

Effet d'un champ électrique sur la croissance d'une bulle.

Benoît GAY, Serge CIOULACHTJIAN*, Monique LALLEMAND

CETHIL, INSA-Lyon, UMR 5008

Bât. Sadi Carnot, INSA, 20 av. Albert Einstein - 69621 VILLEURBANNE Cedex

* (auteur correspondant : serge.cioulachtjian@insa-lyon.fr)

Résumé - La croissance d'une bulle de vapeur isolée sous un champ électrique continu (entre 1 et 60 kVcm⁻¹) est étudiée expérimentalement dans les conditions de saturation. Les grandeurs géométriques caractéristiques de la bulle sont obtenues à l'aide d'une caméra rapide et d'un traitement d'images adapté. L'effet du champ électrique se traduit par une déformation de la bulle au cours de sa croissance, par une intensification des mouvements convectifs au sein du liquide et par une amélioration des échanges thermiques.

Nomenclature

E champ électrique, Vm⁻¹
 t_d temps au détachement, s
 T_{sat} température de saturation, °C

V_d volume au détachement, m³
 ΔT_{sat} surchauffe de la paroi, K

1. Introduction

L'ébullition nucléée correspond au changement de phase associé à la formation de bulles de vapeur sur des microcavités d'une paroi chauffée. Un germe de vapeur se forme à l'intérieur d'un site de nucléation, puis la bulle croît au-dessus de la paroi. Les échanges de chaleur s'effectuent à l'interface entre la bulle et le liquide surchauffé, principalement à travers la microcouche de liquide qui se vaporise à sa base [1]. Lorsque la bulle se détache, elle engendre des mouvements convectifs autour d'elle, qui intensifient les échanges thermiques par l'apport de liquide froid qui remouille la paroi. Par conséquent, la croissance rapide d'une bulle et son détachement conduisent à une destruction permanente de la couche limite thermique avec des mouvements de micro-convection intenses.

L'application d'un champ électrique E permet d'augmenter les échanges thermiques en ébullition nucléée [2]. Afin d'identifier et de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu dans les phénomènes électrohydrodynamiques (EHD), une étude a été réalisée sur des bulles isolées soumises à un champ électrique continu. Ce dispositif expérimental permet de s'affranchir des interactions entre des bulles issues de sites de nucléation voisins.

2. Dispositif expérimental

Le dispositif est constitué d'une cuve parallélépipédique étanche (250 x 250 x 180 mm³) en aluminium, remplie de n-pentane (pureté 99 %). Trois des faces latérales de la cuve sont équipées de hublots permettant d'observer l'ébullition (figure 1). En plus de son caractère non toxique, le n-pentane permet de travailler dans des conditions de température et de pression facilement accessibles ($T_{sat} = 35,7^\circ\text{C}$ à 1 bar). C'est un fluide non polaire de permittivité diélectrique relative égale à 1,8 pour la phase liquide et proche de 1 pour la phase vapeur. Une résistance chauffante régulée par un système PID permet de maintenir le bain de pentane dans les conditions de saturation imposées.

