

Cette question se pose à tout technicien lors de la conception d'un appareillage ou d'un système électronique.

Les énergies importantes mise en œuvre conduisent à l'utilisation d'appareils de volume non négligeable, et partant de coût élevé. Un choix judicieux s'impose donc qui devra s'appuyer, à partir de conditions d'exploitation parfaitement connues, sur la connaissance approfondie des caractéristiques électrique, mécanique et d'environnement des condensateurs.

Cet article se propose de guider l'utilisateur en lui présentant les divers aspects liés à ce choix.

Les types d'utilisation

Tension continue

Il s'agit généralement de fonctions de filtrage après redressement, de découplage, de liaison entre deux étages amplificateurs, etc...

— A la tension continue, se superpose en général une tension alternative résiduelle ou d'amplitude non négligeable dans le cas de la liaison.

La tension nominale à considérer est la valeur crête que prend la tension.

— Le courant efficace traversant le condensateur doit pouvoir être supporté par le modèle choisi.

Tension alternative sinusoïdale

La valeur du courant efficace est

$$I = UC\omega$$

I ampères ; U volts efficaces,

$\omega = 2\pi F$ avec F en Hertz

Aux basses fréquences, le courant est limité par la tension que peut supporter le condensateur. Aux fréquences élevées, ce sont les problèmes de puissance et de connexions qui limitent la valeur maxi du courant pour un modèle donné.

Stockage d'énergie

On charge le condensateur à U_{ch} . Il emmagasine une quantité d'énergie.

$$W = \frac{CU^2}{2}$$

W en joules

C en farad ou C en microfarad

U en volt ou U en kilovolt

L'énergie emmagasinée est habituellement utilisée sous forme d'un courant de décharge de valeur crête très élevée et de durée brève. Applications : laser, production de champ magnétique intense, formage des métaux, etc...

Dans ces applications, le circuit de décharge de C est pratiquement celui représenté figure 1, avec :

r_c = pertes de C_0 + résistance des connexions

l_c = inductance propre de C_0 + connexions

L_{ut} = inductance de l'utilisation

r_{ut} = résistance de l'utilisation (qui peut être la résistance interne du flash, dans le cas du laser).

Le circuit simplifié est celui de la figure 2, avec :

$$L_0 = L_{ut} + l_c \text{ et } r_0 = r_{ut} + r_c$$

Bref rappel théorique

a) $r_0 = \text{zéro}$

La tension aux bornes de C_0 passe de $+U_{ch}$ à $-U_{ch}$, remonte à $+U_{ch}$ et ainsi de suite, suivant une loi sinusoïdale (fig. 3).

Le courant est en quadrature avant sur la tension.

La période de l'oscillation du courant et de la tension est :

$$T_0 = 2\pi \sqrt{L_0 C_0}$$

T_0 en secondes L_0 en Henry C_0 en Farad

On peut calculer $Z_c = L_0/C_0$, en ohms, c'est l'impédance caractéristique.

Le courant passe par son premier maxi I_0 au temps $t_1 = t_0 + T/4$

L'amplitude maxi de I est

$$I_0 = \frac{U_{ch}}{Z_c}$$

Ce cas théorique, $r_0 = \text{zéro}$ ne peut évidemment se rencontrer en pratique, mais il sert de base au calcul des grandeurs concernant le courant dans les deux autres cas.

b) $r_0 < 2Z_c$

La décharge reste oscillante, mais s'amortit rapidement, suivant une enveloppe d'allure exponentielle (fig. 4).

Tension : partant de U_{ch} , la tension s'inverse avec un coefficient d'inversion < 1 . On l'exprime en pourcentage de rebondissement (en général 10 à 80 %).

Courant : il suit la même loi d'inversion que la tension. Le premier maxi (en général le seul intéressant l'utilisateur) a une valeur inférieure à la valeur $I_0 = U_{ch}/Z_c$. Ce premier maxi a lieu au temps t_1 inférieur à $t_0 + T/4$.

La période d'oscillation est supérieure à $T_0 = 2\pi \sqrt{LC}$. On l'appelle alors « pseudo-période ».

c) $r_0 \geq 2Z_c$

La décharge n'est plus oscillante (fig. 5).

Tension : la tension aux bornes de C_0 passe de U_{ch} à zéro sans s'inverser. La durée de la décharge non oscillante est la plus brève possible, pour un circuit donné, quand $r_0 = 2Z_c$: c'est l'amortissement critique.

Courant : il passe par un seul maxi. L'amplitude de ce maxi, à l'amortissement critique, est $0,368 I_0 = 0,368 U_{ch}/Z_c$

Calculs simplifiés.

La connaissance, ou tout au moins une bonne évaluation, des éléments du circuit de décharge est indispensable pour choisir le modèle de condensateur le mieux adapté.

