

L'ÉFFUSIVITÉ ET LA RÉSISTANCE THERMIQUE DES ZONES SUPERFICIELLES DU SOLIDE DÉTERMINENT LE PROCESSUS DE VAPORISATION DU LIQUIDE EN RÉGIME DE TREMPÉ

J. C. CHEVRIER, F. MOREAUX et G. BECK*

Laboratoire de Métallurgie, associé au C.N.R.S., Ecole Nationale Supérieure de la Métallurgie et de l'Industrie des Mines,
54, Nancy, France

(Reçu le 8 juillet 1971)

Résumé—Nous définissons d'abord les conditions dans lesquelles la caléfaction apparaît au cours de la trempe. En modifiant les propriétés superficielles du métal on peut soit l'éviter, soit la provoquer. Nous mettons ensuite en évidence un mode inhabituel de vaporisation, l'ébullition larvée, qui selon la valeur de la résistance thermique superficielle du solide, présente des propriétés intermédiaires entre celles de la caléfaction et celles de l'ébullition nucléée.

NOTATION

c , chaleur massique;
 E , $\sqrt{\lambda c \rho}$ —effusivité;
 e , épaisseur d'un film;
 L_i , température superficielle limite supérieure de l'ébullition nucléée;
 L_s , température superficielle limite inférieure de la caléfaction;
 R , résistance thermique;
 R_c , résistance thermique critique;
 t_i , durée de l'instant initial de la trempe;
 T , écart de température $\theta_0 - \theta_{ci}$;
 T_i , température de trempe qui donne L_i lors du contact de l'éprouvette avec le liquide;
 T_s , température de trempe qui donne L_s lors du contact de l'éprouvette avec le liquide;
 T_0 , température initiale critique de trempe

sans caléfaction, dans la condition $\theta_{ci} < L_i$;

α , $\lambda/c\rho$ —diffusivité thermique;
 λ , conductivité thermique;
 ρ , masse volumique;
 θ_{ci} , température de contact initial;
 θ_a , température superficielle du dépôt;
 θ_L , température du liquide;
 $\theta^{\circ}C$, température initiale critique de trempe sans caléfaction obtenue à l'aide d'un dépôt isolant.

LA TREMPÉ à l'eau d'une éprouvette métallique portée à haute température permet de distinguer deux modes successifs de vaporisation: la caléfaction, à laquelle succède l'ébullition nucléée. Leidenfrost [1] et Nukiyama [2] avaient mis en évidence ces modes de vaporisation dans le cas du régime permanent. Bien que, dans le cas de la trempe, les phénomènes soient qualitativement identiques à ceux qu'avaient observé ces auteurs, les températures critiques d'une part et les flux minimal et maximal d'autre part sont différents [3]. La surface du solide présente en effet, dès le début de la calé-

* J. C. Chevrier, Docteur de Spécialité; F. Moreaux, Docteur de Spécialité, Attaché de recherches au Centre National de la Recherche Scientifique; G. Beck, Docteur ès Sciences Physiques, Chargé de Recherches au Centre National de la Recherche Scientifique.

faction, une anisothermie qui, lors de la transition, peut devenir considérable [4]. En trempe comme en régime permanent, c'est la température de la surface qui détermine le mode de vaporisation au cours du refroidissement, donc le flux de chaleur transmis et la vitesse de refroidissement de l'éprouvette.

Pendant toute la durée du régime de caléfaction, la densité de flux de chaleur à travers le film de vapeur reste limitée, interdisant de grandes vitesses de refroidissement aux températures élevées. D'autre part, la transition caléfaction-ébullition nucléée provoque dans l'éprouvette un choc thermique dont les conséquences métallurgiques sont souvent très graves.

Nous étudions ici, dans le cas de la trempe d'éprouvettes métalliques, l'influence des propriétés physico chimiques de la surface du solide sur la température atteinte lors de son contact avec le liquide, sur le processus de vaporisation et donc sur l'ensemble du refroidissement.

A l'instant de l'immersion, la surface de la pièce est brutalement portée à une température initiale dite "de contact brusque" [5]. Cette température superficielle varie ensuite selon une loi déterminée par les propriétés de vaporisation du liquide au contact des parois de l'éprouvette.

La connaissance approfondie de ces phénomènes, en particulier des conditions d'apparition de la caléfaction présente, en plus de son intérêt fondamental, l'avantage pratique de rendre prévisible le mode de refroidissement d'une pièce trempée. D'autre part, en modifiant soit les conditions du contact solide-liquide, soit la conductance de l'interface éprouvette-liquide, il devient possible de contrôler la caléfaction, soit en l'éliminant ou en la perturbant pour accélérer le refroidissement, soit en la stabilisant pour le ralentir.

1. L'INSTANT INITIAL DE LA TREMPÉ

C'est l'instant très bref qui va de la prise de contact entre les deux milieux à l'établissement

du processus de vaporisation ou, si le liquide ne se vaporise pas, c'est la durée correspondant au début du régime de convection tel que nous allons le décrire.

1.1 Description de l'instant initial de la trempe dans un liquide qui ne se vaporise pas

Un bain d'étain fondu est maintenu à la température $\theta_L = 300^\circ\text{C}$. L'éprouvette métallique est un cylindre en nickel oxydé à l'air à 900°C . Elle est portée à la température de trempe et immergée dans le liquide selon la méthode déjà décrite, qui est à la fois rapide et reproductible [4, 6].

La prise de contact entre le milieu chaud et le milieu plus froid se traduit, sur leur surface commune, par des variations de température très rapides et inaccessibles à des mesures directes car l'introduction d'un capteur quelconque sur la surface modifie ses propriétés et, par suite, le phénomène étudié. On sait en plus que, la mesure exacte d'une température superficielle très rapidement variable donne des résultats qui doivent être interprétés avec la plus grande prudence. Nous avons donc été amenés à mettre en oeuvre une méthode indirecte fondée sur la détermination de la température en un point éloigné de la surface, pour que l'épaisseur de solide comprise entre cette surface et le point de mesure soit connue de façon précise. Ainsi, la loi de refroidissement est bien représentative des processus existant sur une fraction importante de l'ensemble de la surface de l'éprouvette.

La description théorique de l'établissement idéal du contact ne peut résulter d'une simple application de l'équation de la chaleur. Vernotte [7] a mis en relief ce qu'il appelle le "paradoxe de l'équation de la chaleur" qui conduit à considérer l'établissement de la température de contact entre les deux milieux comme rigoureusement instantané et le flux de chaleur à travers leur surface de contact comme infini. Ceci nous amène à considérer que l'origine des temps $t = 0$ se trouve reportée à l'instant où le contact est déjà établi.

On sait que, quand deux milieux d'effusivité thermique $E_1 = \sqrt{(\lambda_1 C_1 \rho_1)}$ et $E_2 = \sqrt{(\lambda_2 C_2 \rho_2)}$ sont brutalement portés l'un contre l'autre mais s'étendent à l'infini de part et d'autre de leur surface commune, la température de contact qui s'établit de façon instantanée et subsiste indéfiniment s'écrit :

$$\theta_{ci} = \frac{\theta_1 E_1 + \theta_2 E_2}{E_1 + E_2}. \quad (1)$$

Durée du régime initial. Bien que les milieux soient évidemment de dimensions limitées et que la durée de maintien de la température θ_{ci} soit nulle, le signal thermique créé sur la surface de contact de chacun d'eux atteint, à ses frontières une valeur si faible qu'elle est indécidable. Nous définissons donc, de façon certainement un peu arbitraire, la durée du régime initial de trempe par le temps t_i nécessaire pour que le signal thermique créé sur la surface de contact soit décelable par le point de mesure situé sur la frontière du milieu thermiquement le plus court. Dans le cas d'une éprouvette de forme cylindrique, c'est le milieu de l'axe qui constitue cette limite. Compte tenu de nos conditions expérimentales, nous admettons que le régime initial de trempe se termine quand la température du centre de l'éprouvette a baissé de 2°C.

