

TECHNIQUE THOMSON-CSF DE REFROIDISSEMENT DES ANODES PAR VAPORISATION D'EAU VAPOTRONS* - SUPERVAPOTRONS* - HYPERVAPOTRONS*

THOMSON-CSF VAPOR-PHASE ANODE-COOLING TECHNIQUES VAPOTRONS* - SUPERVAPOTRONS* - HYPERVAPOTRONS*

La technique de refroidissement des anodes par vaporisation d'eau, inventée par THOMSON-CSF depuis plus de vingt ans, a été exploitée avec succès dès 1950 avec l'apparition des premiers VAPOTRONS*. Cette technique a été constamment améliorée pour permettre maintenant la réalisation d'une nouvelle famille de tubes, les HYPERVAPOTRONS*. Ce superlatif est parfaitement justifié par l'évolution étonnante d'une technique dont l'efficacité a été décuplée par rapport à la performance déjà paradoxale réalisée par les premiers VAPOTRONS. En effet, par condensation immédiate de la vapeur, les structures HYPERVAPOTRONS permettent une capacité de dissipation exceptionnellement élevée de 2 kW/cm²! (voir Note)

Grâce à ses nouveaux HYPERVAPOTRONS, à ses SUPERVAPOTRONS* et VAPOTRONS déjà existants, THOMSON-CSF peut offrir une large gamme de triodes et tétrodes de très grande puissance pouvant atteindre 1 MW en régime continu. Tous ces tubes, utilisant sous les formes diverses la technique de refroidissement par vaporisation d'eau, peuvent fonctionner avec une confortable marge de sécurité.

NOTE - Cette valeur a été vérifiée expérimentalement; toutefois, pour des HYPERVAPOTRONS actuellement en exploitation, la dissipation n'excède pas 1 kW/cm² ce qui laisse une marge de sécurité de 100%.

I - EFFET VAPOTRON

L'effet VAPOTRON a été découvert par M. Charles BEURTHERET de la CFTH-GE (actuellement THOMSON-CSF) en 1950 au cours des études sur le refroidissement des anodes des tubes électroniques de grande puissance.

En utilisant une anode solidaire d'un radiateur comportant des nervures épaisses ou des protubérances massives (voir Photo 1) l'auteur a découvert qu'un régime d'ébullition stable et complexe est établi quand le radiateur est immergé dans de l'eau stagnante bouillant à 100 °C sous la pression atmosphérique. De plus, le phénomène d'ébullition reste parfaitement stable et s'est révélé capable d'évacuer jusqu'au double de la puissance dissipable par une anode classique au contact d'une circulation rapide d'eau froide sous pression.

* Marque déposée

Vapor-phase anode cooling was invented at THOMSON-CSF, more than two decades ago. Starting with those very first VAPOTRON tubes, we have never ceased trying to improve the process, and now we are pleased to announce the latest and most revolutionary advance in anode cooling: the HYPERVAPOTRON*. Revolutionary, because with the HYPERVAPOTRON there is no longer any steam to vent off, while the safe heat-transfer rate can attain an amazing 2 kW/cm²! (See Note).*

The introduction of these HYPERVAPOTRON tubes, along with the already-existing SUPERVAPOTRON and VAPOTRON tubes, means that THOMSON-CSF now has available a complete line of compact, extremely high-powered tetrodes and triodes, featuring vapor-phase cooling, with up to 1 megawatt CW available from our largest model. With all these tubes, use of the most appropriate vapor-phase cooling technique ensures a very comfortable safety margin against overloads.*

NOTE - This value has been experimentally verified. For operational use, however, no HYPERVAPOTRON tubes presently exceed a heat-transfer rate of 1 kW/cm², thus providing at least a 100% margin of operating safety.

I - THE VAPOTRON EFFECT

It was while experimenting on the cooling of high-power electron tubes by direct vaporization of still water, in 1950, that Charles Beurtheret of CFTH-GE (now THOMSON-CSF) discovered the VAPOTRON effect.

In fitting the anode cylinder with a welded-on heat-exchanger block, featuring massive tooth-like or ribbed protrusions (see Photo 1), it was discovered that a stable pattern of sustained, complex boiling is established when the heat exchanger is immersed in a water-filled container. Furthermore, this boiling process remained perfectly stable even when the heat flux from the inside wall of the anode was more than twice that of contemporary circulating-cold-water-cooled anodes.

* Registered Trade Mark

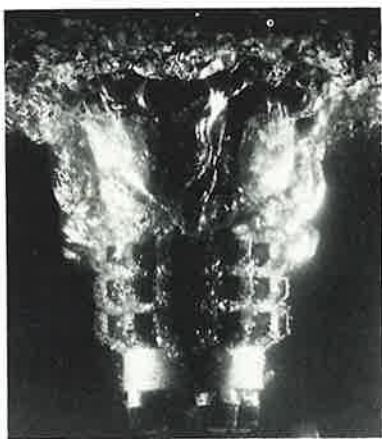


Photo 1 - L'effet VAPOTRON
Photo 1 - The VAPOTRON effect

Cette grande efficacité a permis la réalisation des tubes électroniques de très grande puissance tant pour des émetteurs de Radiodiffusion que pour des équipements industriels, scientifiques et militaires.