L'échantillon cylindrique en cuivre a un diamètre de 20 mm dans sa partie inférieure et de 5 mm dans sa partie supérieure. Il comporte à sa base une cartouche chauffante de 100 W (figure 2). Un disque en cuivre, d'environ 100 μm d'épaisseur et de 18 mm de diamètre, est soudé sur la face supérieure de ce cylindre. Ce disque, poli pour éviter la présence de sites de nucléation parasites, constitue la paroi chauffée en contact avec le liquide. L'échantillon est isolé latéralement par du téflon[®]. La tige en cuivre concentre le flux thermique au centre de la paroi afin d'obtenir de fortes surchauffes au niveau du site de nucléation et de s'affranchir de sites parasites en périphérie. Le site artificiel, réalisé par indentation mécanique, est conique (angle au sommet d'environ 15°, diamètre d'ouverture 180 μm). Ainsi l'ébullition est générée à partir d'un site de nucléation unique, au centre du disque en cuivre, qui constitue l'électrode reliée à la masse. Une grille circulaire de 50 mm de diamètre, reliée à la haute tension et placée au-dessus de la surface chauffée, constitue l'autre électrode alimentée en courant continu. L'utilisation d'une grille permet d'évacuer les bulles de vapeur qui pourraient s'accumuler sous l'électrode et former une couche continue de vapeur qui créerait des fluctuations du champ électrique. Cinq thermocouples (type K), de diamètre 120 μm , sont placés le long de la tige de cuivre afin de déterminer le flux thermique transféré au pentane et la température de la paroi. La température de la paroi sous le site est calculée par extrapolation du profil de température dans la tige de cuivre. La densité de flux thermique est déterminée à l'aide de la loi de Fourier en supposant le flux unidirectionnel. La surchauffe ΔT_{sat} est définie comme la différence entre la température de la paroi calculée et la température de saturation du n-pentane mesurée.

La distance entre les électrodes planes est réglée dans les essais soit à 11 mm, soit à 5,5 mm pour obtenir des champs électriques plus intenses. La différence de potentiels varie entre 0 et 30 kV. Le champ électrique E , défini comme le rapport entre la tension appliquée et la distance entre les électrodes, varie entre 0 et 55 kVcm^{-1} . Cette valeur de E permet de caractériser les conditions opératoires.

3. Procédure expérimentale

Après réalisation d'un vide primaire, la cuve est remplie de n-pentane. Différents dégazages sont effectués avant chaque manipulation pour évacuer les gaz incondensables éventuellement présents. Le bain est porté à la température correspondant aux conditions de saturation choisies. Lorsque l'équilibre est atteint, l'échantillon est chauffé progressivement afin de déclencher l'ébullition sur le site de nucléation. La puissance fournie à l'échantillon est ensuite réduite jusqu'à être environ 10 % supérieure à la plus faible valeur pour laquelle le site de nucléation reste actif.

La visualisation des bulles est effectuée par visée latérale à l'aide d'une caméra rapide, utilisée à 10000 images par seconde. Le grossissement optique utilisé permet d'obtenir une résolution de 23*23 μm^2 par pixel. Afin d'obtenir la taille précise des bulles lors de la visualisation et du traitement d'images, une mire de 1,75 mm de diamètre est positionnée sur l'échantillon. Un gradient de température dans le fluide engendre un gradient d'indice de réfraction qui déforme le trajet des rayons lumineux. Pour éviter que les rayons lumineux, reçus par la caméra, ne traversent une trop grande zone à fort gradient d'indice dans la couche limite thermique, la caméra est inclinée d'un angle de 10° par rapport à l'horizontal. Cela réduit l'erreur dans le mesurage des grandeurs géométriques des bulles. L'erreur de projection engendrée par cette visée inclinée (~ 1,5 %) reste faible devant l'erreur commise par la pixellisation des images (entre 3 et 10 % selon la taille de la bulle). Ainsi une visée inclinée permet de mieux visualiser la base de la bulle (figure 3).

4. Résultats expérimentaux

4.1. Effet du champ électrique

Les deux images de la figure 4 ont été réalisées à 2 ms d'intervalle, pour des conditions de convection naturelle. En présence d'un champ électrique (figure 4.b), on constate du fait des gradients d'indice de réfraction une augmentation des mouvements convectifs. Les échanges thermiques sont donc intensifiés par l'effet EHD. L'application du champ électrique permet ainsi de diminuer ΔT_{sat} à flux thermique imposé. Lorsque l'on fixe ΔT_{sat} , l'augmentation du champ électrique au sein du fluide permet d'augmenter le flux échangé à la surface de l'échantillon. Pour $\Delta T_{\text{sat}} = 4 \text{ K}$, la figure 5 montre une évolution linéaire du flux en fonction de E . Pour $E = 25 \text{ kVcm}^{-1}$, l'échange thermique est trois fois plus élevé qu'en absence de champ électrique. En fait, l'ébullition à partir d'un site de nucléation unique participe peu à cette amélioration des échanges thermiques, car la chaleur échangée par changement de phase ne correspond qu'à quelques pourcents de la chaleur totale échangée, le reste étant dû aux échanges convectifs. Pour une surface multisites, il a été montré qu'en ébullition l'application d'un champ électrique accentue cette amélioration [2, 3, 4].