Un calcul approché est suffisant pour déterminer les différentes valeurs à connaître. Pour cela, il est commode d'exprimer les différents paramètres en fonction d'un coefficient :

$$a = \frac{r_c}{2Z_c}$$

$a = 1$ correspondant à l'amortissement critique

$0 < a < 1$ c'est un régime pseudo-oscillant

$a \geq 1$ c'est le régime amorti, non oscillant.

choisir ses condensateurs

Les valeurs de I_1 (premier maxi de courant) et de t_1 (temps après t_0 , au bout duquel se produit ce maxi) seront exprimées en fonction de I_0 et T_0 du régime entretenu (fig. 3).

Outre les valeurs de I_1 et de t_1 , il peut être intéressant de connaître l'ordre de grandeur de courant efficace en fonction de la fréquence de répétition des décharges (F_r) (voir tableau en bas de page).

Commutation forcée (extinction) des thyristors

La tension aux bornes du condensateur et le courant le traversant ont généralement l'une des formes indiquées (fig. 6.7.8.9.).

Les caractéristiques propres à ce type de fonctionnement sont les suivantes :

Tension : les inversions de tension ($t_1 + t_2$) s'opèrent dans un temps approximativement égal au dixième de la période $T = 1/F_r$ (F_r étant la fréquence de répétition, en général comprise entre 150 et 500 Hz).

La contrainte sur le diélectrique est donc de type alternatif pendant les inversions ($t_1 + t_2$) et de type continu pendant le temps restant, soit les 9/10 de la période T .

Il est essentiel de distinguer le mode de fonctionnement bidirectionnel (fig. 6) pour lequel la tension s'inverse en changeant de polarité, de celui unidirectionnel (fig. 7) pour lequel la tension est toujours de même sens.

Le choix de la tension nominale doit être tel que le condensateur puisse tenir la tension continue égale à $U_{\text{crête}}$ (fig. 6) ou à ΔU (fig. 7), ainsi que la tension efficace égale à :

$$\frac{\Delta U}{2\sqrt{2}}$$

Courant : les inversions de tension s'opérant dans des temps t_1 et t_2 très courts, (quelques dizaines à centaines de μ sec.) les valeurs crêtes (I_c) que prend le courant sont d'amplitude élevée (centaines d'ampères).

Les condensateurs à film métallisé sont limités en courant crête admissible.

Les condensateurs à armature rapportée « passent » sans problèmes de tels courants :

$$I_c = \frac{\Delta U C}{0,64 t}$$

I ampères U en volts C en μF t en μs .

$$\text{Si } t_1 \neq t_2 \quad I_{\text{eff}} = 1,57 \Delta U_{\text{KV}} C_{\mu F} \sqrt{\frac{F_r \text{ en Hz}}{t_1 \text{ en } \mu}}$$

$$\text{Si } t_1 \neq t_2 \quad I_{\text{eff}} = 1,11 \Delta U_{\text{KV}} C_{\mu F} \sqrt{\frac{F_r}{t_1} - \frac{F_r}{t_2} \text{ en Hz}}$$

Pour $t_1 = t_2$, on peut en première approximation prendre $t = (t_1 + t_2)/2$ et utiliser (1).

Lorsqu'on fait des mesures en courant sinusoïdal de période $T_s = t_1 + t_2$ et d'intensité efficace I_{eff} telle que calculée précédemment, on obtient pratiquement le même échauffement du condensateur qu'en régime haché.

On peut donc, pour un calcul rapide, si t_2 est peu différent de t_1 , considérer que le condensateur travaille à une fréquence sinusoïdale équivalente

$$F_{\text{éq.}} = \frac{1}{2 t_1} \approx \frac{1}{t_1 + t_2}$$

La puissance réactive est

$$P_r = \frac{I_{\text{eff}}^2}{C \cdot 2 \pi F_{\text{éq.}}}$$

P. en VAR C en farad F en hertz I en ampère

Inversion	0	10 %	20 %	40 %	60 %	70 %	80 %	100 %
$a = \frac{r_c}{2 Z_c}$	a = 1	0,591	0,456	0,28	0,16	0,113	0,071	0
$I_1 = b I_0$	b = 0,368	0,5	0,565	0,685	0,794	0,847	0,893	1
$T = c T_0$	c = /	1,24	1,12	1,04	1,01	1	1	1
$t_1 = d T_0$	d = 0,159	0,186	0,196	0,213	0,227	0,232	0,239	0,25
$I_{\text{eff}} \approx \frac{I_1}{\sqrt{2}} \left(\sqrt{t \cdot F_r \cdot k} \right)$	k = /	/	1,02	1,09	1,25	1,4	1,67	/

Valeur du courant en fonction de la fréquence de répétition des décharges.

