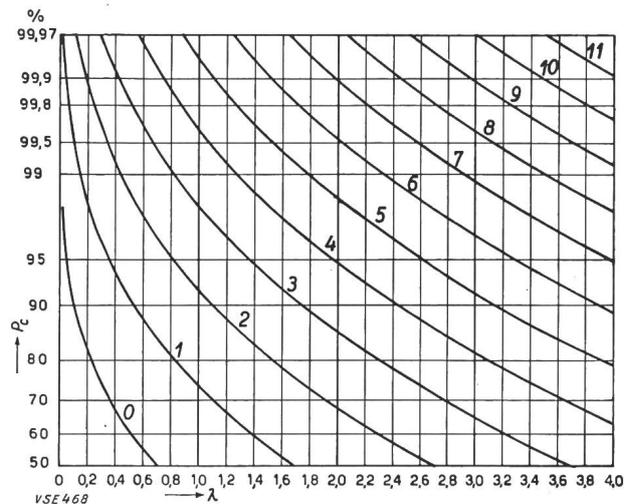


Fig. 4

Probabilité P_c de l'enclenchement simultané de x ou moins de x machines à laver
Les valeurs de x sont indiquées au-dessus des courbes correspondantes
 λ moyenne

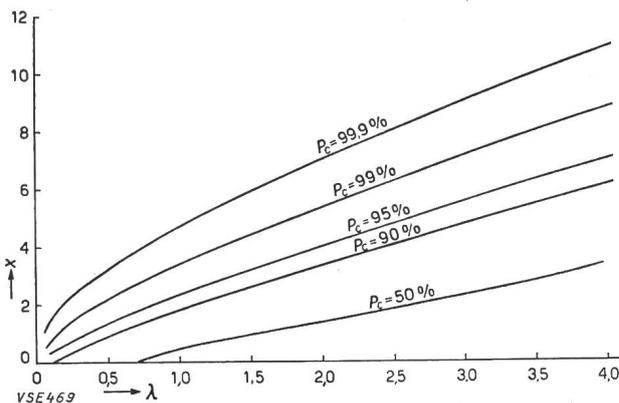


Fig. 5

Nombre maximum x de machines à laver simultanément en service, en fonction de la moyenne λ et pour différentes probabilités P_c

Tableau V

Demi-heure finissant à h	Moyenne λ	Probabilité simple $P_s(x)$ pour $x =$								Probabilité composée $P_c(x)$ pour $x =$							
		0	1	2	3	4	5	6	7	0	1	2	3	4	5	6	
6.30	0,26	0,777	0,197	0,024	0,002	—	—	—	—	0,777	0,974	0,998	—	—	—	—	
7	0,64	0,530	0,335	0,107	0,023	0,004	0,001	—	—	0,530	0,865	0,972	0,995	0,999	—	—	
7.30	1,55	0,214	0,330	0,255	0,132	0,050	0,015	0,004	0,004	0,214	0,543	0,798	0,930	0,980	0,995	0,999	
8	1,58	0,206	0,325	0,257	0,136	0,054	0,017	0,004	0,004	0,206	0,531	0,788	0,924	0,978	0,995	0,999	
8.30	1,46	0,231	0,339	0,250	0,120	0,043	0,013	0,003	0,003	0,231	0,570	0,820	0,940	0,983	0,996	0,999	
9	1,44	0,237	0,340	0,245	0,120	0,042	0,012	0,003	0,003	0,237	0,577	0,822	0,942	0,984	0,996	0,999	
9.30	1,21	0,296	0,364	0,219	0,087	0,026	0,006	0,002	0,002	0,296	0,660	0,879	0,966	0,992	0,998	—	
10	1,07	0,340	0,368	0,196	0,071	0,020	0,004	0,001	0,001	0,340	0,708	0,904	0,975	0,995	0,999	—	
10.30	1,00	0,368	0,368	0,184	0,061	0,015	0,003	0,001	0,001	0,368	0,736	0,920	0,981	0,996	0,999	—	
11	0,98	0,375	0,368	0,181	0,059	0,014	0,003	—	—	0,375	0,743	0,924	0,983	0,997	—	—	
11.30	1,09	0,333	0,367	0,200	0,074	0,020	0,005	0,001	0,001	0,333	0,700	0,900	0,974	0,994	0,999	—	
12	1,09	0,333	0,367	0,200	0,074	0,020	0,005	0,001	0,001	0,333	0,700	0,900	0,974	0,994	0,999	—	
12.30	0,80	0,450	0,358	0,146	0,038	0,007	0,001	—	—	0,450	0,808	0,954	0,992	0,999	—	—	
13	0,66	0,520	0,338	0,112	0,025	0,004	0,001	—	—	0,520	0,858	0,970	0,995	0,999	—	—	
13.30	0,60	0,550	0,328	0,099	0,020	0,003	0,001	—	—	0,550	0,878	0,977	0,997	0,999	—	—	
14	0,64	0,530	0,335	0,107	0,023	0,004	0,001	—	—	0,530	0,865	0,972	0,995	0,999	—	—	
14.30	0,48	0,620	0,295	0,072	0,012	0,001	—	—	—	0,620	0,915	0,987	0,999	—	—	—	
15	0,47	0,619	0,298	0,071	0,011	0,001	—	—	—	0,619	0,917	0,988	0,999	—	—	—	
15.30	0,35	0,700	0,250	0,044	0,005	0,001	—	—	—	0,700	0,950	0,994	0,999	—	—	—	
16	0,35	0,700	0,250	0,044	0,005	0,001	—	—	—	0,700	0,950	0,994	0,999	—	—	—	
16.30	0,23	0,786	0,190	0,022	0,002	—	—	—	—	0,786	0,976	0,998	—	—	—	—	
17	0,25	0,779	0,195	0,024	0,002	—	—	—	—	0,779	0,974	0,998	—	—	—	—	
17.30	0,41	0,668	0,270	0,054	0,007	0,001	—	—	—	0,668	0,938	0,992	0,999	—	—	—	
18	0,44	0,646	0,284	0,060	0,009	0,001	—	—	—	0,646	0,930	0,990	0,999	—	—	—	

la consommation de quelques centaines de machines à laver. De cette consommation, on peut déduire la charge moyenne, car on connaît le nombre maximum d'heures d'utilisation possible (environ 12 h par jour ouvrable). En groupant ces consommations de façon différente, c'est-à-dire en formant des groupes de plus en plus nombreux, on doit pouvoir obtenir des données suffisantes pour déterminer la loi de variation du facteur de diversité. Le temps nous a malheureusement manqué pour entreprendre cette étude; peut-être cette suggestion trouvera-t-elle un écho et engagera-t-elle l'un ou l'autre à chercher dans cette direction.