L'analyse plus approfondie de ce phénomène a démontré l'existence d'un « effet VAPOTRON » caractérisé par la stabilisation réciproque des températures locales et du régime d'ébullition semi-pelliculaire sur une **paroi essentiellement anisotherme** siège d'un gradient continu s'étendant **de part et d'autre du point critique d'ébullition** (voir ci-dessous). On remarque que dans ce phénomène complexe qui admet la coexistence de deux régimes aussi dissemblables que l'ébullition « nucléée » stable et la vaporisation semi-pelliculaire essentiellement instable, le point « critique » a perdu tout caractère destructif et joue un rôle essentiel dans la stabilisation du régime de transition.

Pour mieux comprendre ce phénomène, il faut se référer à la courbe de « Nukiyama » (voir fig. 1) : cette courbe donne le flux unitaire transféré par une paroi chaude à un liquide bouillant (à la pression atmosphérique) en fonction de l'écart entre la température de paroi et la température d'ébullition du liquide.

An almost immediate success, tubes using this new cooling technique were soon in wide use in broadcast transmitters and in a large range of industrial, scientific and military equipment.

Continuing analysis of the amazingly high heat-transfer capability of these tubes showed that it results from a new phenomenon, involving mutual stabilization between:

- a **continuous temperature gradient** along the extended surface of the massive protrusions, and
- **complex boiling**, in which the infamous "burn-out-point" (see below) loses all criticality, being enclosed in a stable pattern of combined nucleate (bubble-forming) and partial-film boiling.

For an explanation of this new phenomenon, reference must be made to the "Nukiyama curve" (see Fig. 1). This curve shows the non-linear relationship between the density of heat flux transferred from a hot, plane surface to boiling water bathing the surface (under atmospheric pressure) and the temperature of the plane surface.

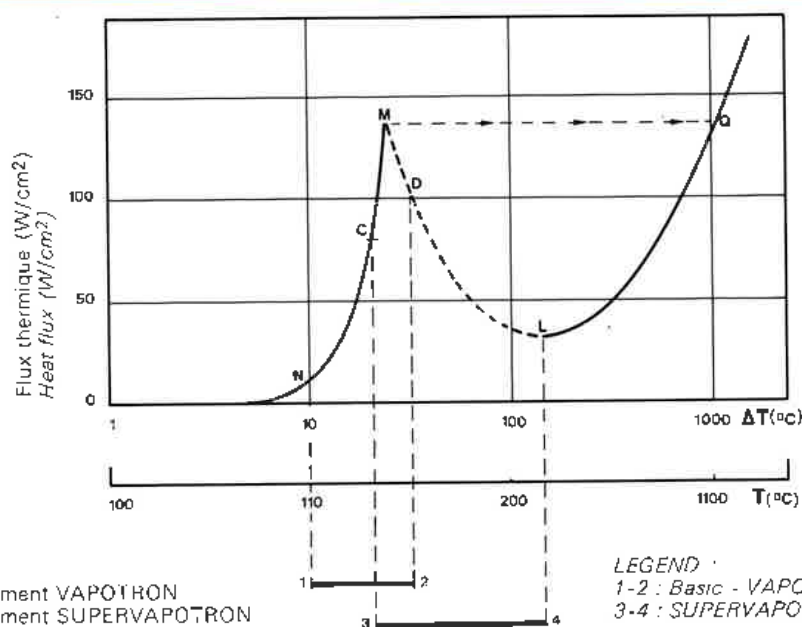


Figure 1 - Courbe de Nukiyama
Figure 1 - Nukiyama curve

Cette courbe comporte plusieurs zones correspondant à des phénomènes physiques différents :

- N : début de « l'ébullition nucléée »
- NM : zone « d'ébullition nucléée » (stable)
- M : « point critique d'ébullition » correspondant à une température de paroi de 125 °C
- ML : zone de « transition » de vaporisation semi-pelliculaire (instable)
- L : point de « Leidenfrost »
- LQ : zone de « vaporisation pelliculaire » (stable).

En régime isotherme, le fait de dépasser le flux maximal correspondant au point M, fait passer le point représentatif de l'état de fonctionnement directement du point M au-delà du point Q en un temps très court. La température du point Q dépassant le point de fusion du cuivre est appelé de ce fait « point de fusion ». Ce processus de destruction irréversible a toujours restreint l'utilisation de la technique de transfert de chaleur par ébullition.

Or, avec « l'effet VAPOTRON », c'est précisément dans cette zone interdite ML que les VAPOTRONS dissipent la plus grande partie du flux thermique qu'ils sont capables de transmettre en régime de surcharge. En effet, à cause de la structure particulière du VAPOTRON, la surface en contact avec le liquide est **essentiellement anisotherme**. Ce fait, lié à la présence d'éléments sous-jacents massifs assurant une liaison thermique transversale entre les éléments de surface, permet d'expliquer les propriétés nouvelles et surprenantes des VAPOTRONS.