L'apparition, sur la surface du contact, d'un signal thermique d'amplitude $T = \theta_0 - \theta_{ci}$ se vérifie de façon indirecte, en comparant la durée expérimentale du régime initial de trempe à celle que l'on calcule à partir de l'équation de la chaleur, à l'aide de la relation :

$$\theta(x, t) = T \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{(\alpha t)}} + \theta_{ci}. \quad (2)$$

La Fig. 1 représente les variations calculées de la durée t_i nécessaire pour que la température au centre d'un cylindre en nickel diminue de 2°C, lors de la trempe, depuis $\theta_0 = 900^\circ\text{C}$ dans de l'étain maintenu à $\theta_L = 300^\circ\text{C}$, d'une éprouvette en nickel recouverte d'oxyde NiO. Les quatre points expérimentaux viennent confirmer la bonne approximation que constitue

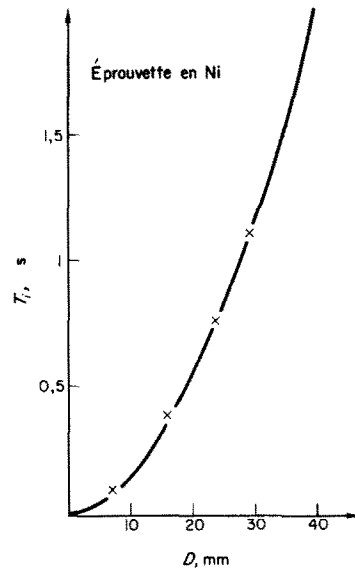


FIG. 1. Durée du régime initial en fonction du diamètre de l'éprouvette de forme cylindrique.

l'application de la relation (1) au cas de la trempe dans un liquide qui ne se vaporise pas.

Dans le cas de la trempe dans un liquide qui ne se vaporise pas, l'instant initial de la trempe est caractérisé par la quasi-invariance de la température de surface.

1.2 Instant initial de trempe dans un liquide qui se vaporise

Selon la valeur que prend θ_{ci} par rapport aux

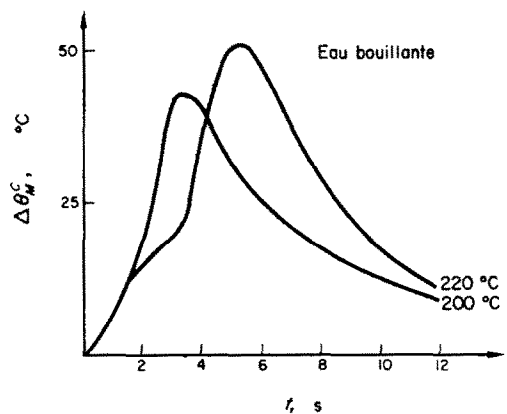


FIG. 2. Profil de la courbe de variations de l'écart de température en fonction du temps avec ($\theta_0 = 220^\circ\text{C}$) et sans ($\theta_0 = 200^\circ\text{C}$) caléfaction.

températures critiques de vaporisation du liquide, le refroidissement commence soit par la caléfaction, soit par l'ébullition nucléée.

1.2.1 Détermination des températures critiques de vaporisation. En mesurant, en fonction du temps, l'écart de température entre le centre de l'éprouvette et un point situé près de sa surface (1 mm), il est possible de mettre en évidence la formation d'un film de caléfaction. Dans le cas de l'eau bouillante (Fig. 2), si $\theta_0 < 200^\circ\text{C}$, on ne distingue aucun palier de caléfaction mais, dès que $\theta_0 > 220^\circ\text{C}$, on l'observe toujours. Une trempe depuis une température comprise entre ces deux valeurs donne des résultats peu reproductibles, la caléfaction pouvant ou non apparaître sous forme d'un film très fugace. Il existe donc deux températures initiales critiques T_i et T_s qui donnent, lors de la prise de contact de l'éprouvette avec l'eau, les températures superficielles L_i et L_s .

Trois cas pouvant se présenter :

1. $\theta_{ci} < L_i$ —l'ébullition nucléée s'établit dès l'instant initial de la trempe.
2. $L_i < \theta_{ci} < L_s$ —il peut s'établir un bref régime de caléfaction.
3. $\theta_{ci} > L_s$ —le régime de caléfaction apparaît dès l'instant initial.

Les valeurs critiques L_i et L_s de θ_{ci} caractérisent la trempe d'une éprouvette dans un liquide donné. Notons que pour l'eau bouillante on calcule, à l'aide de la relation 1 en prenant $T_i = 200$ et $T_s = 220$: $L_i \simeq 170$ et $L_s \simeq 190^\circ\text{C}$. Ces températures restent supérieures à celles qui sont mesurées en régime permanent [4].

1.2.2 Facteurs agissant sur les températures critiques de trempe (a) *Facteurs dépendant du liquide.* Ce sont, outre la nature même du liquide, d'une part sa température θ_L et, d'autre part, la nature et la concentration des substances dissoutes. Les Fig. 3 représentent les variations des températures critiques avec la température de l'eau pure (3 a) ou additionnée d'un sel (3 b). (b) *Facteurs dépendant de l'éprouvette.* Ses dimensions et sa forme ne doivent pas, en principe, avoir d'influence sur les propriétés de contact de l'éprouvette avec le liquide

à l'instant initial de la trempe. Seule intervient l'effusivité superficielle du solide. Les courbes de la Fig. 4 sont calculées, à l'aide de la relation du contact brusque, à partir des valeurs numériques de L_s relevées sur les droites de la Fig. 3 a.

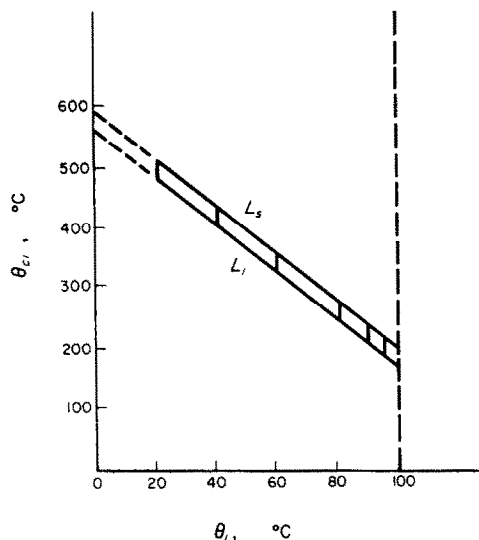
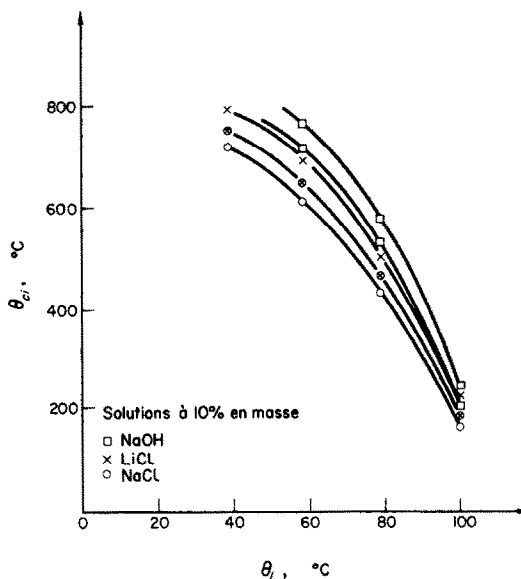


FIG. 3. Variations des températures L_i et L_s en fonction de la température du liquide.