5. La responsabilité à la pointe du réseau

La question qui se pose maintenant est celle de la part que prennent les machines à laver à la charge et en particulier à la pointe du réseau.

Nous avons déjà vu à quelle charge on peut s'attendre de la part des machines à laver, et quelle est la probabilité de leur apparition. Nous savons également que la pointe du réseau se produit le matin, entre 7 h et 8 h 30 avec une probabilité $P_r = 62 : 64 = 0,96875$. Il s'agit là de la charge enregistrée pendant une période d'une heure, dont le début peut légèrement varier selon les jours, mais tombe toujours entre 7 h et 7 h 30. Pour être absolument correct, il faudrait tenir compte de cette possibilité de variation et choisir également pour les machines à laver une période d'une heure. Nous avons cependant renoncé à cette complication, d'autant plus que, pour les machines à laver, une période d'une heure ne donnerait pas, dans le cas présent, de résultats sensiblement différents. Nous choisirons donc, pour nos considérations, la demi-heure médiane, soit celle de 7 h 30 à 8 h, qui est, tout à fait par hasard, également celle de plus forte charge pour les machines à laver.

Si la pointe du réseau survenait à un autre moment de la journée, il faudrait tout simplement partir des données relatives à la demi-heure coïncidant avec la pointe générale.

La probabilité pour la collision de deux événements, dont chacun peut se produire avec une certaine probabilité, est égale au produit de ces deux probabilités.

Les deux probabilités en jeu ici sont, d'une part, celle de la pointe générale qui est de 0,96875 et, d'autre part, celle de l'enclenchement simultané de x machines au maximum. Si l'on part de la charge qui ne sera pratiquement pas dépassée, la probabilité y relative se réduit dans la mesure de la probabilité de la pointe générale. Cela fait $0,96875 \times 0,99906$, soit 0,96784. La charge des machines à laver qui ne sera pratiquement pas dépassée au moment de la pointe sera donc égale à $0,96784 \times 6 \times 5,5 \text{ kW} = 31,9 \text{ kW}$ ou **1,88 kW** par machine raccordée au réseau ou encore 0,342 kW par kW de puissance installée.

6. Facteur de diversité

Nous examinerons encore, pour terminer, ce qui se passera probablement si le nombre de machines raccordées augmente.

La distribution théorique obéit à la loi binomiale; pour nos calculs, nous nous sommes servis jusqu'à présent de la distribution de Poisson. Nous passerons maintenant, pour l'étude de la diversité, à la distribution normale (Gauss-Laplace), encore plus simple à manier du fait qu'elle peut se ramener par une transformation très simple à sa forme standard, et ceci bien que les résultats obtenus ne soient pas si précis, tout au moins lorsque l'échantillon en cause est de faible étendue.

Nous assimilons maintenant notre distribution observée pour l'intervalle compris entre 7 h 30 et 8 h à une distribution normale de même écart-type s et de même moyenne \bar{x} . On a donc $N = 17$ et $\bar{x} = pN = 1,5804$ d'où $p = 1,5804 : 17 = 0,09296$. L'écart-type s s'obtient à partir de la formule $s = \sqrt{Np(1-p)}$; dans notre cas $s = \sqrt{17 \times 0,09296 \times 0,907035} = 1,1984$. Le passage de la distribution observée à la distribution standard se fait en posant:

$$u = \frac{x - \bar{x}}{s}$$

Dans les tables on trouve, pour une probabilité admise de 0,999 pour le non-dépassement, une valeur de u égale à 3,09. En admettant en outre que la distribution est normale pour tous les échantillons, quelle que soit leur étendue, et que la probabilité élémentaire p obtenue avec 17 machines soit également valable pour tous les échantillons, on peut facilement calculer la valeur x de la formule ci-dessus en fonction de N . Ce calcul est condensé, pour quelques valeurs-types, dans le tableau VI.

Tableau VI

N	$pN = \bar{x}$	$s = \sqrt{Np(1-p)}$	us	$x = \bar{x} + us$	$x : N$
10	0,9296	0,9183	2,8376	3,7672	0,377
17	1,5804	1,1984	3,6998	5,2802	0,311
100	9,2965	2,9040	8,9733	18,2698	0,183
1 000	92,965	9,1832	28,376	121,341	0,121
10 000	929,65	29,040	89,733	1 019,38	0,102

Le rapport $x : N$ est la charge (exprimée en unités de machines) par abonné possédant une machine, qui ne sera dépassée que dans un cas sur mille. On voit que ce chiffre décroît d'abord très rapidement pour se rapprocher peu à peu d'une valeur asymptotique.

Pour 17 machines, la loi de Poisson donne un résultat légèrement supérieur, soit 0,360. Cela confirme ce que nous avons dit au sujet de la précision obtenue avec la loi normale pour de faibles valeurs de N .