4.2. Détachement des bulles et coalescence sous champ électrique

Pour $E < 40 \text{ kV.cm}^{-1}$, le rayon de base de la bulle reste constant et égal au rayon d'ouverture du site de nucléation lors de sa croissance. Pour un champ électrique supérieur, on observe que la bulle peut se libérer du site de nucléation et glisser sur la paroi. La bulle reste alors en contact avec la paroi mais son rayon de base diminue fortement.

Lors du détachement d'une bulle du site de nucléation, la rupture du pied laisse un germe de vapeur dans le site de la paroi. Ce germe de vapeur croît rapidement dans le site et une nouvelle bulle se développe. Après la rupture du pied, la bulle oscille légèrement et des ondes parcourent sa surface au début de son ascension (figure 6). Ces oscillations sont renforcées en présence de forts champs électriques du fait de la déformation des bulles, étirées verticalement [5]. Pour $E < 10 \text{ kVcm}^{-1}$, la forme des bulles reste quasiment sphérique [6]. Pour $E > 30 \text{ kVcm}^{-1}$, le rapport hauteur sur largeur des bulles au détachement est supérieur à deux. Après détachement, la forme de la bulle se stabilise assez rapidement lorsque la bulle atteint sa vitesse terminale d'ascension. Le temps d'attente entre deux bulles, de l'ordre de 1 à 2 ms, est très court comparé aux temps de croissance qui varient entre 50 et 150 ms. La fréquence des bulles est de l'ordre de 10 Hz.

Pour une surchauffe plus élevée (de l'ordre de 10 K), la bulle sur le site de nucléation croît rapidement et elle peut coalescer avec la bulle précédente, encore en oscillation. La bulle supérieure peut continuer à croître par coalescences successives de plusieurs petites bulles. Cette coalescence déforme l'ancienne bulle qui présente alors de fortes oscillations et des ondes sur son interface (figure 7). L'augmentation du champ électrique modifie les forces interfaciales. Pour de forts champs électriques on peut observer une répulsion entre deux bulles qui se poussent l'une l'autre sans qu'il y ait coalescence [7].

4.3. Evolution de la croissance de la bulle en fonction du champ électrique

Afin d'observer l'évolution géométrique des bulles en fonction de l'intensité du champ électrique, plusieurs essais à ΔT_{sat} constant ont été effectués. Une faible surchauffe a été imposée entre 4 K et 5 K pour éviter toute coalescence verticale. La vitesse de croissance des bulles dépend de la valeur du ΔT_{sat} choisie. Bien que l'hypothèse de sphéricité de la bulle ait largement été utilisée dans la littérature pour sa simplicité, d'autres profils plus précis ont parfois été retenus. A. Vazquez [8] a par exemple choisi des profils d'ovale de Cassini ou de

lemniscate de Bernoulli. L'hypothèse d'axisymétrie d'une bulle est toujours retenue dans des milieux peu agités. Les profils elliptiques, utilisés notamment par Lee et al. [9], sont aussi très adaptés pour décrire la forme d'une bulle. Une asymétrie verticale peut être représentée à l'aide de deux demi-ellipses ayant un diamètre équatorial commun. La demi-ellipse inférieure est tronquée pour former la base de la bulle.