En fait, en se reportant à la courbe de la figure 1, le fonctionnement est parfaitement stable dans la zone 1-2. Des mesures ont montré que l'extrémité de la nervure reste à une température inférieure à T_1 , que la température varie progressivement le long du flanc de la nervure et que des éléments à la base de la nervure peuvent atteindre la température T_2 .

Dans des conditions de surcharge, le gradient de température peut s'étendre jusqu'au point de Leidenfrost, amenant le régime de fonctionnement dans la zone 3-4 pour autant que la température T_3 reste inférieure à la température de coalescence T_c (correspondant à un flux de 80 W/cm²). Après la période de surcharge, le gradient de température revient à la zone 1-2 sans aucun dommage pour le tube.

En conclusion, il est utile de signaler que ce processus de stabilisation réciproque d'un gradient continu de température et d'un régime d'ébullition complexe permet une capacité de transfert de chaleur de 150 W/cm², capacité nettement supérieure à celle donnée par des méthodes simplificatrices de l'analyse traditionnelle.

Applications de l'effet VAPOTRON

Depuis sa découverte, l'effet VAPOTRON a fait l'objet d'études et de développements constants. Les premiers VAPOTRONS, dont certains sont encore en service, sont graduellement remplacés par d'autres modèles plus récents et plus perfectionnés. Concurrentement, le système VAPODYNE* a été développé et amélioré pour tirer le meilleur profit de la remarquable capacité de dissipation inhérente aux VAPOTRONS.

Along this curve, the following points and zones of interest are shown:

- N, the point where "nucleate boiling" begins,
- NM, the "nucleate boiling" zone (stable),
- M, the "burn-out point" corresponding to a surface temperature of only 125 °C,
- ML, the "transition zone" of partial film boiling (unstable),
- L, the "Leidenfrost point",
- LQ, the "film-boiling" zone (stable).

Arrow MQ shows the irreversible burn-out process, causing anode destruction by fusion, which was the basic reason for prohibiting vaporization as a safe means of cooling the anodes of electron tubes.

With the VAPOTRON technique, however, point M on the Nukiyama curve loses all character of a point of destruction. Instead, due to heat transfer by conduction within each massive protrusion, a stable, continuous temperature gradient is established along the protrusion's lateral surfaces. This gradient not only includes T_M , the temperature corresponding to the "burn-out point", but also temperatures beyond, well up into the transition zone.

A remarkably efficient heat transfer then takes place, through a complex combination of nucleate and partial film boiling along the lateral surfaces. In fact, referring to Fig. 1, with the basic VAPOTRON it is possible to achieve stable operation throughout the range 1 - 2. As long as the tip of each protrusion remains at a temperature lower than T_1 , the base of the protrusion can operate continuously up to and including T_2 .

Under conditions of a short circuit, or an overload, the temperature gradient can even extend to the Leidenfrost point, shifting to the range 3 - 4, as long as T_3 remains less than T_c , the temperature of bubble coalescence (corresponding to a heat flux of 80 watts/cm²). When the short/overload condition disappears, the temperature gradient shifts safely back to the range 1 - 2 with absolutely no tube damage.

In analyzing the total heat transfer accomplished with such a VAPOTRON structure, the single-point heat-transfer function must be integrated over the entire surface area of each protrusion. From such integration, it is established that the basic VAPOTRON structure can dissipate an incident heat flux of 150 W/cm² in short/overload.

Applications of the VAPOTRON effect

From the time of its discovery, the VAPOTRON effect has undergone continual study and development. The earliest VAPOTRONS, some still providing reliable service, have gradually been replaced by new tubes, featuring improved designs. Concurrently, the VAPODYNE* system was developed and perfected, to ensure that full advantage was being taken of the remarkable heat-transfer characteristics inherent in the VAPOTRON.

Le système VAPODYNE

En plus du tube VAPOTRON, le système VAPODYNE comprend le bouilleur, normalement équipé d'un séparateur vapeur/liquide, les canalisations d'eau et de vapeur, la sécurité de niveau, un ou plusieurs condenseurs et un certain nombre d'accessoires optionnels (voir fig. 2). Une version simplifiée du système VAPODYNE (voir photo 2) a été développée pour l'emploi des VAPOTRONS en haute fréquence industrielle. Ce bouilleur-condenseur se présente sous la forme d'un ensemble monobloc réunissant sous un faible volume le bouilleur, le condenseur et le dispositif de sécurité.

Du fait qu'il existe plusieurs versions possibles du système VAPODYNE, il est recommandé d'utiliser le système le plus adapté au type de VAPOTRON considéré.

Un autre avantage non négligeable de ce système est la possibilité d'obtenir de l'eau chaude qui peut être utilisée par exemple pour le chauffage de l'immeuble dans lequel il est installé.