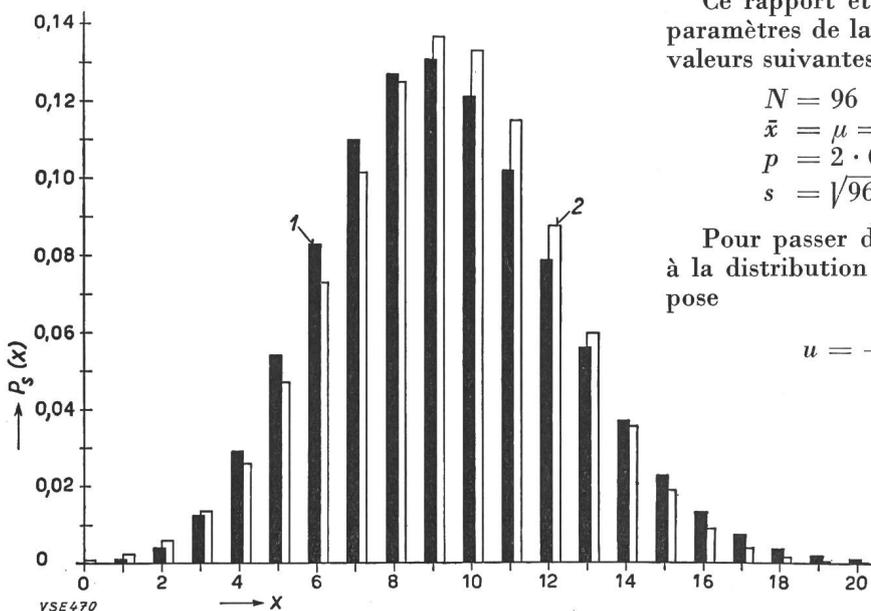
B. Machines à laver dans les maisons locatives

1. Données initiales

Cette seconde étude porte sur un groupe de 96 maisons locatives comportant chacune une machine à laver de 9,5 kW, soit 720 kW au total. Dans ces maisons logent 766 ménages dont 591 se servent régulièrement des machines à laver. La consommation totale de ces machines s'est élevée à 250 114 kWh en 1954. Cela fait une consommation

moyenne de 2605 kWh par machine et par an, et de 35,3 kWh par ménage et par mois. La durée moyenne d'utilisation effective est de 347,4 h, tandis que la durée possible d'utilisation s'élève à 3600 h (300 jours à 12 h). Il en résulte une charge moyenne de 69,4 kW, ou de 9,26 machines, ou encore de 0,723 kW par machine installée.

Les relevés disponibles ne concernant pas l'allure effective de la charge, mais seulement les consommations mensuelles par machine, il n'est pas possible d'analyser la distribution des enclenchements. On peut cependant procéder par analogie au cas précédent, en admettant que les mêmes lois sont valables. Les résultats seront entachés de cette insécurité, mais ils permettront quand même de tirer quelques conclusions.



2. Choix de la distribution

Tel que le problème se pose, il s'agit là également d'une distribution binomiale dont les paramètres sont les suivants:

- nombre maximum d'enclenchements simultanés possibles $N=96$
- nombre moyen d'enclenchements simultanés $\mu=9,26$
- probabilité élémentaire $p = \mu : N = 0,0965$
- écart-type $s = \sqrt{N \cdot p \cdot (1-p)} = 2,8928$

Nous la remplaçons, pour simplifier le calcul, par la distribution de Poisson de même moyenne $\lambda = 9,26$, dont l'allure ressort de la figure 6.

On constate que cette courbe se rapproche déjà singulièrement d'une distribution normale dont la moyenne se situerait aux environs de 9. On ne commettra donc pas de grosse erreur en admettant, pour les réflexions qui vont suivre, que la distribution est normale. Cela simplifiera les calculs.

Un calcul assez long, que nous ne répéterons pas ici, nous a d'ailleurs montré que l'erreur maximum commise est de l'ordre de 5%.

3. Estimation de la pointe probable

Il ne semble pas déplacé de se servir, pour ce calcul, des résultats obtenus au cours de l'étude mentionnée sous A et portant sur 17 machines à laver. On peut admettre que le rapport constaté pour ces 17 machines entre la moyenne générale et la moyenne de la demi-heure la plus chargée est également valable pour les 96 machines de la présente étude. Il s'agit en effet de la même fonction domestique et il est même probable que, vu la durée restreinte dont chaque ménage dispose pour sa lessive, la concentration sur les premières heures de la journée sera encore plus forte que pour les machines familiales. Toutefois, ne connaissant pas le rapport vrai, il nous semble prudent de nous en tenir au chiffre connu.

Ce rapport étant égal à 2, on obtient, pour les paramètres de la distribution normale en cause, les valeurs suivantes:

$$N = 96$$

$$\bar{x} = \mu = 2 \cdot 9,2635 = 18,527 = 18,53$$

$$p = 2 \cdot 0,0965 = 0,193$$

$$s = \sqrt{96 \cdot 0,193 \cdot 0,807} = 3,85$$

Pour passer de cette distribution normale $\varphi(x)$ à la distribution standard correspondante $\varphi(u)$ on pose

$$u = \frac{x - \bar{x}}{s} \text{ ou } x = u \cdot s + \bar{x}$$

Fig. 6
 Courbes des fréquences théoriques $P_s(x)$ pour l'enclenchement simultané de x machines à laver de maisons locatives
 1 distribution de Poisson $\lambda = 9,26$
 2 distribution normale $\bar{x} = 9,26$
 $s = 2,8928$

De ces tables, on tire que, pour une probabilité $P_c(u) = 0,999$ de non-dépassement de la valeur u , cette valeur de u est égale à 3,09. En introduisant cette valeur dans la formule ci-dessus on obtient

$$x = 3,09 \cdot 3,89 + 18,53 = 30,42$$

Ceci veut dire que, dans un cas sur mille seulement, la charge de 30,42 ou, en chiffre rond, de 31 machines sera dépassée. En d'autres termes, la pointe probable sera de 31 machines.

La répétition de ce calcul pour différents nombres de machines installées N , tout en admettant que la probabilité élémentaire p reste constante, mène aux chiffres du tableau VII.

Tableau VII

N	$p \cdot N = \bar{x}$	$s = \sqrt{Np(1-p)}$	us	$x = \bar{x} + us$	$x : N$
10	1,93	1,25	3,86	5,79	0,579
96	18,53	3,85	11,89	30,42	0,317
100	19,3	3,94	12,18	31,5	0,315
1 000	193	12,48	38,58	231,6	0,232
10 000	1930	39,40	121,8	2052	0,205

Le rapport $x : N$ figurant à la dernière colonne n'est autre que la part de chaque machine installée à la pointe probable. On voit que, dans le présent

cas également, cette part diminue lorsque le nombre de machines installées augmente.