$I_1 = 1^{\text{er}}$ maxi de courant se produisant au temps t_1

$t =$ durée de l'alternance $T_0/2$

$F_r =$ fréquence de répétition du train d'onde

On a aussi

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{C U_{\text{ch}}^2 F_r}{2 r_o}}$$

Savoir choisir ses condensateurs

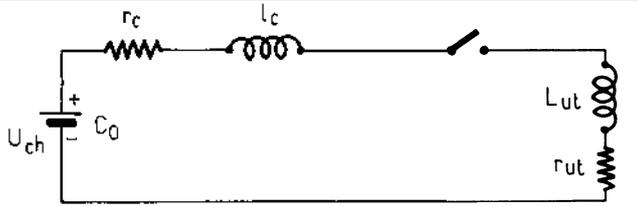


Figure 1. Circuit de décharge d'un condensateur.

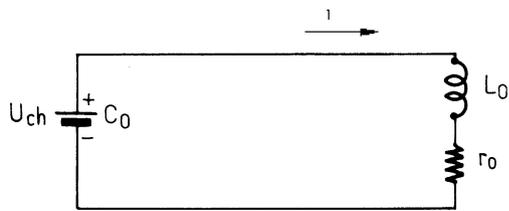


Figure 2. Circuit simplifié.

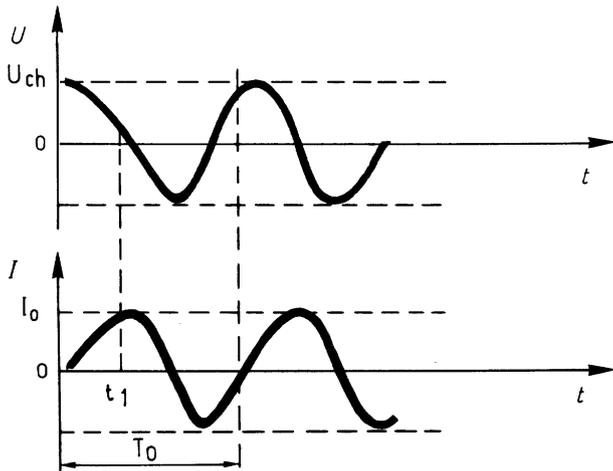


Figure 3. Le courant est en quadrature avec la tension.

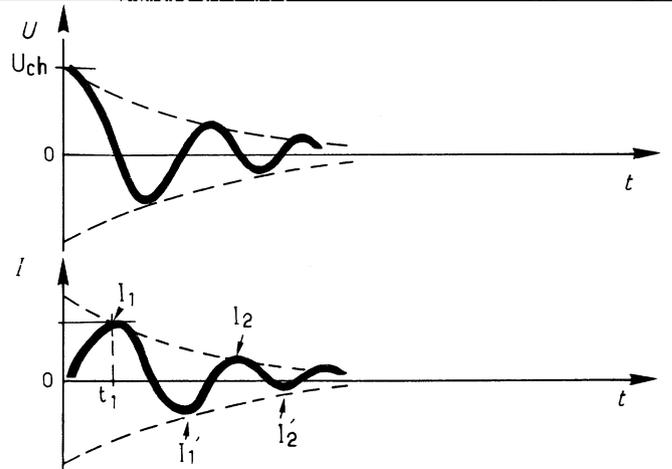
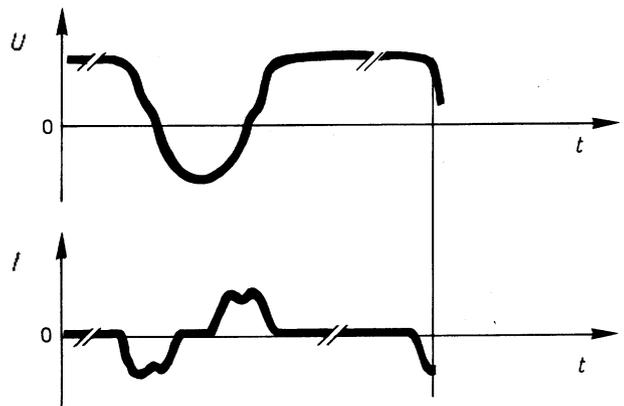
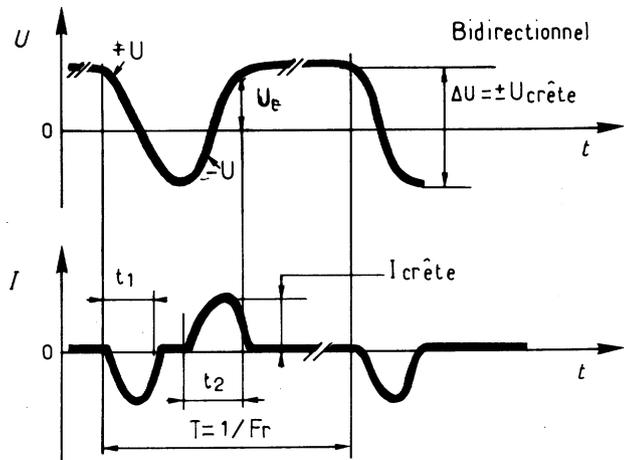


Figure 4. La décharge oscillante s'amortit rapidement.