A partir des images numériques obtenues avec la caméra rapide, le contour des bulles est identifié par un traitement de l'image qui comporte trois étapes (figure 8). L'image en niveau de gris est d'abord filtrée par seuillage pour accentuer les contrastes. Ensuite, une reconnaissance de contour est réalisée par identification des forts gradients de niveau de gris. Enfin, le contour de la bulle est isolé. A partir de ce profil de bulle, les grandeurs géométriques de la bulle sont identifiées avec un modèle à deux demi-ellipses. Le centre de l'ellipse est positionné au centre de la zone de plus grande largeur. Afin de valider le modèle, le volume de la bulle est calculé de deux manières : d'une part, à partir du contour réel de la bulle sur l'image et d'autre part, à partir du profil donné par le modèle (valeurs moyennées sur dix bulles consécutives). L'écart entre les deux méthodes reste inférieur à 5 %.

Expérimentalement, l'évolution temporelle du volume des bulles est pratiquement linéaire (figures 9, 10, 11). Pour $\Delta T_{\text{sat}} = 4 \text{ K}$ et E variant entre 0 et 28 kVcm^{-1} , la vitesse de croissance de la bulle est constante et égale à $6 \pm 0,5 \text{ mm}^3 \text{ s}^{-1}$ (figures 9, 10). Elle est également constante mais plus élevée ($13 \pm 0,9 \text{ mm}^3 \text{ s}^{-1}$) pour $\Delta T_{\text{sat}} = 5 \text{ K}$ (figure 11). Ainsi, la présence du champ électrique modifie peu la vitesse de vaporisation. A surchauffe constante, l'augmentation du champ électrique a pour effet d'augmenter le volume au détachement des bulles (figure 12), ce qui se traduit par une diminution de la fréquence. La bulle reste plus longtemps sur la paroi avec un champ électrique intense.

5. Conclusion

Ces travaux ont permis de montrer l'influence d'un champ électrique sur une bulle isolée de pentane. L'évolution temporelle du volume d'une bulle est pratiquement linéaire lors de sa croissance. Le champ électrique influence peu la vitesse de croissance d'une bulle isolée, constante pour une surchauffe donnée. En revanche, il entraîne un étirement vertical des bulles et une augmentation du volume au détachement. En présence d'un champ électrique les bulles sont maintenues plus longtemps sur la paroi. Leur fréquence d'émission diminue. Pour une surchauffe de la paroi élevée, des bulles émises successivement ont tendance à coalescer. Cela entraîne des instabilités avec de fortes oscillations des bulles. Pour une bulle isolée, les échanges thermiques sont notablement améliorés, principalement du fait des mouvements électroconvectifs.

Références

- [1] M. G. Cooper, A. J. P. Lloyd, The microlayer in nucleate boiling, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 12 (1969) 895-913
- [2] M. C. Zaghoudi, S. Cioulachtjian, M. Lallemand, EHD enhancement of pool boiling of pentane on a horizontal copper surface, *Two-phase flow modelling and experimentation*, Edizioni ETS (1995)
- [3] M. C. Zaghoudi, M. Lallemand, Study of the behaviour of a bubble in an electric field: steady shape and local fluid motion, *Int. J. Therm. Sci.*, 39-1 (2000) 9-52
- [4] T. G. Karayiannis, M. W. Collins, P. H. G. Allen, Electrohydrodynamic enhancement of nucleate boiling heat transfer in heat exchangers, *J. Chem. Eng. Commun.*, 81 (1989) 15-24
- [5] E. Iacona, C. Herman, S. Chang, Z. Liu, Electric field effect on bubble detachment in reduced gravity environment, *Thermal Sciences*, 3 (2004) 581-586
- [6] M. C. Zaghoudi, M. Lallemand, An analysis of the steady shape of a bubble in an electric field, *Int. J. Transport Phenomena*, 2 (2000) 9-26

- [7] Z. Liu, C. Herman, D. Mewes, Visualisation of bubble detachment and coalescence under the influence of nonuniform electric field, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 31-2 (2006) 151-163
- [8] A. Vasquez, R. M. Sanchez, E. Salinas-Rodriguez, A. Soria, R. Manasseh, A look at three measurement techniques for bubble size determination, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 30 (2005) 49-57
- [9] H. C. Lee, B. D. Oh, S. W. Bae, M. H. Kim, Single bubble growth in saturated pool boiling on a constant wall temperature surface. *Int. J. Multiphase Flow*, 29 (2003) 1857-1867