C. Conclusions

Si l'on compare les résultats des deux études, on constate tout d'abord, comme il fallait s'y attendre, que l'utilisation est sensiblement plus forte dans les maisons locatives. En effet, si pour celles-ci la charge moyenne atteint environ 10 % de la puissance installée, elle ne dépasse pas 5 % pour les machines à laver de maisons familiales. La consommation moyenne par ménage et par mois s'élève à 35,3 kWh dans les maisons locatives, contre 80 kWh dans les maisons familiales. Par contre, la consommation mensuelle moyenne par machine est plus forte dans les maisons locatives: 217 kWh.

La responsabilité à la pointe causée par les machines à laver est de l'ordre de 12 % pour les maisons familiales et de 23 % pour les maisons locatives, lorsque 1000 machines de chaque sorte sont installées dans un réseau.

Cette responsabilité à la pointe n'est identique à celle du réseau que si la pointe des machines à laver coïncide avec la pointe effective du réseau. Si ce n'est pas le cas, on peut procéder par exemple comme il est indiqué sous A et répéter les calculs à partir de la charge moyenne obtenue pour la demi-heure coïncidant avec la pointe du réseau.

Il ne nous appartient pas de tirer ici d'autres conclusions quant aux mesures à prendre par l'exploitant au vu des résultats obtenus. Ce que nous avons voulu montrer, c'est l'application pratique des méthodes statistiques modernes aux problèmes de l'exploitation. Il est clair que nombre de ces problèmes peuvent être résolus de manière analogue: dimensionnement des transformateurs, des feeders, problèmes de tarification et autres.

Adresse des auteurs:

W. Pfaehler, ing. él. dipl. EPF, directeur du Service de l'électricité de la ville de Winterthur, Winterthur.

Ch. Morel, ing. él. dipl. EPF, ingénieur au Secrétariat de l'Union des Centrales Suisses d'électricité, Seefeldstr. 301, Zurich 8.

L'énergie nucléaire dans le bilan énergétique européen futur

621.311.25 : 621.039.4(4)

Le Comité de l'énergie électrique de la Commission Economique pour l'Europe (CEE) a décidé d'examiner au cours de sa prochaine session si une action lui incombait, sur le plan européen, dans le domaine de l'énergie nucléaire. Le secrétariat de la CEE a préparé dans ce but un rapport¹⁾ rassemblant d'une part les données présentées à la Conférence internationale sur l'utilisation de l'énergie

atomique à des fins pacifiques (Conférence de Genève) par les divers pays sur leurs ressources et leurs besoins en énergie, d'autre part les renseignements fournis par cette Conférence sur le prix des réacteurs et ceux de l'énergie produite. De ces données et renseignements, le secrétariat de la CEE essaye de tirer des conclusions relatives à la place

¹⁾ Document E/ECE/EP/174

Consommation apparente brute des sources commerciales et non commerciales d'énergie en 1952

Tableau I

Pays	Combustibles solides	Combustibles liquides	Gaz naturel	Energie hydro-électrique ¹⁾	Total sources commerciales	Sources non commerciales	Total toutes sources	Par habitant
	10 ⁹ kWh	10 ⁹ kWh		10 ⁹ kWh				
Turquie	40,0	9,0	—	0,1	49,1	37,5	86,6	3,9
Grèce	3,0	13,8	—	?	16,8	13,2	30,1	3,9
Portugal	7,2	9,0	—	1,2	17,4	16,0	33,5	3,9
Bulgarie	?	?	?	?	?	?	30,0 ²⁾	4,0
Yougoslavie	40,1	4,4	0,1	1,4	46,1	26,0	72,1	4,3
Roumanie	?	?	?	?	?	?	80,0 ²⁾	5,0
Italie	84,3	67,8	15,2	28,9	196,2	61,1	257,3	5,5
Espagne	107,0	16,6	—	7,8	131,4	37,7	169,0	6,1
Hongrie	?	?	?	?	?	?	110,0 ²⁾	11,0
Suisse	21,8	14,4	—	11,9	48,2	5,6	53,8	11,1
Autriche	59,1	9,9	2,1 ³⁾	5,4	76,5	11,3	87,8	12,7
Irlande	15,5	8,0	—	0,5	24,0	17,1	41,1	13,9
Pays-Bas	135,1	35,1	0,2	0,2	170,6	4,4	175,0	16,9
Danemark	49,9	19,8	—	0,2	70,0	8,3	78,2	17,9
Pologne	?	?	?	?	?	?	450,0 ²⁾	18,0
Finlande	20,6	7,3	—	4,1	32,0	44,4	76,4	18,7
France et Sarre	621,6	122,4	2,9	22,5	769,4	48,2	817,6	18,8
Norvège	14,5	19,9	—	18,7	53,1	11,2	64,3	19,3
Allemagne orientale	?	?	?	?	?	?	420,0 ²⁾	23,0
Suède	60,8	57,6	—	20,6	138,9	31,4	170,3	23,9
Allemagne occidentale	1109,3	53,6	2,1	11,0	1175,9	51,2	1227,1	25,3
Tchécoslovaquie	?	?	?	?	?	?	370,0 ²⁾	29,0
Belgique-Luxembourg	242,0	30,2	—	0,2	272,3	1,8	274,1	30,4
Royaume-Uni	1669,7	179,5	—	1,7	1850,9	5,7	1856,5	36,6
Total ²⁾	4301,5	678,3	22,6	136,4	5138,8	432,1	5570,9	16,8

¹⁾ y compris les importations nettes d'énergie électrique.

²⁾ Bulgarie, Tchécoslovaquie, Allemagne orientale, Hongrie, Pologne et Roumanie exclues.

³⁾ estimations du secrétariat de la CEE.

que tiendra l'énergie nucléaire dans le *bilan énergétique européen futur*.

Bilan des besoins et des ressources en énergie

Le tableau I donne la consommation brute d'énergie des différents pays européens pour l'année 1952. Cette consommation a été répartie selon les sources commerciales (combustibles solides et liquides, gaz naturel, énergie hydro-électrique) et non commerciales (bois de chauffage, déchets de scierie, autres combustibles végétaux). Pour les combustibles, les chiffres contenus dans le tableau sont ceux de l'équivalent électricité du pouvoir calorifique total.