(a) eau distillée



(b) solutions à 10 pour cent de NaOH, LiCl ou NaCl.

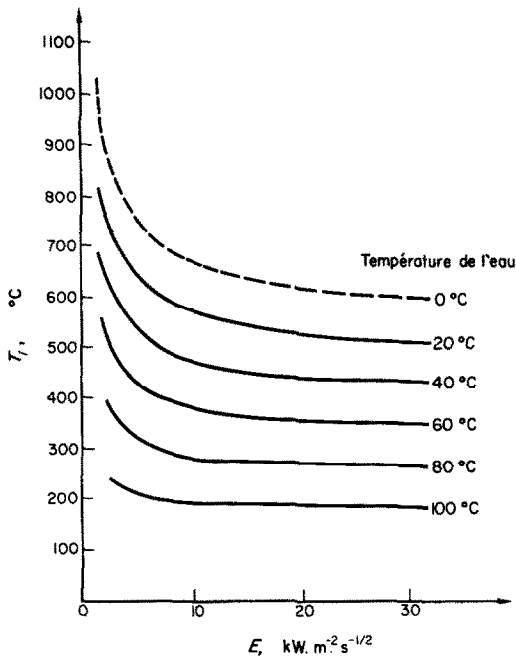


FIG. 4. Variations de la température initiale critique de trempe en fonction de l'effusivité de la surface solide, pour l'eau distillée.

1.3 Influence des conditions d'établissement du contact solide-liquide sur le processus de vaporisation

Il ressort, de la description qui précède, que l'ensemble du processus de refroidissement d'une éprouvette dans un liquide pouvant, comme l'eau, se vaporiser, est déterminé dès l'instant initial. On peut en particulier savoir avec une très bonne précision si, compte tenu des propriétés du système éprouvette-liquide, il se formera un film de caléfaction. De même, on peut provoquer ou éviter sa formation en modifiant l'un quelconque des facteurs intervenant dans la relation (1). On en déduit les conditions dans lesquelles il n'apparaît pas de caléfaction.

Il suffit pour cela que :

$$\theta_0 \leq \frac{L_s(E_s + E_L) - \theta_L E_L}{E_s} \quad (3)$$

Cependant, la température initiale est pratiquement toujours imposée, la seule possi-

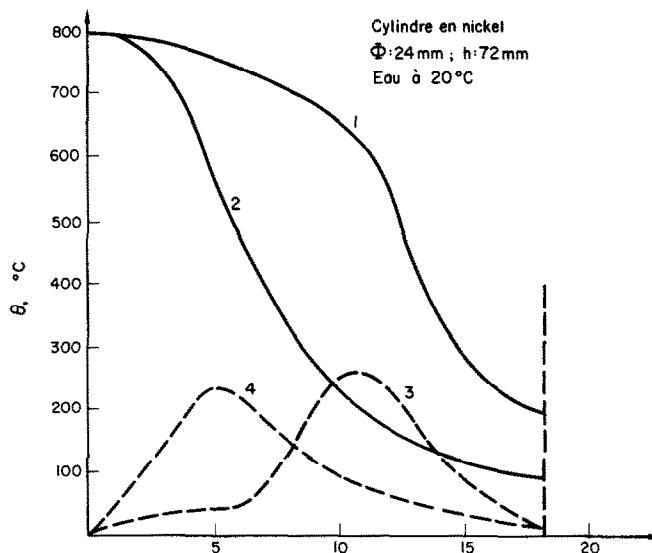


FIG. 5. Refroidissement du point situé au centre du cylindre:

- (1) nu
- (2) enrobé d'un film de 10 μm de silicate de sodium (écart de température entre centre et surface pour l'éprouvette)
- (3) nu
- (4) enrobé d'un film de 10 μm de silicate de sodium

bilité qui subsiste consiste à modifier l'effusivité superficielle de l'éprouvette pour qu'elle obéisse à la condition :

$$E_s \leq \frac{E_L(\theta_L - L_s)}{L_s - \theta_0} \quad (4)$$

Toute trempe dont le point représentatif est situé au dessus de la courbe correspondante de la Fig. 4 donnera lieu à la caléfaction.

Par exemple, une éprouvette en nickel, oxydée à l'air, dont les propriétés superficielles sont celles de l'oxyde NiO présente une effusivité $E = 5,15 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{s}^{\frac{1}{2}}$. Si on la trempe depuis 800°C dans de l'eau froide à 20°C ($E = 1,69$), il se forme un film de caléfaction qui dure environ 8 s dans le cas d'une éprouvette cylindrique de 24 mm de diamètre et 72 mm de hauteur. Il suffit de recouvrir cette éprouvette d'un film très mince (10 μm) de silicate de sodium ($E = 2,1$, pour que la condition (4) soit remplie, entraînant l'absence de film de caléfaction. C'est ce qui apparaît sur la Fig. 5 où la courbe (2) représente le refroidissement du centre de l'éprouvette couverte de silicate. La courbe (1) concerne l'éprouvette trempée sans dépôt. La comparaison des courbes (3) et (4) montre clairement que le dépôt de silicate élimine totalement le film de caléfaction.

En pratique, pour l'éprouvette recouverte, le refroidissement est plus rapide et plus régulier.

La même éprouvette trempée dans le même liquide peut donc donner lieu à des processus de vaporisation très différents qui dépendent de la seule effusivité de sa surface. Si elle est assez faible pour obéir à la condition (4), le mouillage de la surface subsiste pendant tout le refroidissement qui se produit alors par ébullition nucléée : la température moyenne de la surface décroît progressivement de la valeur θ_{ci} à la valeur θ_L .

Dans le cas contraire, si la surface solide est portée à l'instant initial à une température $\theta_{ci} > L_s$, le premier contact métal-liquide ne peut subsister car le gradient de température qui en résulte dans les couches superficielles de l'éprouvette apporte au liquide la quantité de chaleur suffisante pour former la couche de

caléfaction. Dès que la couche de vapeur se substitue au liquide, le flux de chaleur diminue brutalement et la température de la surface remonte rapidement de θ_{ci} vers une valeur voisine de θ_0 . L'écart de température qui, à l'instant initial, était partagé entre le solide et le fluide, se retrouve presque intégralement localisé dans la couche de vapeur.

Si la condition (4) n'a pu être remplie, le film de faible effusivité n'intervient plus sur le processus de refroidissement dans la mesure où sa faible épaisseur permet de négliger la résistance thermique qu'il constitue.

La description qui précède met en évidence le fait que la loi de refroidissement d'une éprouvette trempée est déterminée dès l'instant initial.