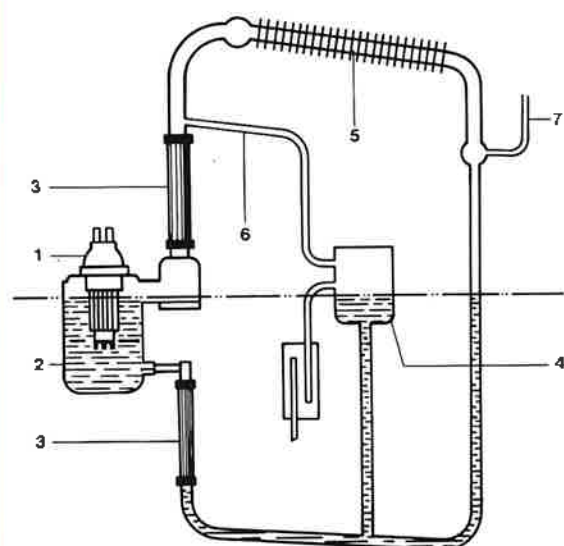
The VAPODYNE system

In addition to the VAPOTRON tube, the VAPODYNE system includes the boiler, usually fitted with a vapor/liquid separator, the necessary piping, a water-level protection system, one or more condensers, and certain optional accessories (see Fig. 2). A simplified VAPODYNE system (see Photo 2) has also been developed, for applications such as industrial heating. This simplified system combines, in a single compact piece of equipment, the boiler, the condenser, and the water-level safety devices.

Since numerous versions of both the regular and compact VAPODYNE systems exist, THOMSON-CSF strongly recommends the use of the most appropriate system with one of our VAPOTRON-type tubes.

With any of the VAPODYNE systems, an added side-benefit is the facility for obtaining a ready supply of hot water, at any desired temperature, as long as the VAPOTRON is operating. Typically, this hot water is used to provide essentially "no-cost" heating of the building in which the VAPODYNE system is installed.

Figure 2 - Système VAPODYNE conventionnel
Figure 2 - Conventional VAPODYNE system



- | | |
|---|---|
| 1 - Tube VAPOTRON
VAPOTRON tube | 5 - Condenseur
Condenser |
| 2 - Bouilleur
Boiler | 6 - Prise de pression
Dynamic pressure input |
| 3 - Tuyaux isolants
Insulating pipes | 7 - Prise d'air
Air vent |
| 4 - Réservoir témoin de niveau
Level-monitoring tank | |



Photo 2 - Système VAPODYNE compact
Bouilleur - condenseur TH 17011
Photo 2 - Compact VAPODYNE system
TH 17011 Boiler-condenser

Tubes THOMSON-CSF de puissance à grille : VAPOTRONS

Parmi les nombreux VAPOTRONS du type triodes ou tétrodes réalisés par THOMSON-CSF, on peut citer par exemple la triode TH 504 capable de délivrer 200 kW en régime de porteuse avec une dissipation d'anode maximale de 150 kW.

Un autre exemple est la triode TH 500 (voir photo 3) utilisée en modulateur d'impulsion, capable de fournir 7 MW de puissance crête avec une dissipation d'anode maximale de 150 kW.

THOMSON-CSF VAPOTRON power - grid tubes

Among the numerous VAPOTRON triodes and tetrodes made by THOMSON-CSF, a typical example is the TH 504 triode providing up to 200 kilowatts carrier power, with a maximum anode dissipation of 150 kW.

Another example that might be cited is the the TH 500 triode (see Photo 3), used as a pulse modulator. This tube provides up to 7 MW of peak power output, with a maximum anode dissipation of also 150 kW.



Photo 3 - Triode TH 500
Photo 3 - TH 500 triode

II - L'EFFET SUPERVAPOTRON*

Des études systématiques sur l'effet VAPOTRON[®] ont conduit à une série de perfectionnements qui ont abouti, en 1959, à la réalisation des SUPERVAPOTRONS[®]. Les premiers perfectionnements ont consisté à favoriser le mouvement spontané de thermosiphon dans les canaux verticaux où la vapeur était produite en vue d'arracher les bulles de la paroi. Puis on a été conduit à découper les extrémités des ailettes massives pour abaisser la température de ce « point froid » et, par suite, accroître la stabilité du gradient de température. Ce dispositif s'est révélé très efficace et a permis d'étendre la stabilisation effective du régime pelliculaire jusqu'à la température du point de Leidenfrost L. Ces SUPERVAPOTRONS[®] ainsi réalisés sont capables de dissipations permanentes atteignant 300 W/cm².

De plus, en même temps que s'approfondissaient les connaissances sur l'effet SUPERVAPOTRON[®], d'importants perfectionnements ont été apportés aux tubes eux-mêmes.

Vaporisation complexe « globale »

La poursuite des progrès a été assurée par une voie de recherche bien différente, basée sur l'analyse du phénomène de vaporisation semi-pelliculaire stabilisée qui assure la plus grande part du transfert de chaleur dans ces formes perfectionnées du VAPOTRON[®].

L'examen des aspects de la vapeur produite de part et d'autre du point M de Nukiyama a permis de concevoir la possibilité de produire artificiellement la fusion des deux modes de vaporisation en un **phénomène unique de vaporisation globale**.

Un tel effet est obtenu par l'interférence hydrodynamique entre deux surfaces anisothermes comme le montre la vue en coupe d'une structure SUPERVAPOTRON[®] améliorée de la fig. 3. La gorge étroite entre 2 surfaces anisothermes est le siège d'une vaporisation complexe s'étendant entre les points de température T_L et T_C (voir courbe de Nukiyama) et un régime périodique s'établit dans cette fente. D'abord, la vapeur se forme dans la gorge (fig. 3 a) puis s'en échappe à grande vitesse (fig. 3 b) et finalement la gorge est réalimentée en liquide par aspiration entre les bouffées de vapeur (fig. 3 c).