Il est très difficile d'estimer les *besoins énergétiques futurs*. Quatre documents traitant de cette question sur le plan *mondial* ont été présentés à la Conférence de Genève; les taux annuels moyens d'augmentation qu'ils prévoient oscillent entre 2 et 3,5 %. Les taux estimés par les divers pays pour l'accroissement annuel moyen de leur consommation énergétique sont très divers. Ces estimations dépendent des prévisions concernant l'accroissement de la population, l'évolution de l'activité économique et celle du rendement de la transformation de l'énergie brute en énergie utile; elles sont donc sujettes à un grand nombre d'aléas.

Le tableau II donne pour l'ensemble des pays européens les estimations actuelles de leurs *res-*

sources énergétiques conventionnelles. Elles ont été exprimées en kWh, afin de faciliter une comparaison avec les besoins. Pour tenir compte de la différence entre les ressources minérales épuisables et les ressources hydrauliques, on a multiplié ces dernières par 1000 avant de les inclure dans le total; ce calcul a été fait afin de permettre une estimation des ressources en énergie par habitant et de souligner leur inégale densité.

Au sujet des *combustibles solides*, il faut noter que les quantités de charbon que l'on peut extraire chaque année sont finalement limitées. En effet, le progrès qui s'accomplit dans les méthodes extractives est le plus souvent compensé par le double fait que les couches deviennent de plus en plus profondes et que la main-d'œuvre disponible pour les mines a tendance à se raréfier; parallèlement, le prix du charbon tend à croître.

L'incertitude qui règne sur les réserves mondiales de *pétrole* est considérable; l'estimation des réserves probables est d'environ cinq fois celle des réserves prouvées. En Europe, les sondages entrepris récemment dans un grand nombre de pays ont fait apparaître des ressources nouvelles importantes. Il en est de même pour le gaz naturel.

L'évaluation précise des *ressources hydrauliques* est malaisée. Seules en effet peuvent être déterminées avec une certaine exactitude leurs limites supérieures théoriques; mais c'est la connaissance des

Réserves de charbon, lignite, pétrole, gaz naturel et énergie hydraulique

Tableau II

Pays	Total combustibles solides charbon et lignite 10 ⁹ kWh	Réserves prouvées de pétrole 10 ⁹ kWh	Réserves de gaz naturel dans les gisements en exploitation 10 ⁹ kWh	Energie hydroélectrique (potentiel économique annuel) 10 ⁹ kWh	Energie totale ¹⁾ 10 ⁹ kWh	Réserves totales d'énergie par habitant (popul. au 1 ^{er} juillet 1953) 10 ⁹ kWh
Danemark	125	—	—	—	125	28
Hongrie	4 160	62	39	2	6 261	652
Grèce	2 500	?	—	5	7 500	962
Italie	6 768	8	742	55	62 518	1 300
Bulgarie	4 620	?	?	6	10 620	1 416
Portugal	307	?	?	13	13 307	1 547
Roumanie	7 481	644	2 608	27	37 733	2 287
Albanie	?	36	?	3	3 036	2 530
Irlande	7 120 ³⁾	—	—	1	8 120	2 800
Pays-Bas	32 020	173	?	—	32 193	3 066
Espagne	67 750	?	?	32	99 750	3 500
France	97 050	60	64	60	158 674	3 699
Turquie	12 695	44	?	90	102 739	4 566
Finlande	2 400 ³⁾	—	—	17 ⁴⁾	19 400	4 732
Belgique-Luxembourg	47 904	—	—	1	48 904	5 374
Suisse	—	—	—	30 ⁴⁾	30 000	6 122
Autriche	6 019	354	?	40	46 373	6 721
Allemagne orientale	124 300	?	?	2	126 300	6 902
Yougoslavie	53 130 ⁴⁾	90 ⁴⁾	29 ⁴⁾	67	120 249	7 073
Tchécoslovaquie	79 250	12	0,3	12	91 262	7 420
Suède	2 400 ³⁾	—	—	80	104 720	14 544
Royaume-Uni	1 369 200	6	—	9	1 379 022	27 093
Allemagne occidentale	1 949 500	593	?	16	1 966 093	38 400
Pologne	1 112 325	32	?	6	1 118 357	42 202
Norvège	64 000 ²⁾	—	—	100	164 000	49 697
Sarre	64 000	?	?	—	64 000	64 000
URSS	10 447 732	16 284	10 261	464	11 045 677	53 358

¹⁾ y compris l'énergie annuelle hydraulique en 10⁹ kWh × 1.000 et une marge pour tenir compte des schistes bitumineux en France, Suède, Royaume-Uni et URSS.

²⁾ réserves du Spitzberg.

³⁾ équivalent électricité estimé des gisements de tourbe exploitables.

⁴⁾ estimations du secrétariat de la CEE.

ressources qu'il est techniquement et surtout économiquement possible d'exploiter qui s'avère la plus délicate. D'après une précédente étude de la CEE, les potentiels techniques et économiques représentent respectivement environ les 30 et 20 % du potentiel théorique. Il s'agit là cependant uniquement d'un ordre de grandeur, la détermination du potentiel économique dépendant, selon les pays, du nombre d'avant-projets qui ont été étudiés, du progrès de la technique, du degré d'équipement déjà réalisé, des besoins de la consommation et enfin de la présence d'autres sources d'énergie concurrentes. L'aménagement annuel de ce potentiel hydraulique est également limité, principalement par l'importance des capitaux et la grande durée des travaux que nécessite la construction de toute centrale hydro-électrique.

Les ressources et les besoins énergétiques sont non seulement *répartis inégalement à la surface du globe, mais il n'existe que peu de corrélation entre leur localisation*; pour l'Europe, ce manque de corrélation apparaît dans la comparaison des tableaux I et II. Il semblerait a priori que le *transport* de l'énergie ainsi qu'une certaine *substitution* d'une forme d'énergie à une autre pourraient atténuer ces différences et conduire à un meilleur équilibre. Or l'importance de ces deux facteurs est relativement faible.