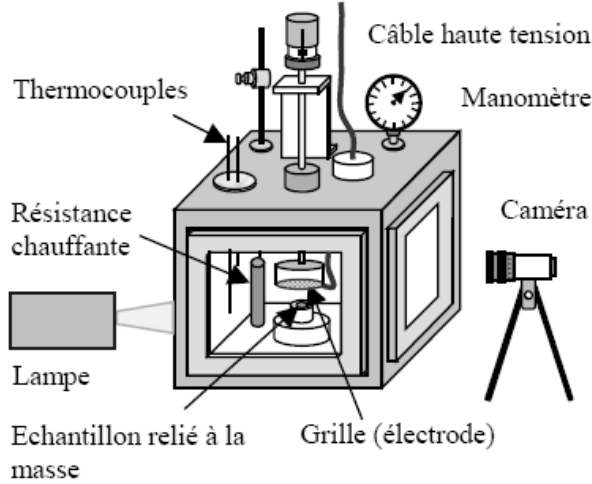


Figure 1 : Dispositif expérimental

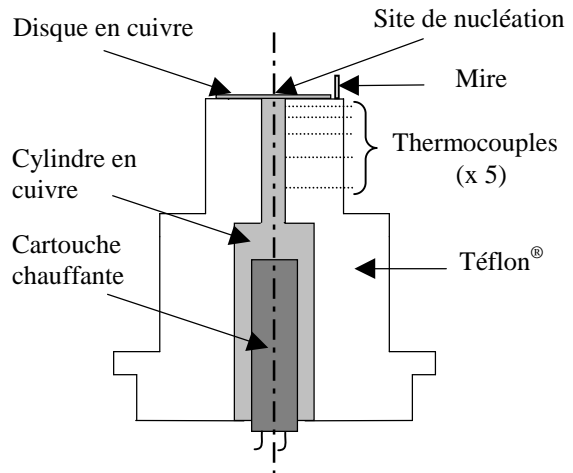


Figure 2 : Coupe de l'échantillon

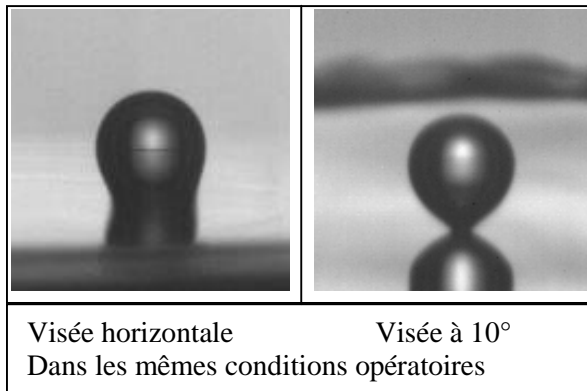


Figure 3 : Bulles au détachement pour deux inclinaisons de visées de caméra

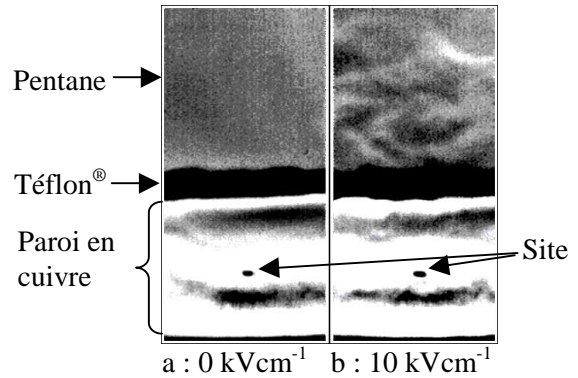


Figure 4 : Mise en évidence des mouvements électroconvectifs par visualisation des gradients d'indice dans le liquide