II - THE SUPERVAPOTRON[®] EFFECT

Continuing research and development efforts on the VAPOTRON[®] effect led, in 1959, to the SUPERVAPOTRON[®]. This major advance was based on the stabilizing effects of the tips of each massive protrusion on the boiling taking place down to the base of each protrusion.

Referring again to the Nukiyama curve, in the SUPERVAPOTRON[®] the tip of each protrusion is kept "cold", enabling the base of the protrusion to operate safely at any point of the strongly stabilized zone ML, and even beyond the Leidenfrost point. This makes it possible to increase by 100% the power applied to such a structure, meaning that typical continuous ratings can attain 300 W/cm².

As more information concerning the SUPERVAPOTRON[®] effect has become available, important product improvements have been made.

Aggregate boiling

It was discovered that a fortuitous opportunity is provided by the inherent instability of the negative-slope portion of the Nukiyama curve, the so-called transition zone.

When extreme turbulence is created along a SUPERVAPOTRON[®] protrusion, where a combination of nucleate and partial-film boiling is taking place, the two types of boiling can be aggregated, in the vicinity of the point at temperature T_M into a **single complex phenomenon**, featuring extraordinarily high efficiency.

Such an effect is achieved through the hydrodynamic mutual interference between the facing lateral surfaces of two adjacent protrusions, as illustrated in fig. 3, showing the cross section of an improved SUPERVAPOTRON[®] structure. As shown, if the gap between the two facing surfaces is reduced to a narrow slot, aggregate boiling takes place between the points at temperature T_L and T_C (reference Nukiyama curve), and a pulsating regime is established in the slot. First (Fig. 3 a), the vapor produced in the complex boiling builds up in the slot, then it is expelled at high velocity (Fig. 3 b), and finally (Fig. 3 c), a succeeding suction action draws boiling water back in to replenish the slot.

* Registered Trade Mark

* Marque déposée

Dans ce fonctionnement SUPERVAPOTRON, la courbe de Nukiyama, correspondant à la zone de transition ML se trouve fortement modifiée. Le flux unitaire représenté par le point M est plus élevé (voir fig. 4) : les courbes 2 et 3 ont été faites à partir d'échantillons expérimentaux et correspondent à des fentes de 25 mm de profondeur, de 5 et 2 mm de largeur respectivement.

Les divers SUPERVAPOTRONS à fente étroite permettent d'atteindre une capacité de dissipation de 500 W/cm² dans un bain stagnant d'eau bouillante et même davantage avec des bouilleurs-condenseurs.

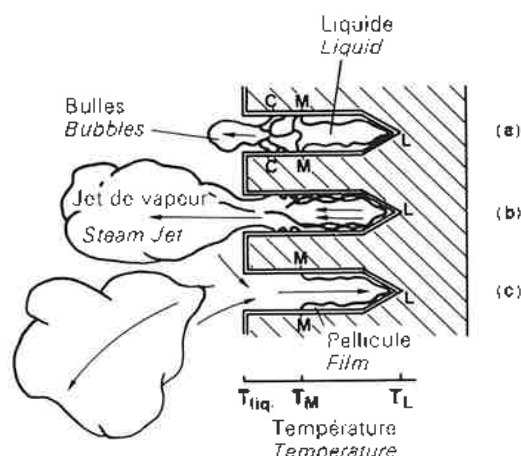


Figure 3 - Coupe montrant le fonctionnement du SUPERVAPOTRON amélioré
Figure 3 - Improved SUPERVAPOTRON cross-section showing operation.

In this improved SUPERVAPOTRON, the heat-transfer process becomes much more efficient, and the ML transition zone of the Nukiyama curve is strongly altered, with a concurrent rise in the heat flux transfer at point M, illustrated by Fig. 4, where lines 2 and 3 correspond to slot widths of 5 and 2 mm, respectively, for a slot 25 mm deep, in an experimental sample.

The various SUPERVAPOTRONS capitalize on this narrow-slot effect to achieve safe continuous ratings of 500 W/cm² in pool boiling, and even more in all types of boiler-condenser jackets.

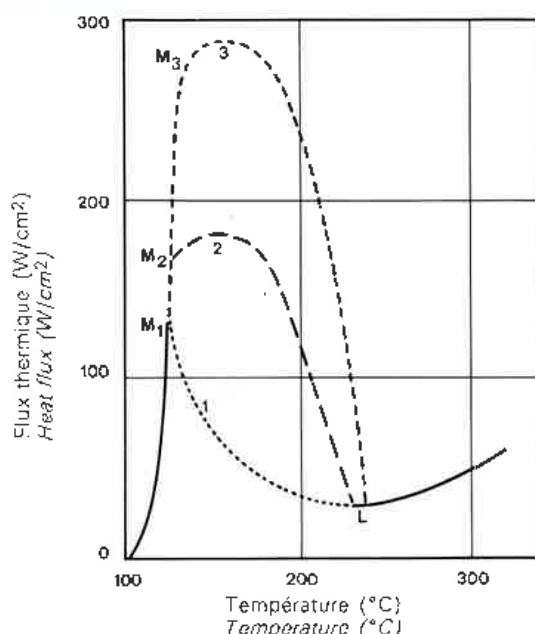


Figure 4 - Transfert du flux thermique dans les gorges étroites
Figure 4 - Heat transfer in narrow slots.