Si l'on considère, par exemple, les mouvements de *charbon* entre les pays européens (à l'exclusion de l'URSS), on constate que le total des importations ne représentait en 1952 que 12 % de la production européenne. Le transport du *pétrole* est relativement plus important puisque l'Europe dépend de l'extérieur pour son alimentation; cependant, la consommation de pétrole n'intervenait en 1952 que pour 13 % dans la consommation de l'ensemble des sources commerciales d'énergie. Les mouvements d'*énergie électrique* sont également très faibles: le pourcentage en Europe de l'énergie exportée hors des pays d'origine a varié de 1,3 % à 1,6 % entre 1937 et 1954. Quelles sont les raisons de cet état de choses? On peut citer tout d'abord les contingences dues au transport lui-même: difficultés techniques pour l'énergie électrique par exemple, et coût élevé de façon tout à fait générale. Pour l'*énergie hydro-électrique*, le coût du transport de 150 MW sur 400 km, par exemple, est sensiblement égal à la moitié de celui nécessité par la construction d'une centrale thermique de même puissance. Pour le *charbon*, le transport intervient en moyenne pour 12 % dans les prix de vente au consommateur. Enfin, la part des frais de transport par mer représente environ 25 % du prix du *pétrole raffiné* — compté au départ de la raffinerie — extrait du pétrole brut du Moyen-Orient. D'autres raisons ont trait à l'utilisation de l'énergie. Alors que la production du charbon, du gaz naturel et du pétrole est sensiblement régulière, leur uti-

lisation ne l'est pas dans la même mesure et dépend partiellement des saisons; or le *stockage* de ces produits, qui d'ailleurs entraîne des frais supplémentaires, est le plus souvent difficile. Quant à l'énergie hydro-électrique, elle n'est stockable que sous forme d'eau accumulée dans les réservoirs; or, en Europe, en 1953, la capacité de stockage des réservoirs atteignait 10 % environ de la production hydro-électrique, alors qu'en décembre de la même année le rapport de la puissance de pointe à la puissance de nuit était de 2. Les mouvements d'énergie sont enfin dans une certains mesure gênés par les *frontières politiques*. Il est évident que l'introduction de l'énergie nucléaire modifiera considérablement ces données, les frais de transport du combustible étant dans ce cas négligeables et les centrales pouvant être aisément situées près des centres de consommation, indépendamment de la localisation des ressources naturelles.

On constate d'autre part que plusieurs tendances naturelles s'opposent à la recherche d'un équilibre par substitution d'une forme d'énergie à une autre. C'est ainsi que, au fur et à mesure que les pays s'industrialisent, on assiste à une substitution des sources commerciales aux sources non commerciales; de même, la consommation de charbon tend à rester stationnaire, alors que celle des produits pétroliers et des gaz naturels se développent considérablement, et que, pour l'énergie électrique, l'augmentation est particulièrement rapide par rapport à celle de la consommation totale d'énergie.

On a essayé d'établir un *bilan énergétique pour l'avenir*, notamment pour l'énergie électrique; en effet, une des principales utilisations de l'énergie nucléaire sera la production d'énergie électrique. Le tableau III donne le degré d'exploitation du potentiel hydro-électrique de l'Europe au 1^{er} janvier 1955. Si l'on considère tout d'abord *les pays dont les ressources hydrauliques constituent l'essentiel de leurs ressources énergétiques*, l'on constate que certains d'entre eux, tels que l'Espagne, la Finlande, l'Italie, la Suède et la Suisse, auront vraisemblablement équipé la totalité de leur potentiel dans une période de vingt ans, si l'on se fonde sur leurs prévisions concernant le développement de leur consommation. Seuls l'Autriche, la Norvège, le Portugal, la Roumanie, la Turquie et la Yougoslavie disposeraient encore d'un certain potentiel hydraulique après cette période.

D'autres pays disposent non seulement d'énergie hydraulique, mais de ressources minérales. Le potentiel hydraulique de la France sera, lui aussi, équipé dans la période de vingt ans qui va s'écouler; ce pays sera donc amené à utiliser de plus en plus ses ressources minérales, dont la production annuelle ne suffit déjà plus à assurer ses besoins. Celles de la Bulgarie, de la Grèce et de la Hongrie ne seront vraisemblablement pas épuisées durant cette période de vingt ans, mais la faible consom-

Degré d'exploitation du potentiel hydro-électrique de l'Europe au 1^{er} janvier 1955

Tableau III

Pays	Potentiel économique annuel restant à exploiter 10 ⁶ kWh	Production hydro-électrique moyenne en 1954		Périodes durant lesquelles les ressources hydrauliques pourraient faire face à l'accroissement de la consommation ¹⁾	
		en % des ressources hydro-électriques totales %	en % de la production d'énergie électrique totale en 1954 %	Nombre d'années	Année où le potentiel sera aménagé
Pays-Bas	—	—	—	—	—
Sarre	—	80	1	—	—
Irlande	300	71	51	5	1959
Danemark	20	60	1	7	1961
Allemagne occidentale	6 150	62	15	7	1961
<i>Italie</i>	24 200	56	87	9	1963
France	35 590	40	53	13	1967
<i>Finlande</i>	12 000	31	92	13	1967
<i>Suède</i>	56 400	30	99	19	1973
Allemagne orientale	1 480	26 ²⁾	2 ²⁾	19	1973
<i>Suisse</i>	15 200	49	112	20	1974
Espagne	23 650	25 ²⁾	83 ²⁾	20	1974
Royaume-Uni	7 160	24	3	21	1975
Norvège	78 110	22	100	22	1976
<i>Portugal</i>	11 550	11	87	24	1978
<i>Belgique</i>	395	28	1	25	1979
Pologne	4 600	16 ²⁾	6 ²⁾	26	1980
Tchécoslovaquie	10 700	14 ²⁾	13 ²⁾	28	1982
Bulgarie	5 150	14 ²⁾	47 ²⁾	28	1982
<i>Autriche</i>	33 000	18	73	33	1987
Luxembourg	60	6	—	40	1994
<i>Grèce</i>	5 070	1	3	46	2000
Hongrie	1 450	3 ²⁾	1 ²⁾	49	2003
<i>Yougoslavie</i>	64 690	3	53	54	2008
Roumanie	26 670	1 ²⁾	9 ²⁾	63	2017
Turquie	89 900	—	6	101	2055
Total	513 495	23	38	21	1975
URSS	439 ²⁾	5 ²⁾	17 ²⁾	42	1996

¹⁾ On a tenu compte des taux d'accroissement indiqués par certains pays (imprimés en italique). Pour les autres on a supposé que la production hydro-électrique doublerait tous les dix ans.