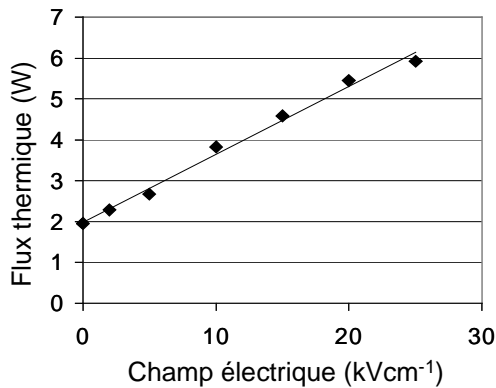


Figure 5 : Evolution du flux thermique pariétal en fonction de E pour $\Delta T_{\text{sat}} = 4 \text{ K}$

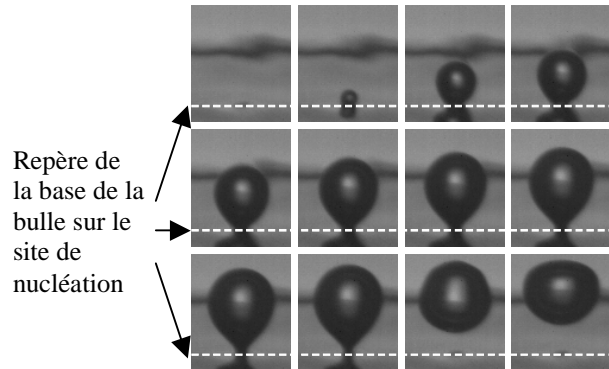


Figure 6 : Croissance et détachement d'une bulle pour $E = 15 \text{ kVcm}^{-1}$ et $\Delta T_{\text{sat}} = 4 \text{ K}$ (séquence de 77 ms)

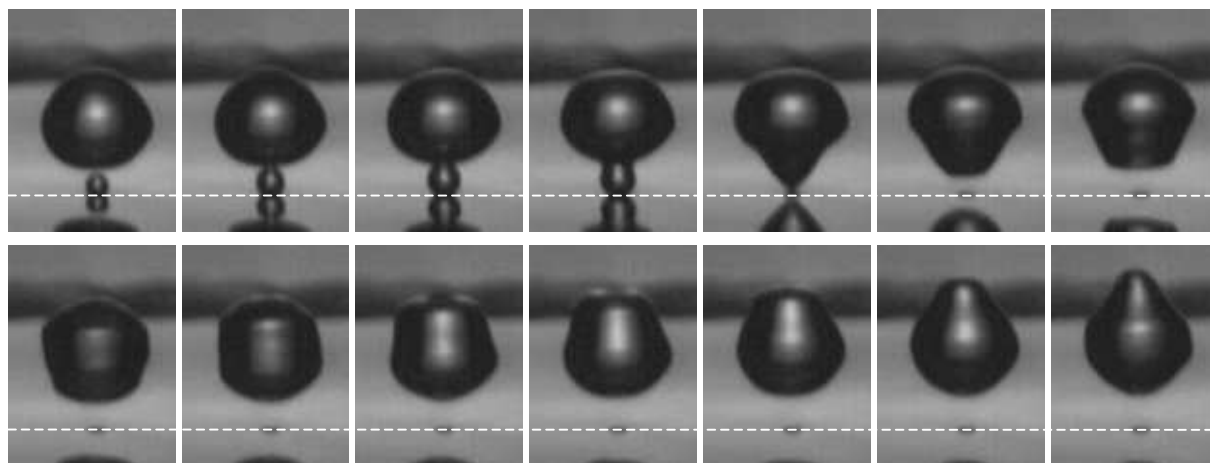


Figure 7 : Visualisation sur 14 ms des oscillations d'une bulle après coalescence verticale