2. LE REFROIDISSEMENT

Selon que la condition (4) est ou non remplie, la courbe de refroidissement de l'éprouvette $\theta = f(t)$ présentera un simple maximum ou un maximum précédé d'un palier plus ou moins accentué. Bigot [8] appelle M les lois de refroidissement du premier type et P celles qui présentent un palier.

2.1 Mise en évidence de l'influence des propriétés de surface sur le refroidissement

Pendant le refroidissement, la distribution de la température dans les différents milieux suit, toujours et en chaque point, la loi de Fourier. Si la surface de l'éprouvette est recouverte par un dépôt faiblement conducteur, l'écart de température contenu dans le dépôt provoque un abaissement de la température superficielle qui lui permet d'atteindre la valeur critique de transition plus tôt qu'en l'absence de dépôt, quand la masse de l'éprouvette se trouve encore à une température plus élevée. Il en résulte une accélération de la fin du refroidissement par déplacement apparent vers les plus hautes températures du pic d'ébullition. Sur la courbe de refroidissement, on observe un régime de caléfaction de durée plus faible (Fig. 6). Le film très mince de faible effusivité, donc de

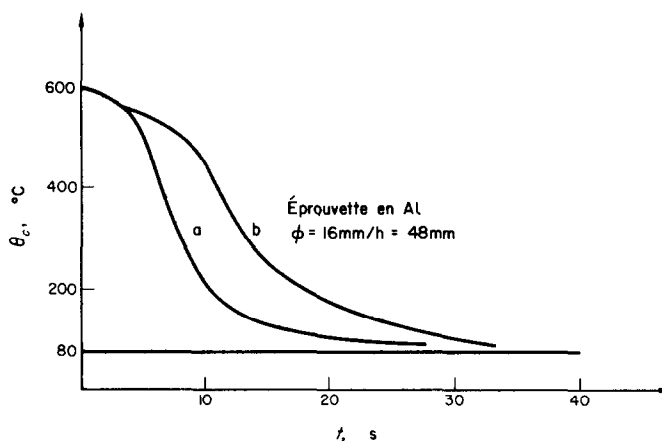


FIG. 6. Lois de refroidissement d'une éprouvette en aluminium chauffée sous vide (b) et à l'air (a).

faible λ , qui isole l'éprouvette du liquide intervient, en dehors de la condition (4), sur le refroidissement en abrégant le régime de caléfaction.

De même, le film de SiO_3Na_2 , épais de $10\text{ }\mu\text{m}$, que nous déposons sur l'éprouvette, possède une résistance thermique $R = e/\lambda$ de faible valeur. Son influence sur la courbe de refroidissement est inappréciable: il n'intervient pratiquement plus dès que la caléfaction est

établie. Pour étudier l'influence de la résistance thermique superficielle sur le refroidissement, il est nécessaire de réaliser un dépôt relativement épais et de choisir un liquide de trempe tel que la condition $\theta_0 > T_i$ soit toujours remplie.

L'azote liquide à -196°C répond à cette condition (9) pour des trempes réalisées depuis une température initiale voisine de l'ambiante, puisque sa température de transition est de -180°C .

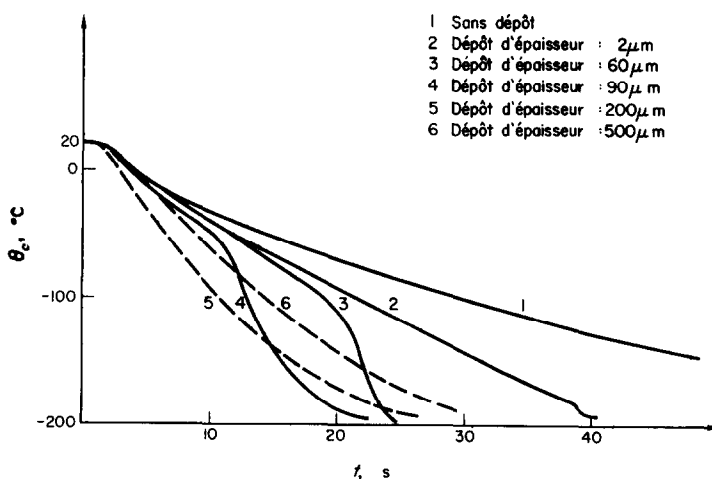


FIG. 7. Accélération du refroidissement à l'aide d'un dépôt de résine polymérisée lors de la trempe dans l'azote liquide.

L'augmentation de la résistance thermique superficielle provoque un déstabilisation de la caléfaction (Fig. 7):

- le refroidissement s'accélère et le coefficient h de passage de la chaleur augmente
- la température de transition augmente.

Le mode de vaporisation diffère d'autant plus de la caléfaction que la résistance R est plus importante. Nous convenons de l'appeler "ébullition larvée" (9) et le décrivons plus en détail dans la partie de cet article portant sur "l'effet de sel". Pour une certaine valeur R_c de R (résistance critique), la caléfaction, comme l'ébullition larvée, sont totalement supprimées, le refroidissement débutant par l'ébullition nucléée (Fig. 7). La Fig. 8 rassemble ces observa-

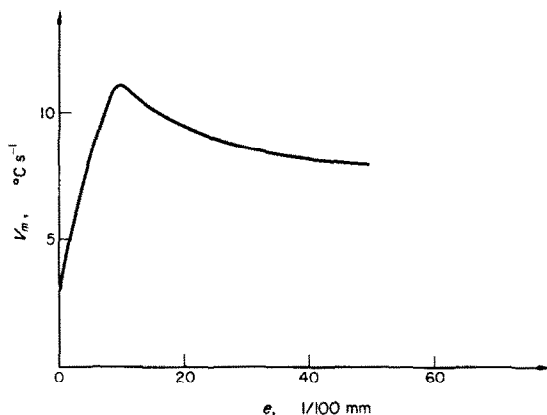


FIG. 8. Variations de la vitesse moyenne de refroidissement en fonction de la résistance thermique superficielle de l'éprouvette.

tions: la vitesse moyenne de refroidissement augmente jusqu'à la valeur critique R_c au delà de laquelle elle diminue très lentement.

Ebullition larvée. Lors du contact initial entre le solide et le liquide, la surface extérieure du dépôt atteint une température θ_{ci} telle que, dans le cas de l'azote liquide, la condition $\theta_{ci} > L_s$ est toujours remplie. Il se forme alors une couche de caléfaction. Le dépôt constitue un écran thermique où se localise la plus grande partie de l'écart de température $T = \theta_0 - \theta_{ci}$. Dès que la couche de vapeur apparaît, elle

absorbe la plus grande partie de l'écart T . La température θ_d de la surface de l'isolant remonte. Selon la loi de Fourier la densité de flux de chaleur à travers le dépôt diminue. Quand elle devient insuffisante pour entretenir l'équilibre dynamique entre la formation et la condensation de la vapeur, la caléfaction disparaît et le liquide revient brutalement mouiller localement la surface. La température θ_d chute; le flux de chaleur augmentant à travers l'isolant, la nouvelle quantité de vapeur formée reconstitue un film qui se détruit à nouveau selon le même processus.

C'est cette alternance locale de caléfaction et d'ébullition qui caractérise l'ébullition larvée.