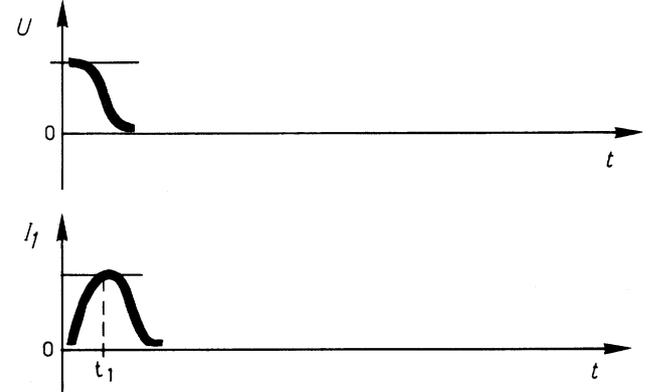
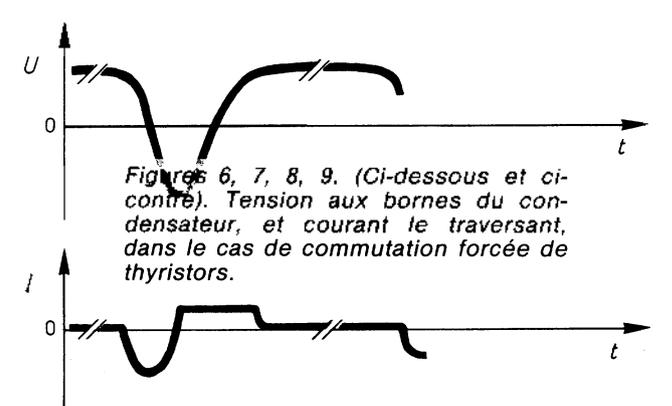
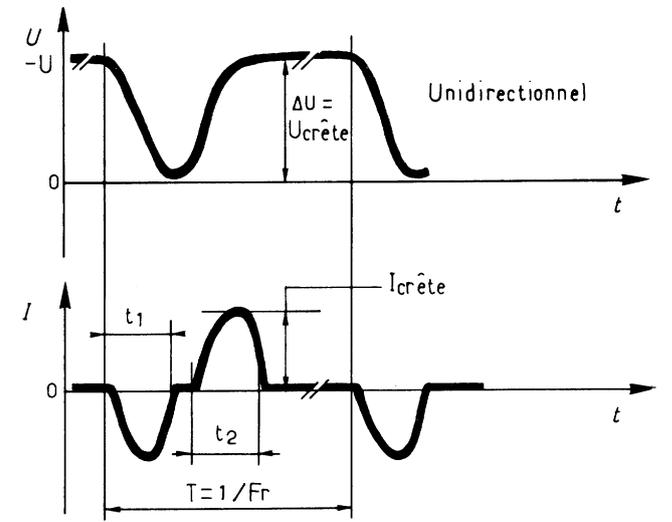


Figure 5. Décharge non oscillante.



Figures 6, 7, 8, 9. (Ci-dessous et ci-contre). Tension aux bornes du condensateur, et courant le traversant, dans le cas de commutation forcée de thyristors.

Savoir choisir ses condensateurs

Paramètres de choix

Toutes les caractéristiques du condensateur doivent satisfaire aux conditions réelles d'exploitation :

Valeurs nominales

Les valeurs nominales de tension (U_R) sont en général valables pour une température ambiante de 50 °C maxi. Elles correspondent à une durée de vie longue (supérieure à 80 000 heures). Pour d'autres températures voir courbes de la figure 10.

Pour des fonctionnements intermittents, ou pour une durée de vie faible (inférieure à 8 000 heures), on peut appliquer :

- jusqu'à $1,6 U_R$ sur tension continue ou tension de charge,
- jusqu'à $1,4 U_R$ sur tension sinusoïdale, ou tension crête-crête sous réserve que la valeur permise de courant efficace du modèle ne soit pas dépassée.

Les valeurs de capacité indiquées pages 71 72 sont des minima maxima. Toute valeur inférieure peut être réalisée. Les conditions de fonctionnement doivent être telles que les tensions, courants et puissances n'excèdent pas les valeurs indiquées pour le modèle.

Contraintes diverses

Outre des contraintes mécaniques et d'environnement, un condensateur sous tension est soumis à trois sortes de contraintes liées au fonctionnement électrique de l'appareil et qu'il convient d'analyser séparément, afin de choisir le modèle le mieux adapté.

Il s'agit :

- de la tension appliquée au diélectrique
- du courant traversant
- de la puissance transitant par le condensateur.