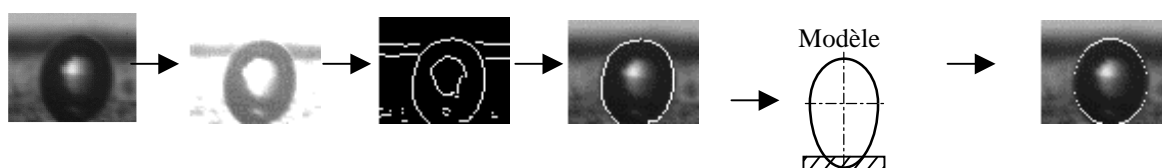


Figure 8 : Etapes du traitement d'image et modélisation du contour par un profil à deux demi ellipses

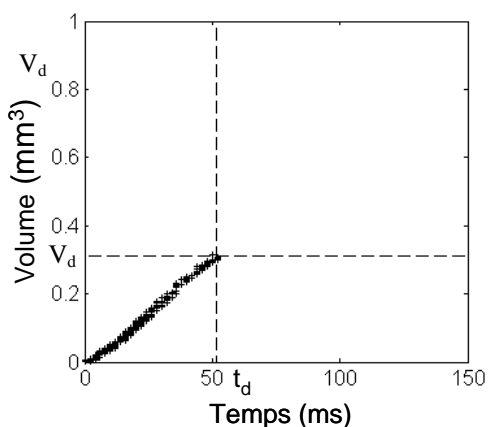


Figure 9 : Volume d'une bulle sans champ électrique, $\Delta T_{sat} = 4 K$

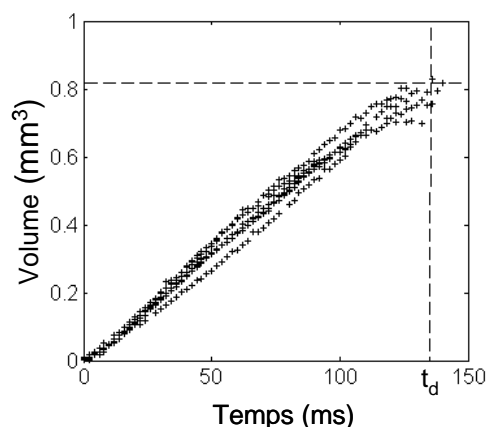


Figure 10 : Volume d'une bulle sous un champ électrique, $E = 28 \text{ kVcm}^{-1}$, $\Delta T_{sat} = 4 K$

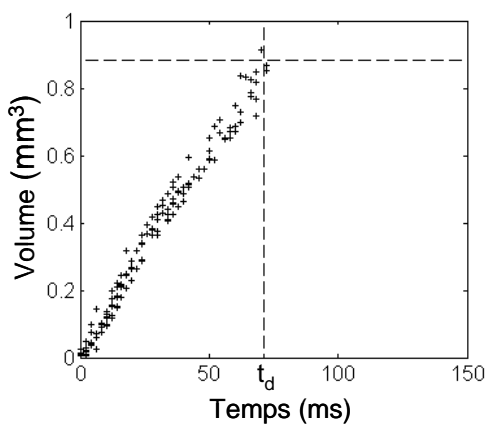


Figure 11 : Volume d'une bulle sous un champ électrique, $E = 34 \text{ kVcm}^{-1}$, $\Delta T_{sat} = 5 K$

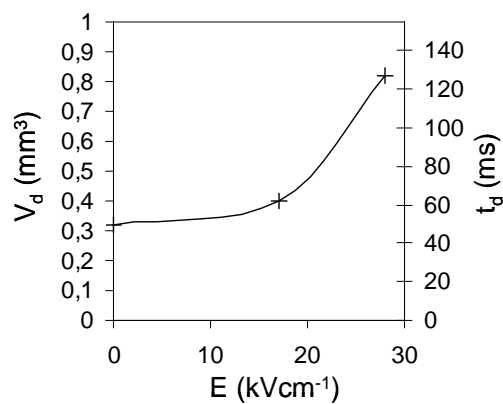


Figure 12 : Evolution des conditions de détachement d'une bulle en fonction du champ électrique, $\Delta T_{sat} = 4 K$