La proportion de surface mouillée croît avec R tant que $R < R_c$. D'autre part, elle augmente tout au long du refroidissement par ébullition larvée: cela explique l'augmentation continue du coefficient h . Le gradient de température qui assure le transfert de la chaleur est ainsi localisé alternativement dans le dépôt et dans le film de vapeur.

Quand le dépôt présente une résistance telle que $R = R_c$, le nombre de cycles film de vapeur-surface mouillée est très limité.

La Fig. 9 montre que, dès la première seconde, la température θ_d de la surface du dépôt est voisine de θ_L alors que le centre de l'éprouvette est encore à la température initiale. L'écart $\theta_0 - \theta_d$ permet le passage à travers le dépôt d'un flux de chaleur élevé d'où résulte un refroidissement très rapide de l'éprouvette.

Influence de θ_0 . La stabilité du film de caléfaction, donc la résistance critique R_c , croissent avec la température θ_0 (Fig. 10). En fait, la grandeur physique qui contrôle le passage de la chaleur à travers le dépôt est sa diffusivité $\lambda/c\rho$, car ce dépôt participe au refroidissement en ajoutant sa chaleur sensible à celle de l'éprouvette. En outre, la conduction à travers un isolant diminue le flux de chaleur que peut évacuer l'ébullition nucléée. Ces effets conjugués limitent l'efficacité de l'ébullition nucléée et, à partir d'une valeur critique T_0 de θ_0 , le ralentissement lié à l'épaisseur de l'isolant sera

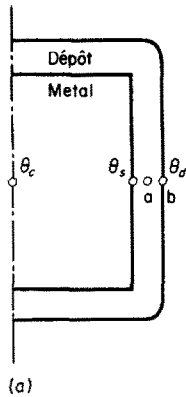


FIG. 9 (a). Schéma de la coupe longitudinale d'une éprouvette

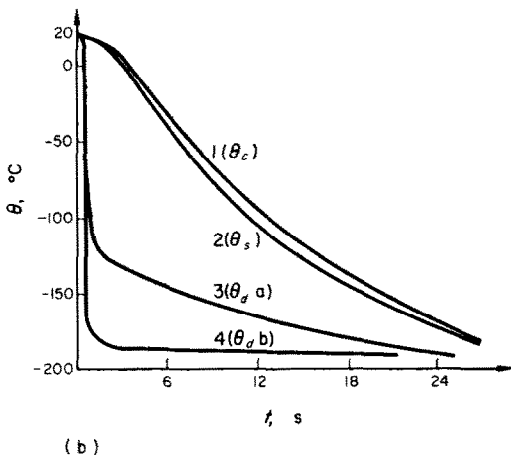


FIG. 9 (b). Variations de la température en différents points d'une éprouvette enrobée de 1 mm de résine polymérisée.

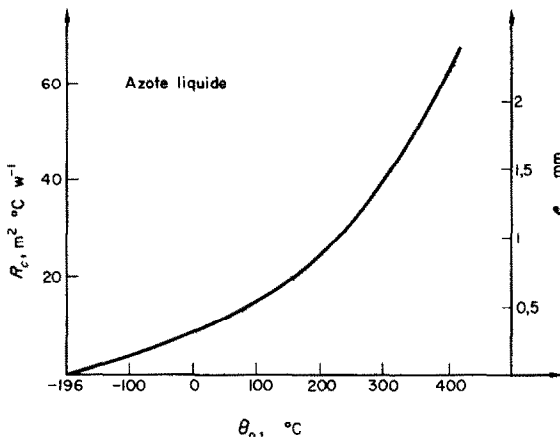
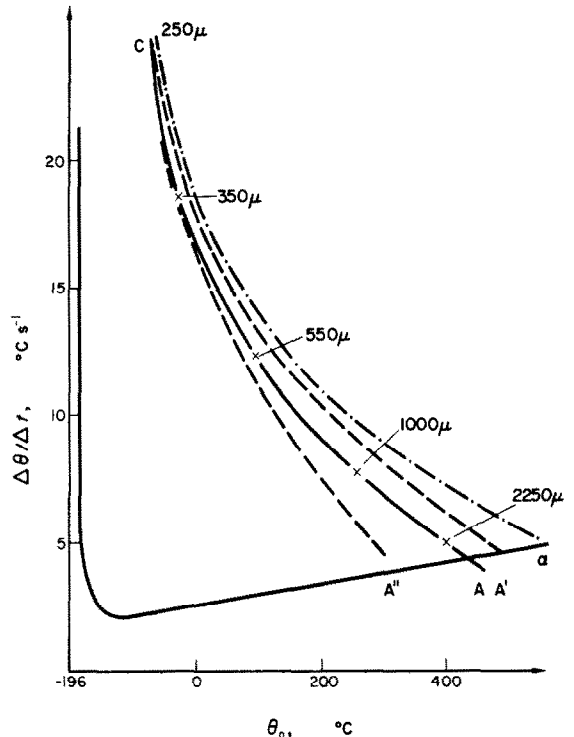


FIG. 10. Variations de la valeur critique de la résistance thermique en fonction de la température initiale de trempe.

FIG. 11. Trempe d'une éprouvette en nickel de $\phi = 10$ mm et $h = 10$ mm dans l'azote liquide. Variations de la vitesse moyenne de refroidissement pour :

AB : l'éprouvette nue pendant la caléfaction
 BC : l'éprouvette nue pendant l'ébullition nucléée
 AC : l'éprouvette enrobée d'anhydrite d'épaisseur $e = \lambda R_c$
 A'C et A''C : l'éprouvette enrobée d'un dépôt de conductivité différente de celle de l'anhydrite
 αC : l'éprouvette enrobée d'un dépôt idéal de conductivité thermique très faible.

plus important que l'accélération résultant de la substitution de l'ébullition nucléée à la caléfaction. La valeur de T_0 définit les limites dans lesquelles un film isolant peut accélérer le refroidissement par trempe. T_0 est une grandeur caractéristique du liquide de trempe et varie en fonction de la diffusivité $\lambda/c\rho$ du matériau qui constitue le dépôt (Fig. 11).

2.3 Extension au cas de la trempe à l'eau

L'ébullition larvée est observable lors de la trempe dans tout liquide vaporisable et, en particulier, dans le cas de la trempe à l'eau. Pratiquement, elle permet encore d'accélérer

le refroidissement lorsque la caléfaction est normalement inévitable du fait de l'impossibilité de trouver une substance applicable sous la forme d'un film superficiel dont l'effusivité E obéisse à la condition (4). C'est le cas de la trempe dans l'eau à 100° . Nous utilisons alors un dépôt d'anhydrite irréversible (plâtre de Paris recuit à une température supérieure à 300°C) dont la conductivité est voisine de $2.93 \cdot 10^{-5} \text{ W.m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, soit $E = 1.71 \text{ kW.m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{s}^{\frac{1}{2}}$ ce qui, dans le cas de l'eau à 100° donne $T_s^* = 380^\circ\text{C}$.

2.3.1 Influences des paramètres E et R quand $\theta_{ci} \simeq L_i$. Dans le cas de l'eau bouillante, deux cas sont à envisager : $-\theta_0 < 380^\circ\text{C}$: la caléfaction est supprimée quelle que soit l'épaisseur du dépôt car $\theta_{ci} < L_i$.