Contrainte « tension »

Un diélectrique soumis à une tension électrique permanente voit sa rigidité diélectrique diminuer progressivement jusqu'au claquage en fin de vie. Les phénomènes dégradants, amenant le vieillissement, sont accentués par la température.

Des conditions de fonctionnement mal contrôlées (surtensions accidentelles, fréquences harmoniques, mauvaises conditions de refroidissement...) peuvent provoquer des défaillances prématurées.

Le processus de dégradation dans le temps du diélectrique est différent suivant qu'il s'agit de tension continue ou variable. C'est pourquoi, lorsque les deux types de tension sont simultanément appliqués, (cas de la commutation), il convient d'analyser séparément les contraintes.

Contrainte « courant »

On doit considérer les valeurs de courant efficace et de courant crête.

- Le courant efficace traversant le condensa-

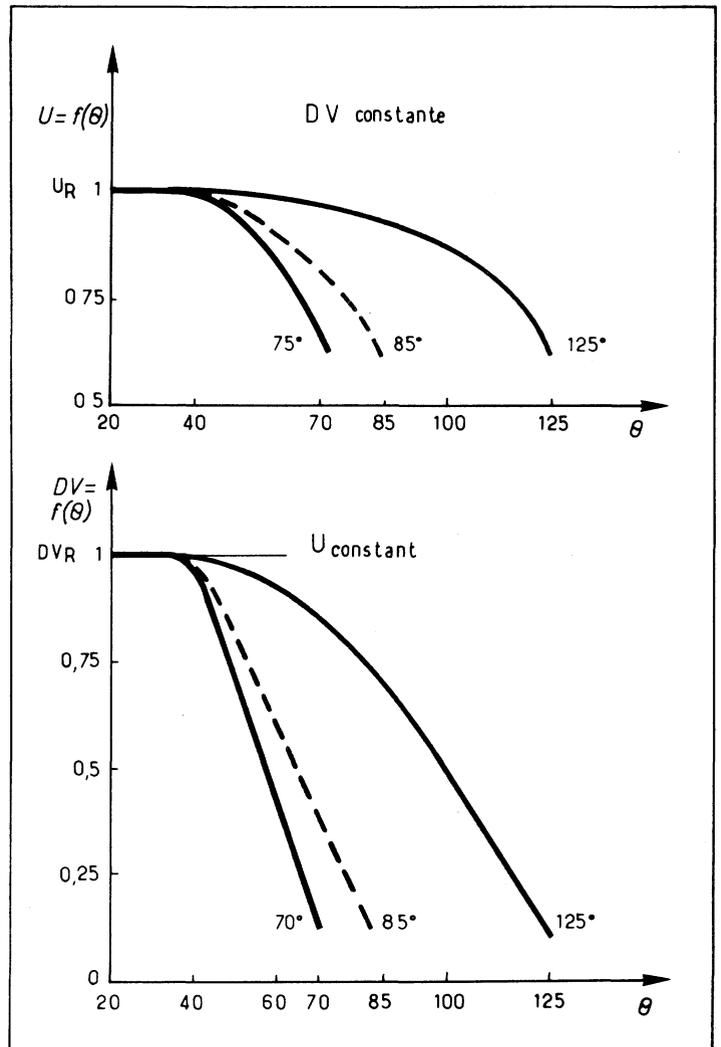


Figure 10. Evolution de la tension d'utilisation en fonction de la température.

teur chauffe les bornes, les connexions, le câblage, les armatures, par effet Joule. Une résistance de 1 milli ohm parcourue par 100 ampères efficaces, cela fait 10 watts à évacuer.

Les contacts aux armatures et les connexions internes des condensateurs sont spécialement conçus pour chaque type d'application.

— Le courant crête, s'il est d'amplitude élevée, soumet les connexions à des forces qui peuvent aller jusqu'à provoquer l'arrachement ou la rupture. Des liaisons internes mal conçues ou non adaptées au passage de tels courants peuvent localement être le siège de surtensions provoquant des claquages. Par leur structure, les condensateurs à film métallisé se prêtent mal au passage de courant crête important. Les modèles à armatures rapportées, peuvent supporter des courants de plusieurs milliers d'ampères crête de façon répétitive et accidentellement plus de 10 000 ampères, sans dommage.

Contrainte « puissance »

Un condensateur parfait, soumis à une tension variable, restituerait intégralement l'énergie emmagasinée. La tension serait en quadrature arrière avec le courant. En pratique, les inévitables pertes par effet Joule dans les connexions (évoquées plus haut) et les pertes par échauffement du diélectrique soumis au champ électrique

Les condensateurs

variable, font qu'une faible partie de l'énergie confiée au condensateur n'est pas restituée, mais doit être évacuée sous forme de chaleur. Si les conditions (extérieures au condensateur) d'évacuation des calories ne sont pas satisfaisantes, la température du boîtier s'élève de façon anormale. Ponctuellement, le diélectrique peut dépasser la température maximale permise et se dégrader très rapidement. Le facteur de pertes d'un condensateur varie avec la fréquence du courant traversant et la température.