Les SUPERVAPOTRONS compacts

L'expérience acquise avec les SUPERVAPOTRONS améliorés a montré que plus le flux à la base des dents est élevé, plus le gradient de température sur les faces latérales devient « abrupt ». Il s'ensuit que la surface sur laquelle agit le phénomène de vaporisation complexe devient plus petite. Ainsi, paradoxalement, les nouveaux SUPERVAPOTRONS réalisés avec ces gorges étroites présentent une très grande stabilité avec un taux de transfert de plus en plus élevé.

On peut en tirer deux résultats intéressants :

- 1 - la partie « froide » de la dent grandit à mesure que le flux augmente rendant le phénomène de vaporisation complexe encore plus stable.
- 2 - la densité moyenne du flux transmis par la surface comprise entre les points aux températures T_L et T_C augmente spontanément avec le flux incident, apparemment sans limite.

Une étude théorique sur ce phénomène surprenant a été entreprise et a permis de calculer les dimensions optimales des SUPERVAPOTRONS pour chaque application désirée. Elle a conduit à réduire les dimensions des éléments anisothermes et le poids des anodes ainsi équipées. Malgré leur structure plus légère et plus petite que les tubes existants et en dépit de l'environnement encombré par d'énormes quantités de vapeur, les SUPERVAPOTRONS sont capables de dissiper en permanence 500 W/cm². Utilisés avec des bouilleurs-condenseurs dans un environnement débarrassé de vapeur, les SUPERVAPOTRONS peuvent dissiper jusqu'à 700-800 W/cm².

The compact SUPERVAPOTRON

Experience with the improved SUPERVAPOTRON demonstrated that the larger the heat flux into the base of the protrusion, the steeper the temperature gradient on its lateral surfaces becomes. It follows that the area in which the super-efficient aggregate boiling takes places becomes progressively smaller. Yet, astoundingly, the process remains perfectly stable, with the increased heat flow into the protrusion continuing to be safely transferred to the boiling water.

Two remarkable results stand out:

1. The "cold" part of the protrusion grows as the incident heat flux increases, making the aggregate boiling ever more stable.
 2. The average flux density transmitted by the shrinking area between the points at T_L and T_C increases spontaneously with the incident flux, apparently without limit.
- A theory of this unexpected behavior has been established, enabling a precise calculation of the optimum SUPERVAPOTRON dimensions for each tube application. The resultant SUPERVAPOTRON structures are lighter and smaller than previous types, and can be rated for continuous dissipation of 500 W/cm², despite the disturbing effects of the large volume of steam generated. In a boiler/condenser jacket, this power can be increased to the range 700 - 800 W/cm².

Tubes SUPERVAPOTRONS THOMSON-CSF

La technique SUPERVAPOTRON a été appliquée à un grand nombre de tubes électroniques THOMSON-CSF tels que la triode TH 543 (voir photo 4) utilisée en radiodiffusion et en chauffage industriel avec une dissipation d'anode de 90 kW et la tétrode TH 548 (voir photo 5) utilisée en radiodiffusion comme oscillateur ou amplificateur avec une dissipation d'anode de 250 kW.



Photo 4 - Triode TH 543
Photo 4 - TH 543 triode

III - L'EFFET HYPER VAPOTRON*

Durant les travaux de développement des SUPERVAPOTRONS compacts, des essais ont été faits pour réduire les effets perturbateurs causés par le volume de vapeur engendré. Pour cela, on a recours à la condensation immédiate de la vapeur par une circulation d'eau froide dirigée parallèlement aux gorges étroites.

Mais l'expérience a montré le caractère aléatoire de cette performance : en effet, le courant d'eau parcourant longitudinalement les gorges étroites pourrait avoir pour effet de condenser prématurément la vapeur et d'arracher de la paroi l'édifice fragile de la vaporisation complexe qu'on avait réussi à constituer. On lui substituerait alors la simple circulation d'eau beaucoup moins efficace et soumise à la caléfaction.

Un progrès décisif a été réalisé lorsque, rompant avec cette obsession bien naturelle d'assurer à tout prix la réalimentation en eau des espaces générateurs de vapeur, on a délibérément choisi de faire circuler l'eau perpendiculairement à la direction des gorges. Ainsi avec une anode cylindrique à gorges circulaires ou hélicoïdales le débit d'eau est dirigé longitudinalement à l'intérieur d'une chemise cylindrique coaxiale. De cette façon, l'eau ne détruit pas l'effet SUPERVAPOTRON tout en contribuant à la condensation immédiate de la vapeur qui s'échappe des gorges. Il n'y a donc plus de problème pour l'évacuation de la vapeur.