$-\theta_0 > 380^\circ\text{C}$: la couche de caléfaction se forme mais elle est aussitôt détruite si, bien que très faible, l'épaisseur du dépôt est suffisante. L'enregistrement des courbes de refroidissement ne montre aucune discontinuité lorsque la caléfaction est éliminée par E ou par R , bien que les mécanismes thermiques mis en jeu soient profondément différents.

La Fig. 12 définit l'existence des régimes de vaporisation pour la trempe, dans un liquide

donné, d'une éprouvette recouverte de dépôts d'épaisseurs croissantes. Les deux domaines de caléfaction et d'ébullition nucléée sont séparés par la courbe de variation de la température

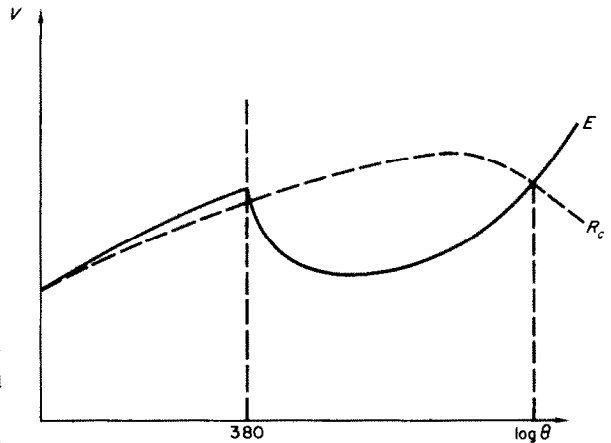


FIG. 13. Comparaison entre les vitesses moyennes obtenues à l'aide du dépôt de faible effusivité et du dépôt de résistance critique.

initiale critique θ_{0c} en fonction de l'épaisseur du dépôt. Sa partie horizontale $\theta_{0c} = T_i$ (dépôt) correspond au contact brusque et sa partie ascendante à la résistance thermique. On voit que, pour $e = 0$, $\theta_{0c} = T_i$ (métal). Cette représentation permet de déterminer l'épaisseur minimale

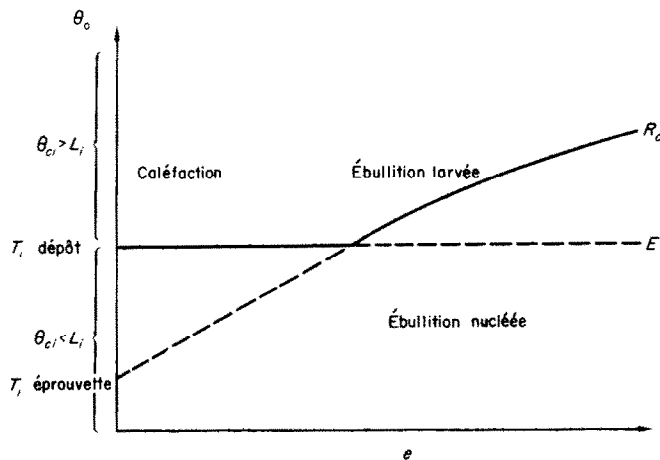


FIG. 12. Schéma indiquant le mode de vaporisation en fonction de la température initiale de trempe et de l'épaisseur du dépôt.

du dépôt qui permet d'assurer la vaporisation du liquide selon un processus d'ébullition nucléée, lors de la trempe d'une éprouvette depuis une température θ_0 .

La Fig. 13 permet de comparer les vitesses moyennes de refroidissement obtenues par un film isolant suivant qu'il intervient par son effusivité ou par sa résistance thermique.

2.3.2 Exemple d'application. La trempe présente une grande importance en métallurgie. Nous y avons donc cherché un exemple d'application en comparant les courbes en U obtenues par trempe dans l'eau à 70°C d'une pièce cylindrique en acier à 10 pour cent de C et 1,5

modifications de ses propriétés au cours du refroidissement. C'est en particulier le cas d'une éprouvette en nickel trempée depuis $\theta_0 = 700^\circ\text{C}$ dans une solution aqueuse à 10 pour cent de NaCl, portée à sa température d'ébullition. Elle se refroidit selon une loi de type P qui peut être comparée à celle que donne la trempe dans l'eau pure prise à l'ébullition. L'emploi d'une solution à l'ébullition permet d'une part d'éviter tout échauffement du liquide et, d'autre part, d'obtenir un refroidissement assez lent pour que soient étalés, dans l'échelle des temps, les différents modes de vaporisation, ce qui en facilite l'étude.

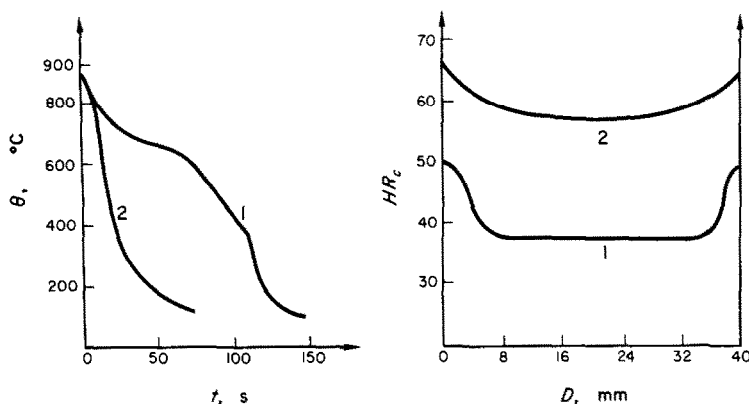


FIG. 14. (a) Comparaison entre les lois de refroidissement d'un point voisin de la surface d'une éprouvette nue (1) et enrobée de 1 mm d'anhydrite (2), trempées dans l'eau à 70°C. (b) variations de la dureté en fonction du diamètre pour l'éprouvette nue (1) ou enrobée (2).

pour cent de Cr, de 40 mm de diamètre, après un maintien de 45 min à 890°C. La pièce enrobée d'un film d'épaisseur critique présente une dureté superficielle de 64 HR_c contre 50 seulement pour la pièce non enrobée (Fig. 14 b). En outre, bien que la dureté à coeur de la pièce atteigne 57 HR_c et corresponde à une structure essentiellement martensitique, on n'y distingue aucune tapure.

2.4 Influence d'une précipitation à l'interface solide-fluide

La surface de l'éprouvette peut subir des

2.4.1 Etude des régimes de vaporisation.

2.4.1.1 Régime de caléfaction. Les courbes de la Fig. 15 montrent que le régime de caléfaction dans le cas des solutions ne diffère pas de celui qui existe dans l'eau pure (segment OA): nous déterminons dans l'un et l'autre cas un coefficient de transfert $h = 2,63 \cdot 10^{-6} \text{ W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. La présence dans le liquide d'un soluté qui ne se décompose pas à la température de trempe n'a donc pratiquement pas d'influence sur la valeur du coefficient de transfert h pendant la caléfaction.