Les paramètres à ne pas oublier

Forme du condensateur : cylindrique ou parallélépipédique.

Fixations mécaniques souhaitées.

Boîtier métallique ou isolant.

— **Position de fonctionnement** verticale, horizontale, inclinée, sur chant.

— **Raccordements** sur bornes, tiges filetées, inserts.

— **Nature des vibrations**, chocs et autres contraintes mécaniques.

— **Gamme de température** de service et de stockage.

— **Type de refroidissement** : naturel, ventilation (m/s), bain liquide.

— **Proximité de sources chaudes**.

— **Environnement** : pression absolue, air salin, air humide...

— **Durée de vie espérée**.

Les combinaisons entre ces paramètres sont multiples.

Les technologies utilisées combinent les éléments suivants :

— Film plastique ou mixte, film papier ou tout papier.

— Imprégnants diélectriques liquide, gélifié, solide.

— Electrode métallisée ou en feuille (armature).

— Connexions sur l'électrode : schoopage, languette, soudure.

— Câblage interne adapté au courant et tension.

— Géométrie cylindrique ou aplatie des bobines.

— Structure classique biaxiale ou coaxiale.

Guide de choix

Les tableaux et graphiques complétant cet article offrent un guide de choix à l'utilisateur.

Donnés par type d'application, ils présentent quelques caractéristiques essentielles et permettent de situer rapidement un besoin particulier.

Les zones portées sur les graphiques correspondent à une optimisation des produits proposés par LCC.

Il est évidemment nécessaire de contrôler ensuite si la filière choisie répond à toutes les conditions d'utilisation (dératings éventuels).

Michel Veron
(Thomson-LCC)

Choix d'un type de condensateur en fonction de son utilisation

COMMUTATION

Dielectrique	Capacité	Tension ± V	Température °C
Polypropylène métallisé, non imprégné	0,1 à 2400 µF	300 à 2000	- 55 + 85 °C
Papier-film armature, imprégné huile minérale	0,15 à 1 µF	560 à 1400	- 55 + 85 °C
Papier-film armature, imprégné huile de synthèse	0,5 à 300 µF 60 nF à 400 µF	450 à 5000 650 à 2100	- 55 + 85 °C
Polypropylène armature, imprégné huile de synthèse	0,5 à 300 µF 68 nF à 110 µF	300 à 3200 450 à 2250	- 55 + 85 °C

* Valeurs associées à un dérating.