²⁾ Estimations du secrétariat de la CEE.

mation actuelle de ces pays risque de fausser les hypothèses sur lesquelles les calculs ont été établis.

En ce qui concerne enfin les pays qui possèdent une prédominance des ressources minérales, si ces ressources sont théoriquement capables d'assurer une augmentation croissante de la consommation d'énergie pendant de longues années, la limite de leur extraction devrait les rendre rapidement tributaires d'une autre source d'énergie. Ce besoin se fait sentir d'une façon immédiate dans certains pays, comme la Grande-Bretagne; les autres pays — Belgique et Tchécoslovaquie — éprouveront les mêmes difficultés à court terme, c'est-à-dire dans dix à quinze ans.

Influence des prix

Le prix de revient de l'énergie hydro-électrique a tendance à croître au fur et à mesure que l'aménagement du potentiel hydraulique se réalise. Toutefois, la question est assez complexe, vu notamment que la qualité de l'énergie produite diffère selon qu'il s'agit de centrales au fil de l'eau ou de centrales à réservoir. D'une manière générale cependant, on peut constater que l'augmentation est peu sensible pendant une assez longue période, car elle est compensée par l'influence du progrès technique. Par ailleurs, la concentration croissante des équipements tend à s'opposer à la décroissance de leur rendement. A partir d'un certain degré

d'aménagement cependant, qui est voisin de la limite du potentiel considéré comme économique, les prix augmentent rapidement.

En ce qui concerne les centrales thermiques, la consommation spécifique de charbon par kWh produit diminue constamment, par suite de l'utilisation de températures et de pressions toujours plus élevées et de l'emploi d'unités plus puissantes. Par contre, les prix du charbon ont tendance à augmenter; de plus, le pourcentage des charbons de déchet étant finalement limité, les centrales thermiques seront obligées d'utiliser de plus en plus des charbons de meilleure qualité.

L'interconnexion des réseaux et la concentration de la production, qui a entraîné une diminution des frais d'exploitation, tendent aussi à abaisser le prix de revient, mais leur développement est limité. Le progrès ne semble donc pas pouvoir compenser les éléments qui provoquent une augmentation des prix de l'énergie électrique produite par les sources conventionnelles, augmentation qui apparaît principalement dans les pays industrialisés.

En dehors de la nécessité relative dans laquelle se trouvent les différents pays d'importer de l'énergie pour combler le déficit de leur balance énergétique, c'est le point d'intersection des courbes de prix de revient du kWh produit par leurs ressources conventionnelles et de celui produit par les cen-

Pays	Référence ¹⁾	Type de réacteur	Puissance électrique MW	Coût unitaire de construction par kW \$	Charges du capital %	Facteur de charge %	Prix de revient du kWh				Dédaction possible par kWh pour la vente des produits fissiles mills	% du coût de combustible dans le prix de revient %	Rapport centrale nucléaire à centrale thermique		
							Charges fixes mills	Frais d'exploitation mills	Coût du combustible mills	Total mills			Coût unitaire de construction ²⁾	Prix de revient	
Grande-Bretagne	P/390	Refroidissement par CO ₂	150	350 ²⁾	6,6	80	3,7	0,7	3,95	8,35	2...4	47,0	2,0	1,2	
		Modérateur: graphite		450 ²⁾			80	4,25	0,7	3,95		8,90	44,5	2,5	1,3
Canada	P/11	Refroidissement par D ₂ O Modérateur: D ₂ O	200	200...500	10,5	80	3...7,5	0,5...1,4	0,5...1,5	4...10,4	—	12,5...14,5	1,3...3,3 ³⁾	1,4	
Etats-Unis	P/493	Refroidissement par sodium Modérateur: graphite	75	300	15,0	80	6,5	2,0	2...3,2	10,5...11,7	—	19...27	1,5 ⁶⁾	1,5...1,75	
			100	265 ⁷⁾			80	5,5	1,5	1,5...2,5		8,5...9,5	17,5...26	1,3	1,2...1,4
			125	200 ⁷⁾			80	4,0	1,0	1...2		6...7	16,7...29	1,0	0,9...1,0
Etats-Unis	P/494	Refroidissement par sodium Modérateur: graphite Combustible: métallique (solution d'uranium dans du bismuth)	210	238	16,0	80	5,7	0,7	1,4	7,8	—	18	1,5 ⁸⁾	1,2	
Etats-Unis	P/501	«fast-breeder», cas I ⁹⁾ cas II	20	300	10	80	4,28 4,28	1,0 1,0	4,53 4,89	9,81 10,17	1,04 2,08	46 47	1,9	1,0...1,2 ¹⁰⁾	
Etats-Unis	P/495	«boiling water» Refroidissement et modérateur	D ₂ O D ₂ O D ₂ O H ₂ O H ₂ O	248,0	250	12	80	5,0	0,9	1,8	7,7	—	23,5	1,8	1,2
				62,0	450		80	8,8	2,3	2,8...3,4	13,9...14,6	—	20...23	2,3	2,0...2,1
				62,0	450		80	8,6...8,7	2,3	3,5...4,3	14,4...15,3	—	24...28	2,3	2,1...2,2
				62,5	400		80	9,9...11,0	2,3	3,2...4,4	15,4...17,7	—	21...25	2,0	2,2...2,5
				61,0	425		80	8,8...9,5	2,3	3,6...5	14,7...16,8	—	25...30	2,2	2,1...2,4
Etats-Unis	P/492	Refroidissement H ₂ O Modérateur: graphite	223,0	290	—	?	—	—	—	7,0	—	—	2,1	< 1,1	
Etats-Unis	P/497	«boiling water»	4,5	890	15	80	19,1	8,5	5,1...6,6	32,7...34,2	—	15,6...19,3	4	2,8...3,0 ¹¹⁾	
			9,0	533			80	11,4	4,2	4,2...6,8	20,4...21,8	—	21...31	2,5	1,8...2,0 ¹¹⁾

¹⁾ symboles des rapports présentés à la Conférence internationale sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques.

²⁾ sans le coût du chargement initial d'uranium.

³⁾ avec le coût du chargement initial d'uranium.

⁴⁾ le coût unitaire de construction d'une centrale thermique correspondante a été compté pour 175 \$ par kW.