Cependant, pour la même éprouvette, la

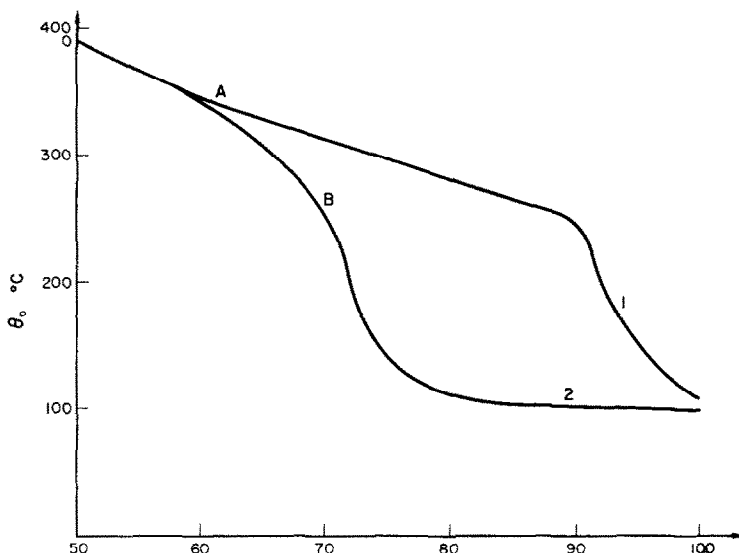


FIG. 15. Refroidissement d'une éprouvette en nickel de 16 mm de diamètre et 48 mm de hauteur, trempée depuis 700°.

(1) dans l'eau pure bouillante

(2) dans une solution bouillante à 10 pour cent de NaCl (la partie de la courbe entre 700 et 390 °C n'a pas été transcrite).

durée de la caléfaction est beaucoup plus courte dans le cas de la trempe dans l'eau salée que dans celui de la trempe à l'eau pure, la température de transition augmentant dans le cas de la solution.

2.4.1.2 Régime d'ébullition larvée. On observe à la fin de la caléfaction l'existence d'un nouveau régime de vaporisation qui précède l'ébullition nucléée. Il est représenté par la portion AB de la courbe de refroidissement (Fig. 15).

Dès la fin du régime de caléfaction, un film continu de sel recouvre la surface de l'éprouvette. D'épaisseur comprise entre 10 et 70 μm , il se conserve lorsqu'on retire brusquement l'éprouvette du bain (Fig. 16), mais il disparaît dès le début de l'ébullition nucléée. Ce mode de vaporisation se rattache à l'ébullition nucléée parce que des bulles de vapeur se forment, mais aussi à la caléfaction parce qu'elles ne quittent pas la surface. C'est pourquoi, nous avons proposé d'appeler ce mode de vaporisation "ébullition larvée" [9].

L'existence de l'ébullition larvée est due à

la présence de la pellicule de sel sur la surface.

Cette pellicule constitue une résistance thermique. L'éprouvette retirée du bain quand elle est recouverte de sel, puis trempée dans l'eau pure fait encore apparaître l'ébullition larvée (Fig. 17); mais ce régime apparaît plus

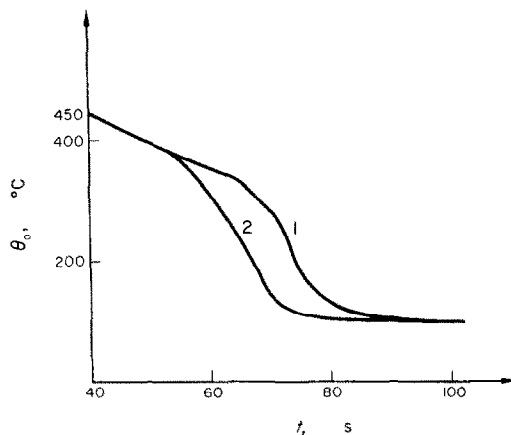


FIG. 17. Refroidissement d'une éprouvette en nickel trempée (1) dans une solution à 10 per cent de NaCl à l'ébullition (2) dans de l'eau pure, l'éprouvette étant recouverte de NaCl par ébullition larvée, lors d'une trempe précédente.

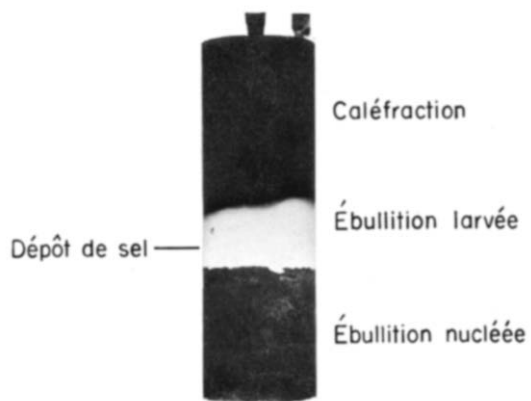


FIG. 16. Eprouvette retirée du bain pendant la transition.

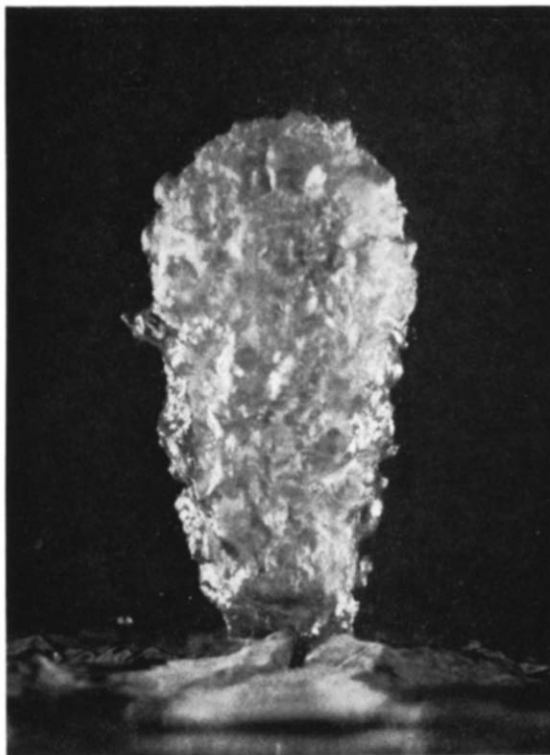


FIG. 18. Eprouvette à température uniforme pendant l'ébullition larvée.

tôt parce que la couche de sel préexiste. Il constitue une sorte de révélateur de l'anisothermie superficielle de l'éprouvette qui permet d'étudier la forme d'une éprouvette dont la surface est à une température uniforme pendant tout le refroidissement (Fig. 18).

Hypothèse sur la nature de l'ébullition larvée.

Pendant le régime de caléfaction, une masse d'eau appréciable est vaporisée, ce qui provoque une augmentation de la concentration de la solution au voisinage de l'éprouvette. Quand la saturation est atteinte à l'interface vapeur-liquide, des cristaux de sel apparaissent qui se déposent sur la surface.

Ce mode de vaporisation ne se produit qu'après une caléfaction prolongée. C'est ainsi que, dans le cas des solutions salines, il n'apparaît jamais à l'instant initial, lors du brusque contact entre l'éprouvette métallique et la solution.

2.4.1.3 Régime d'ébullition nucléée. Il apparaît à la fin du régime d'ébullition larvée. La couche de sel se dissout dans la solution. On observe une vitesse maximale de refroidisse-

ment supérieur à celle qui apparaît dans le cas de l'eau pure.

2.4.2 Influence de la concentration en sel sur la loi de refroidissement de l'éprouvette. Quelle que soit la concentration de la solution, nous déterminons pendant la caléfaction le même coefficient h de transfert de la chaleur que dans le cas de l'eau pure. Cependant, plus la concentration augmente, plus la caléfaction est brève. L'épaisseur de la couche de sel, donc sa résistance thermique augmentent et l'ébullition larvée apparaît moins nettement sur la courbe car la résistance thermique atteint une valeur suffisante pour amortir le signal thermique correspondant.