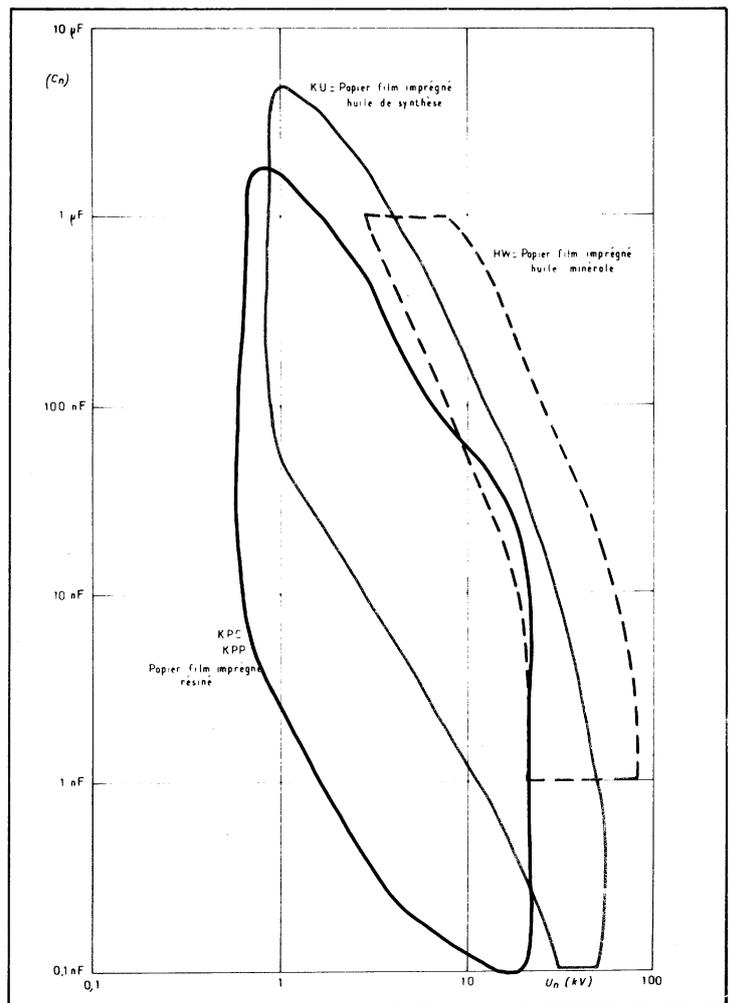
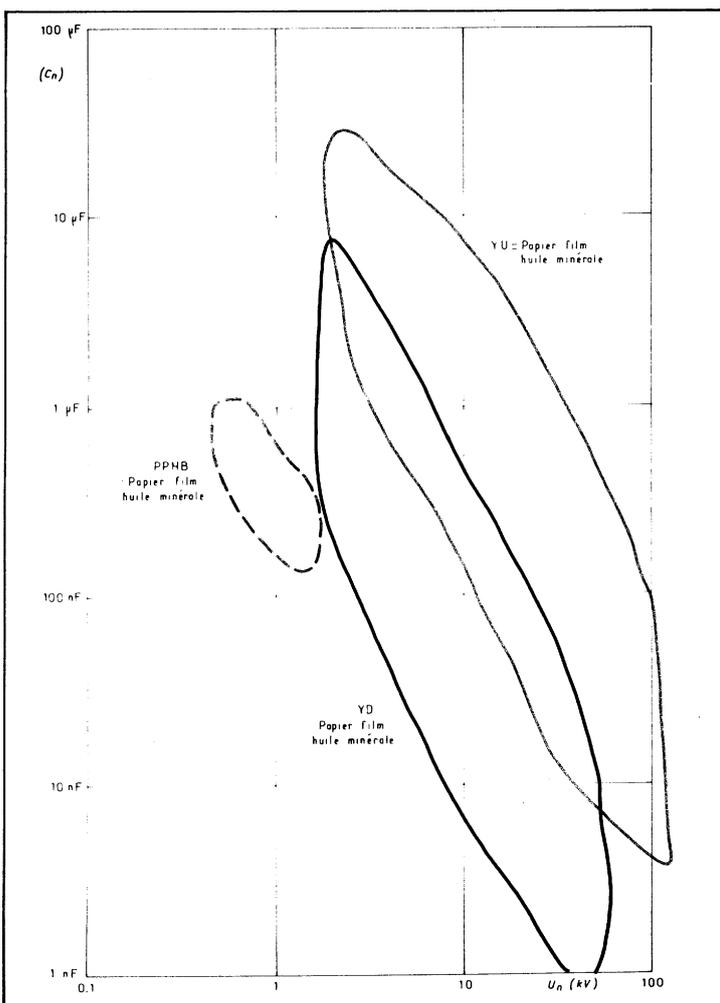
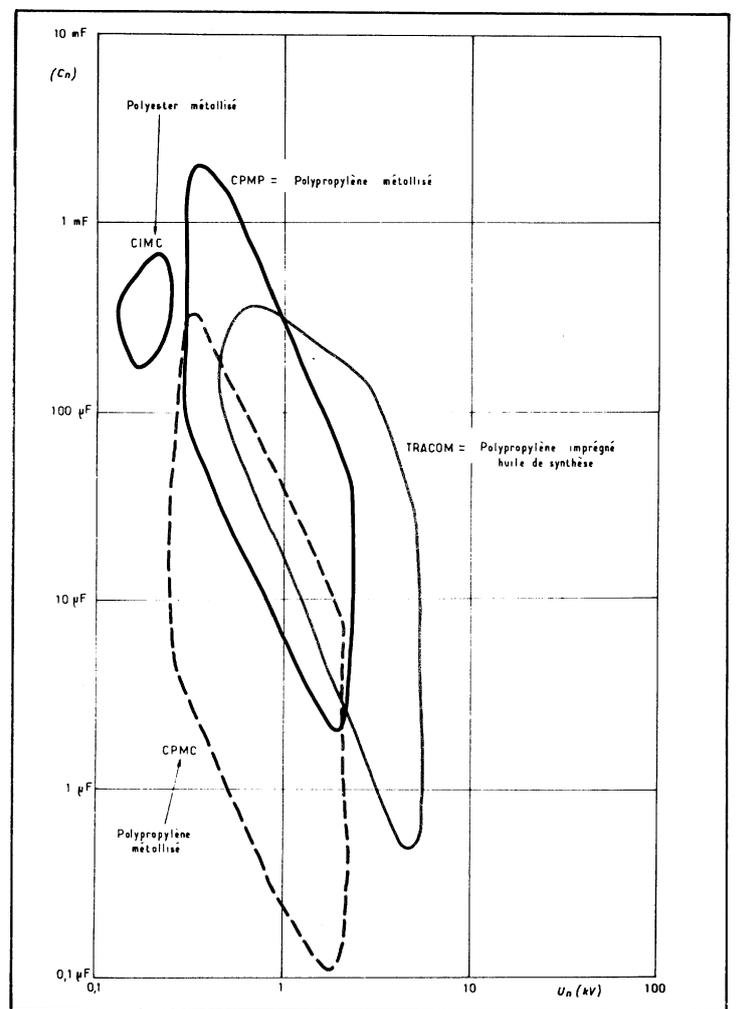
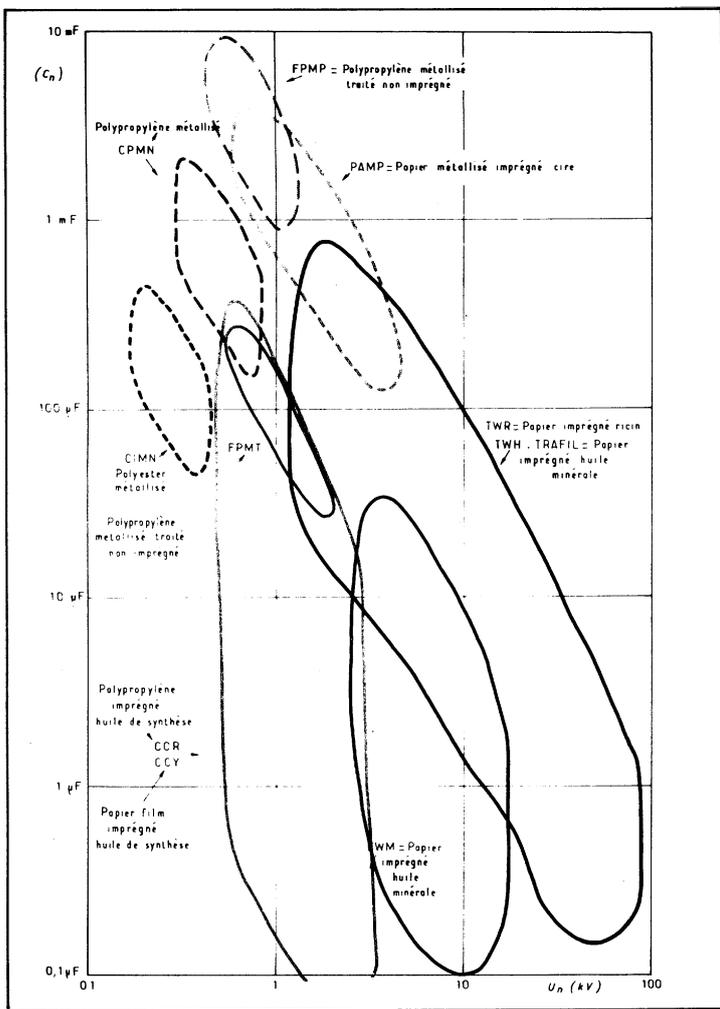
RESERVOIR D'ENERGIE