Le comportement de ce nouveau dispositif appelé l'HYPERVAPOTRON* découle des observations suivantes :

1. La turbulence est assurée par les jets de vapeur dotés d'une très grande vitesse (quelques dizaines de mètres par seconde) et la condensation immédiate est obtenue par la circulation d'eau à faible vitesse.
2. La réalimentation en eau dans les gorges reste assurée par des aspirations périodiques consécutives à de violentes expulsions de vapeur.

* Marque déposée

THOMSON-CSF SUPERVAPOTRON tubes

The SUPERVAPOTRON technique is applied to a wide variety of THOMSON-CSF electron tubes, including the TH 543 triode (see Photo 4) used in broadcasting and industrial heating, dissipating up to 90 kW on the anode, and the TH 548 tetrode (see Photo 5), used in broadcasting operation as a CW oscillator or an AF or RF power amplifier, with anode dissipation of 250 kW.



Photo 5 - Tétrode TH 548
Photo 5 - TH 548 tetrode

III - THE HYPERVAPOTRON* EFFECT

During developmental work on the compact SUPERVAPOTRON, attempts were made to reduce the disturbing effects of the large volume of water vapor generated. The electrode was fitted with a narrow water jacket within which a forced flow of cool water was directed along the narrow slots of the SUPERVAPOTRON structure.

Surprisingly, rather than increasing the maximum heat-transfer capability of the structure, increasing the velocity of the water caused a **decrease** in this capability. Apparently, the fragile aggregate-boiling process, key to the extraordinary heat-transfer efficiency of the SUPERVAPOTRON, can be "blown out" by the forced flow of cool water in the SUPERVAPOTRON structure. The cooling performance can then fall abruptly to that usually obtained from ordinary forced-water cooling.

Persevering in the attempt to reduce the disturbing effects of the steam generated, it was decided to direct the flow of cool water across the slots, instead of along them. Thus for a cylindrical anode with circular or helical grooves, the water flow is directed longitudinally in a coaxial water jacket. In this way, the water flow remains substantially external to the vapor-generating structure, and the jets of steam escaping from the narrow slots mix with the flowing cool water and are quickly condensed. There is thus no necessity to vent off any escaping steam.

The behavior of this new device, called the HYPERVAPOTRON*, resulted in the following observations:

1. The turbulence of the flowing liquid, causing highly efficient condensation, is mainly due to the very high velocity of the steam jets (a few tens of meters per second), thus the water flow can be very slow.
2. The narrow slots are resupplied with water after each expulsion of steam by a complementary suction process.

* Registered Trade Mark

3. Le phénomène de vaporisation complexe, libéré de toute contrainte néfaste, accuie une efficacité très surprenante et prend un caractère d'**avalanche** qui présente une résistance thermique **inversement proportionnelle** à la grandeur du flux de chaleur transmis c'est-à-dire que le dispositif fonctionne comme une soupape thermique calée à la température du point de Leidenfrost.

4. Les nouveaux HYPERVAPOTRONS présentent une structure encore plus légère et moins onéreuse que celle du SUPERVAPOTRON.

Depuis la découverte de l'effet HYPERVAPOTRON, de nombreuses études ont été entreprises qui ont démontré que les tubes utilisant cette technique peuvent dissiper jusqu'à 2 kW/cm² avec un débit d'eau réfrigérant très faible. Par exemple, le flux de chaleur dégagé par l'impact d'un faisceau d'électrons de 300 kW sur une surface de 150 cm² peut être dissipé avec un débit aussi faible que 150 l/mn. Pourvu que le débit d'eau soit suffisant pour limiter la température de l'eau à une valeur assez inférieure à la température d'ébullition, cette structure permet de dissiper le flux de chaleur dans de l'eau sortant à 90 °C sous pression atmosphérique (ou 100 à 105° sous une pression de 1 à 2 bars).

Cette eau à haute température peut être mise à profit dans un circuit secondaire à travers un échangeur, pour le chauffage de l'immeuble ou pour toute autre utilisation.

Dans les exploitations existantes, des HYPERVAPOTRONS peuvent dissiper 1 000 W/cm² avec une grande marge de sécurité.

Tubes HYPERVAPOTRONS THOMSON-CSF

La nouvelle technique de refroidissement HYPERVAPOTRON a été largement utilisée tant pour les tubes de grande puissance en radiodiffusion et en H.F.I. que pour les tétrodes U.H.F. de télévision.

Un exemple spécifique est fourni par la tétrode céramique-métal TH 518 conçue pour fonctionner en régime continu ou en impulsion jusqu'à 120 MHz. Ce tube peut délivrer une puissance de 1,6 MW crête ou 800 kW en continu et la dissipation d'anode peut atteindre 600 kW.

D'autres exemples sont fournis par la tétrode TH 537 (voir photo 6) utilisée dans les émetteurs O.C. comme amplificatrice B.F. ou HF avec une dissipation d'anode supérieure à 300 kW ou par la triode TH 556 utilisée comme oscillatrice pour des puissances atteignant 1 MW en régime continu.