2.4.3 Influence de la nature chimique du soluté. Les lois de refroidissement d'une éprouvette en nickel trempée depuis $\theta_0 = 700^\circ\text{C}$ dans des solutions aqueuses, portées à l'ébullition, de NaCl, KCl, LiCl et NaOH mettent en évidence que, pour une concentration donnée, plus le soluté est soluble dans l'eau, plus la durée de la caléfaction est brève (Fig. 19).

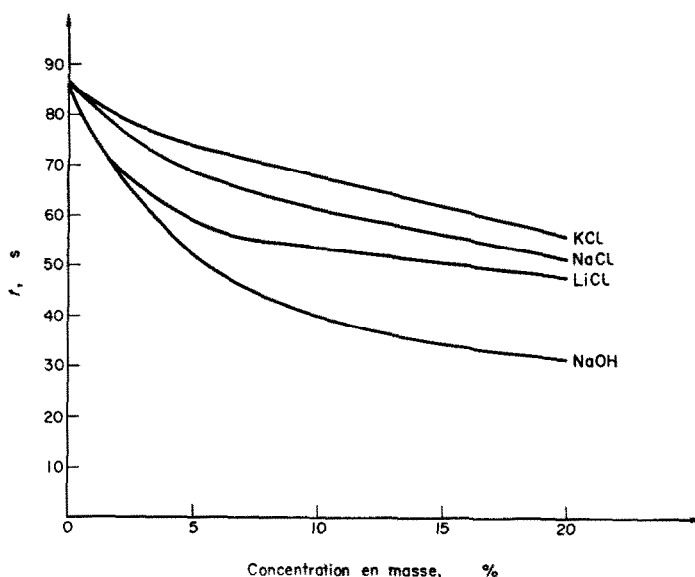


FIG. 19. Variations de la durée de la caléfaction en fonction de la nature et de la concentration du sel.

CONCLUSIONS

Les propriétés thermiques de la zone superficielle comprise entre le métal et le fluide jouent un rôle déterminant sur l'ensemble du processus de transfert de la chaleur entre le métal et le liquide. Ces zones interviennent par leur effusivité et par leur diffusivité.

L'effusivité intervient à l'instant initial lors de l'établissement du régime de vaporisation. La résistance thermique de contact solide-fluide doit être négligeable. On peut appliquer ce principe en déposant sur la surface de l'éprouvette un film d'une substance d'effusivité calculée pour permettre ou non l'apparition de la caléfaction.

La résistance thermique des zones superficielles introduit la diffusivité. En réalisant un dépôt dont l'épaisseur permet de leur conférer une résistance déterminée, on s'affranchit du choix entre l'ébullition nucléée et la caléfaction en instaurant un mode de vaporisation différent : l'ébullition larvée.

L'emploi d'un dépôt pouvant modifier le processus de vaporisation par son effusivité constitue une solution radicale. En effet, si l'effusivité superficielle de l'éprouvette remplit la condition que nous indiquons, la caléfaction est éliminée. Sinon, la loi de refroidissement n'est que très peu modifiée.

Au contraire, l'action de la résistance superficielle sur l'échange de chaleur est progressive car elle substitue, aux modes normaux de vaporisation, l'ébullition larvée dont l'efficacité varie, selon la valeur de R , de façon continue

entre celles de l'ébullition nucléée et de la caléfaction.

Enfin, l'influence bénéfique des sels dissous dans l'eau sur son pouvoir trempant était connue des métallurgistes depuis très longtemps. Nous en donnons l'interprétation thermocinétique : un effet modéré de résistance thermique dû à la précipitation du sel permet d'accélérer le refroidissement de façon sensible.

REFERENCES

1. LEIDENFROST, De aquae communis nonnullis proprietatibus tractatus, Duisbourg (1756).
2. S. NUKIYAMA, *J. Soc. Mech. Engrs (Japan)* **37**, 367-374 (1934).
3. A. E. BERGLES and W. G. THOMSON JR., The relationship of quench data to steady state pool boiling data, *Int. J. Heat Mass Transfer* **13**, 55-68 (1970).
4. G. BECK et J. C. CHEVRIER, Comparaison des données de trempe, déterminées à l'aide d'une méthode numérique, à celles du régime permanent, *Int. J. Heat Mass Transfer* **14**, 1731-1745 (1971).
5. G. BECK, Contribution à l'étude thermocinétique du régime initial de trempe des métaux et alliages, *Revue Générale de Thermique* n° 109, pp. 37-44 (janv. 1971).
6. R. BIGOT, Thèse Docteur-Ingénieur, Nancy (1962).
7. P. VERNOTTE, Les paradoxes de l'équation continue de la chaleur, *C.R. Acad. Sci.* **246**, 3154-3156 (1958).
8. R. BIGOT, Sur le classement des lois de refroidissement obtenues par immersion de pièces métalliques dans les liquides de trempe, *C.R. Acad. Sci.* **256**, 162-164 (1963).
9. F. MOREAUX et G. BECK, Sur l'existence d'un mode particulier de vaporisation lors de la trempe d'une éprouvette métallique dans une solution aqueuse de chlorure de sodium, *C.R. Acad. Sci.* **268 C**, 1209 (1969).
10. J. C. CHEVRIER et G. BECK, Influence d'un dépôt de faible conductivité thermique sur le mécanisme de refroidissement par trempe d'une éprouvette métallique dans l'azote liquide, *Mém. Scient. Revue Metall.* **68**(6), 391-400 (1971).

THE EFFUSIVITY AND THE THERMAL RESISTANCE OF THE SUPERFICIAL ZONES OF THE SOLID DETERMINE THE VAPORIZATION PROCESS OF THE LIQUID IN QUENCHING CONDITIONS

Abstract—We define the conditions required to obtain film boiling and examine when we are able to modify those conditions, which will permit us to create this film boiling or to avoid it. Besides, a quite unusual mode of vaporization makes itself evident: a "miscarried" ebullition whose characteristics vary steadily from film boiling to nucleate boiling, according to the value of the superficial thermal resistance.

DIE TEMPERATURLEITFÄHIGKEIT UND DER THERMISCHE WIDERSTAND
DER OBERFLÄCHENZONEN DES FESTKÖRPERS ZUR BESTIMMUNG DES VERDAMP-
FUNGSPROZESSES UNTER ABSCHRECKBEDINGUNGEN

Zusammenfassung—Wir definieren die erforderlichen Bedingungen, um Filmsieden zu erhalten und prüfen ob es möglich ist, diese Bedingungen so zu modifizieren, dass sie uns erlauben Filmsieden zu erzeugen oder zu verhindern. Daneben tritt eine sehr ungewöhnliche Art der Verdampfung auf: ein "transientes" Sieden, dessen Charakteristiken ständig vom Film-zum Blasensieden wechseln, je nach dem Wert des thermischen Widerstandes der Oberfläche.

ЭФФУЗИЯ И ТЕРМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ
ЗОН ТВЁРДОГО ТЕЛА, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПРОЦЕСС ИСПАРЕНИЯ
ЖИДКОСТИ В УСЛОВИЯХ ГАШЕНИЯ

Аннотация—Определяются необходимые условия возникновения пленочного кипения, анализируются условия, которые позволяют избегать пленочного кипения.