Dielectrique	Capacité	Tension kV	Température °C
Papier-film armature, imprégné huile minérale	1 nF à 1 µF 1 nF à 300 µF	2,5 à 80 KV 3 à 100 KV	- 55 + 85 °C
Papier-film armature, imprégné huile de synthèse	0,1 à 4,7 µF	1 à 50 KV	- 55 + 85 °C
Papier-film métallisé, imprégné huile minérale	3 à 225 µF	1,5 à 3 KV	- 55 + 85 °C
Papier-film métallisé, imprégné résine	0,8 à 15 µF	1,2 à 1,8 KV	- 55 + 125 °C
Polypropylène métallisé, traité - non imprégné	4,7 à 120 µF	0,9 à 2,1 KV	- 55 + 85 °C

Nota : suivant la nature de la décharge, les condensateurs de filtrage peuvent être très facilement adaptés à cette fonction.

FILTRAGE

Dielectrique	Capacité	Tension kV	Température °C
Polyester métallisé, non imprégné	50 µF à 550 µF	0,16 à 0,5	- 55 + 85 °C
Polypropylène métallisé traité, non imprégné	20 µF à 10 000 µF	0,6 à 1,8	- 55 + 85
Papier métallisé imprégné cire	130 µF à 4 000 µF	0,6 à 4	- 30 + 70
Papier, armature imprégné ricin	0,27 à 1 200 µF	3 à 50	- 25 + 55
Papier, armature imprégné huile minérale	0,1 à 560 µF	0,25 à 50	- 55 + 85
Papier-film, armature imprégné huile minérale	1 nF à 300 µF	3 à 100	- 55 + 85
Papier-film, armature imprégné résine	0,1 nF à 2,2 µF	1 à 25 50 possible	- 55 + 125
Papier-film métallisé, imprégné	1 nF à 3 000 µF	0,25 à 4	- 30 + 70 - 55 + 85 °C - 55 + 125



La gamme des condensateurs de puissance Lcc.