3. Free of any external disturbance, the aggregate boiling shows an amazing efficiency and the "avalanche" nature of the heat transfer is confirmed, i.e., that the thermal resistance (of the whole structure and of its contact with the flowing liquid) **decreases** as the heat flux is **increased**. Further, the maximum temperature at the base of heat-exchanger protrusions remains nearly constant in the Leidenfrost zone (225 to 300 °C).

4. The new structures specially designed to be used in the HYPERVAPOTRON are lighter and cost less than SUPERVAPOTRON structures made for pool boiling.

Since the original discovery of the HYPERVAPOTRON effect, extensive testing has demonstrated that HYPERVAPOTRON structures can operate continuously with an incident heat of up to 2 kW/cm² (12 kW/in²), with only a small flow of cooling water needed. For example, the heat flux generated by a 300-kilowatt electron beam impinging on an area of 150 cm² can be dissipated with a water flow as low as 150 l/mn (40 gallons/minute). The temperature of the cooling water at the inlet is unimportant as long as the outlet temperature remains under 90 °C at atmospheric pressure (or 100 - 105 °C under 1 to 2 bars pressure).

The very hot water at the outlet of the HYPERVAPOTRON (90° - 105 °C) can be routed through a heat exchanger to provide a secondary hot water circuit, to heat the building in which the installation is located at no additional cost, or for other applications.

HYPERVAPOTRON electron tubes can be rated at over 1 000 watts/cm² of average anode dissipation, with a wide margin of safety.

THOMSON-CSF HYPERVAPOTRON tubes

This new technology of HYPERVAPOTRON cooling is already in extensive use in THOMSON-CSF tubes. It is especially suited for cooling the anodes of some compact high-power short-wave broadcast or industrial gridded tubes and UHF-TV tetrodes.

A specific example of the power-dissipation capacity of the HYPERVAPOTRON tubes developed by THOMSON-CSF is furnished by the TH 518, a ceramic-metal tetrode designed for pulse or CW operation at up to 120 MHz. This tube can deliver 1.6 MW peak power output, or more than 800 kW CW and the anode dissipation can be as great as 600 kW.

Other examples are the TH 537 tetrode (see Photo 6) used in short-wave transmitters as an AF or RF amplifier with an anode dissipation of more than 300 kW, or the TH 556 triode, used as an oscillator for powers up to 1 MW CW.



Photo 6 - Tétrode TH 537
Photo 6 - TH 537 tetrode

CONCLUSION

Avec la découverte en 1950 de la réfrigération par vaporisation, THOMSON-CSF a apporté une solution nouvelle et déterminante au problème de refroidissement des anodes des tubes électroniques. Utilisant un dispositif statique, le VAPOTRON, qui a permis de doubler la capacité de dissipation par rapport à celle d'un tube refroidi par circulation rapide d'eau froide sous pression, a connu un succès immédiat dans le monde entier et est encore largement exploité de nos jours.

Depuis plus de 20 ans, THOMSON-CSF a constamment amélioré cette technique. Tous ces efforts de recherches et d'études ont abouti à la découverte de l'effet HYPERVAPOTRON, forme la plus évoluée du VAPOTRON, qui paradoxalement, apporte un progrès décisif à la vieille technique du refroidissement des anodes par circulation d'eau. Il faut remarquer qu'il s'agit à présent d'eau très chaude, sous faible pression et à débit réduit et que les performances de dissipation ont été effectivement décuplées.

L'efficacité de l'effet HYPERVAPOTRON est telle que le facteur limitatif de la puissance de sortie des tubes n'est plus constitué par la dissipation d'anode mais par la dissipation de grille. Pour faire face à ce nouveau problème, THOMSON-CSF a adopté une nouvelle technique avancée dans le domaine des tubes à grille à savoir les grilles PYROBLOC* qui seront présentées dans le chapitre suivant.

Mais, en plus des performances constamment améliorées par l'évolution VAPOTRON, SUPER-VAPOTRON, HYPERVAPOTRON, on retrouve toujours les mêmes avantages : grande simplicité, faible coût d'exploitation, marge de sécurité exceptionnelle sans compter la possibilité de chauffer l'établissement en récupérant la chaleur par l'intermédiaire d'un échangeur.

CONCLUSION

With the introduction of vapor-phase cooling in 1950, THOMSON-CSF brought a revolutionary advance to anode cooling, making static cooling more effective than even high flow-rate circulating systems. Almost immediately successful, the VAPOTRON technique was soon adopted worldwide and remains in wide use today.

In over 20 years of development and research, constantly striving to improve the technology of vapor-phase anode cooling, THOMSON-CSF has continually led the way. Now we have again revolutionized the field, this time, paradoxically, by integrating VAPOTRON techniques with circulating-water cooling systems. So dramatic had been the improvement of anode heat transfer in our new HYPERVAPOTRON power tubes that their output power was no longer limited by anode thermal dissipation, but by grid dissipation. This new state of affairs has led THOMSON-CSF to produce yet another revolutionary advance in gridded power tubes: PYROBLOC grids, discussed in the following article.*

But whether VAPOTRON, SUPERVAPOTRON or HYPERVAPOTRON, the same simplicity, cost advantages and wide safety margins stand out, along with the possibility of using the hot water produced, via a heat exchanger, for virtually "free" heating of the premises.