⁵⁾ le coût unitaire de construction d'une centrale thermique correspondante a été compté pour 120 à 180 \$ par kW.

⁶⁾ le coût unitaire de construction d'une centrale thermique correspondante a été compté pour 200 \$ par kW.

⁷⁾ utilisation du thorium comme combustible.

⁸⁾ le coût unitaire de construction d'une centrale thermique correspondante a été compté pour 140 \$ par kW.

⁹⁾ le cas I correspond au prix du plutonium à 15 \$ par g; pour le cas II le prix du plutonium correspond à 30 \$ par g.

¹⁰⁾ le prix de revient moyen pour une centrale thermique correspondante a été compté pour 10 mills par kWh.

¹¹⁾ le coût unitaire de construction d'une centrale thermique correspondante a été compté pour 210 à 230 \$ par kW et le prix de revient moyen pour 10 à 12 mills par kWh.

trales nucléaires qui constitue le second élément déterminant de l'«intégration» de ces dernières.

Si l'on excepte la centrale de 5000 kW qui a été construite en URSS, aucune centrale nucléaire ne produit actuellement de l'énergie électrique sur une base commerciale. Les éléments dont on dispose en ce qui concerne les prix ne constituent donc que des évaluations fondées sur les centrales en construction, et il convient de les considérer avec prudence. La durée de vie des éléments qui composent le réacteur est en particulier mal définie. En second lieu, la vente du plutonium produit dans la réaction est susceptible de diminuer plus ou moins le prix de revient final du kWh; or ce prix de vente dépend en partie de considérations stratégiques indépendantes des phénomènes techniques et économiques. Le tableau IV donne quelques caractéristiques des éléments qui composent les prix de revient de centrales en construction ou en projet en Grande-Bretagne, au Canada et aux Etats-Unis. On voit immédiatement que les centrales nucléaires nécessitent des *investissements importants*, dus principalement au coût élevé des réacteurs. On peut en déduire que le prix de revient aura tendance à diminuer assez rapidement, puisque les progrès de la technique porteront principalement sur la réduction du coût de construction des réacteurs. D'autre part, la rentabilité des centrales nucléaires sera en principe fonction de leur utilisation; la plupart des pays prévoient un facteur de charge de 80 %. Le prix de revient du kWh produit, enfin, sera d'autant plus bas que la puissance installée sera plus élevée.

La diversité des types de réacteurs, celle des puissances installées prévues pour les centrales, celle des coûts de la charge initiale de combustible et celle des charges de capital font qu'il est très difficile de comparer entre eux les prix de revient auxquels on peut arriver actuellement; ceux-ci en effet s'étendent sur une *gamme allant de 4 à 15 mills*, les prix des petites centrales étant évidemment beaucoup plus élevés. Il ne semble donc pas, bien que le moment en soit peut-être proche, que

l'on puisse d'ores et déjà affirmer que le prix de l'énergie nucléaire soit compétitif avec celui de l'énergie électrique produite par une centrale thermique classique.

Conclusions

La plupart des pays européens ne disposent pas de ressources naturelles suffisantes pour leur permettre de faire face dans la période de vingt ans à venir à leurs besoins en énergie. Ils seront donc obligés soit de recourir à l'importation, soit de compenser ce déficit en faisant appel à l'énergie nucléaire. Le besoin sera progressif, et il ne présente un caractère d'urgence que dans peu de pays.

Il existe par ailleurs une grande incertitude sur le prix de revient de l'énergie électrique produite par une centrale nucléaire, et il est prématuré d'affirmer qu'elle peut d'ores et déjà concurrencer celle produite par les centrales thermiques.

Il y aurait donc lieu de poursuivre le développement des interconnexions entre les pays européens et de procéder à un examen sérieux des possibilités qui s'offrent d'aménager des sites hydrauliques. S'il s'agit d'énergie au fil de l'eau, les prix seront de toute façon pour longtemps encore inférieurs à celui de l'énergie nucléaire. S'il s'agit d'énergie de pointe, celle-ci sera de plus en plus nécessaire, étant donné que vraisemblablement l'énergie nucléaire assurera la base du diagramme de charge. La perspective de l'intégration de l'énergie nucléaire ne devrait pas, notamment, ralentir l'aménagement des ressources hydrauliques dans les pays qui disposent encore d'un potentiel important et qui pourraient venir en aide à des pays voisins dont le déficit énergétique est proche.

L'énergie nucléaire pose de nombreux autres problèmes d'ordre économique sur le plan européen: utilisation directe sous forme de chaleur, coordination des investissements entre certains pays notamment en vue de la construction d'usines pour la préparation d'isotopes ou la fabrication d'eau lourde, échanges d'expériences. Sa.

Communications des organes de l'UCS

Examen de maîtrise pour installateurs-électriciens

Entre avril et juillet de cette année aura lieu une session d'examen de maîtrise pour installateurs-électriciens. L'endroit et la date exacte seront fixés ultérieurement. Durée des examens: environ 4 jours. Les formules d'inscription peuvent être obtenues au secrétariat de l'USIE, 6, Splugenstrasse, case postale, Zurich 27; elles devront être envoyées dûment remplies, accompagnées des certificats originaux de travail, d'une

biographie du candidat écrite à la main et d'un certificat de bonnes mœurs de date récente, jusqu'au 4 février 1956 au plus tard à l'adresse précitée. Pour les examens d'automne, les inscriptions seront ouvertes au mois de juillet. Pour tous les autres détails, nous renvoyons les intéressés aux dispositions du règlement relatives à l'admission et aux examens. Le règlement des examens de maîtrise, valable depuis le 15 décembre 1950, peut s'obtenir à l'Union Suisse des installateurs-électriciens, 6, Splugenstrasse, à Zurich.

Commission des examens de maîtrise USIE/UCS

Rédaction des «Pages de l'UCS»: Secrétariat de l'Union des Centrales Suisses d'Electricité, Seefeldstrasse 301, Zurich 8, téléphone (051) 34 12 12; compte de chèques postaux VIII 4355; adresse télégraphique: Electrunion Zurich.

Rédacteur: Ch. Morel, ingénieur.

Des tirés à part de ces pages sont en vente au secrétariat de l'UCS.