

TEMPERATURES DE FONCTIONNEMENT DES BOBINES DE L'AIMANT PRINCIPAL DU PS

M. Bôle-Feysot et F. Emery

Table des Matières

1. INTRODUCTION

2. DESCRIPTION SOMMAIRE DU SYSTEME DE REFROIDISSEMENT

- 2.1 Description d'un circuit (Fig. 1)
- 2.2 Débits moyens dans le PS

3. CONDITIONS DE MESURES

Courant efficace maximum dans les unités

4. RESULTATS DE MESURES

- 4.1 Relevé de la courbe $\Delta T = f(I)$ (Fig. 2)
pour le débit moyen du PS (6.5 l/min par galette)
- 4.2 Relevé de la courbe $\Delta T = f(Q)$ (Fig. 3)
pour le courant efficace maximum du PS
- 4.3 Températures de l'eau à la sortie des unités du PS
 - 4.3.1 Refroidissement des bus-bars
 - 4.3.2 Température de l'eau de refroidissement du PS
 - 4.3.3 Différences de débits dans les circuits
- 4.4 Détermination de la température à l'endroit des capteurs
Influence de la résistance thermique
- 4.5 Choix de la température de déclenchement
- 4.6 Modèle de thermostat préconisé

5. MESURES COMPLEMENTAIRES

- 5.1 Débits réduits dans une seule galette
- 5.2 Déclenchement dynamique

6. CONCLUSION

1. INTRODUCTION

Le système actuel de déclenchement de l'alimentation de l'aimant principal en cas de sur-température sur les bobines des unités doit être remplacé prochainement (cf. PS/PS Note 91-12 et Min. 91-09 de M. Bôle-Feysot).

Etant donné que la rénovation des canalisations en 1991 et 1992 a sensiblement modifié les débits dans les unités et que, depuis l'instauration des supercycles, la puissance à dissiper peut être beaucoup plus importante, il nous a semblé utile de reconsidérer le problème pour adapter les nouveaux capteurs aux possibilités actuelles de fonctionnement du PS.

2. DESCRIPTION SOMMAIRE DU SYSTEME DE REFROIDISSEMENT

Les bobines des 101 unités constituant l'aimant principal du PS ainsi que les conducteurs de liaison entre les unités (bus-bars) sont refroidis par circulation d'eau déminéralisée. Cette eau provient d'un circuit spécifique, exclusivement réservé au refroidissement de l'aimant principal.

Deux conduites circulaires (aller et retour) alimentent 202 circuits de refroidissement (deux par unité). Les deux circuits de chaque unité sont indépendants:

- un circuit pour refroidir les deux galettes supérieures,
- un circuit pour refroidir les deux galettes inférieures.

2.1 Description d'un circuit (Fig. 1)

L'eau froide est prise sur la canalisation circulaire par l'intermédiaire d'une vanne d'arrêt.

Cette eau passe dans le conducteur d'alimentation en courant de l'unité (bus-bar), se divise en deux pour refroidir en parallèle deux galettes de l'unité (galettes supérieures ou inférieures), puis se recombine pour être évacuée par la canalisation circulaire d'eau chaude par l'intermédiaire d'une autre vanne d'arrêt.

Les 202 circuits principaux refroidissent donc les 404 galettes en parallèle.

2.2 Débits moyens dans le PS

Le débit total est de 155 m³/h pour les 101 unités, soit

pour une unité : 1,535 m³/h ou 25.6 l/min, ou
 pour un circuit : 0,767 m³/h ou 12.8 l/min (202 circuits), ou
 pour une galette : 0,383 m³/h ou 6.4 l/min (404 galettes).

3. CONDITIONS DE MESURE

Pour les mesures, nous disposons d'une unité dans le Hall 167. Cette unité est connectée à une alimentation "HAZEMEYER" pouvant délivrer 3 000 A en courant continu.

Les circuits hydrauliques des deux galettes supérieures ont été séparés et munis de vannes de réglage et de débitmètres.

Les thermomètres utilisés pour les mesures permanentes sont des thermomètres à mercure classiques. Les contrôles ponctuels ont été faits avec un thermomètre électronique à contact.

3.1 Courant efficace maximum dans les unités

La puissance maximale que peut fournir l'alimentation est de 3,15 MW. En prenant la résistance de l'aimant à 0,32 Ω , le courant efficace est de 3 140 A, ce qui correspond exactement au courant efficace d'un cycle "B".

Nous avons donc pris les 3 140 A comme limite supérieure du courant efficace dans les unités. Ce courant pourrait théoriquement être atteint par un supercycle qui ne comporterait que des cycles "B".

En appliquant la formule :

$$\Delta T [^{\circ}\text{C}] = \frac{860P [\text{MW}]}{Q [\text{m}^3 / \text{h}]} \quad (\text{au PS, } Q = 155 \text{ m}^3 / \text{h}),$$

on trouve que pour P_{max} le ΔT moyen serait de 17,5°C alors que pour les supercycles "légers" utilisés en opération, le ΔT n'est que de 2°C, ce qui correspond à une puissance de 0,3 MW et à un courant efficace de 1 000 A.

4. RESULTAT DES MESURES

4.1 Relevé de la courbe $\Delta T = f(I)$ pour le débit moyen de 6,4 l/min par galette (Fig. 2)

Cette courbe donne le ΔT de l'eau pour une unité seule. Elle ne tient pas compte de l'échauffement dû au bus-bar.

4.2 Relevé de la courbe $\Delta T = f(Q)$ pour le courant I_{eff} maximum du PS (3 140 A) (Fig. 3)

Les débits ont été réglés aux mêmes valeurs dans les deux galettes supérieures. Les températures relevées aux sorties sont identiques. Le ΔT pour l'unité seule est donné par la courbe 1 de la Fig. 3.

4.3 Températures de l'eau à la sortie des unités du PS

Pour déterminer la gamme de températures qu'on peut trouver à la sortie des unités dans la machine PS, il faut, en plus du ΔT de l'unité seule, tenir compte de trois éléments:

4.3.1 Refroidissement des bus-bars

Avant de refroidir les unités, l'eau passe par les bus-bars. L'élévation de température due au refroidissement des barres est proportionnelle à l'élévation de température dans une unité (même courant et approximativement la même section d'aluminium) et à la longueur de la barre.

Pour estimer cet échauffement, on a simplement calculé l'élévation de température par mètre de conducteur de la galette et on en a déduit l'élévation de température pour les longueurs extrêmes des bus-bars, sans oublier que les débits dans les bus-bars sont doubles de

ceux des galettes. On trouve ainsi qu'il faut ajouter 9% minimum et 12% maximum au ΔT de la galette.

La courbe 2 de la Fig. 3 a été obtenue en ajoutant 12% au ΔT de la courbe 1 pour tenir compte de l'élévation de température due aux bus-bars.

4.3.2 Température de l'eau de refroidissement du PS

Cette température est comprise entre 17°C et 23°C selon la saison et le réglage du régulateur. Pour connaître la température de l'eau à la sortie des unités, il faut évidemment ajouter à ces températures le ΔT déterminé précédemment. On obtient ainsi les deux courbes de la Fig. 4 :

- Courbe 1 : $T_1 = f(Q) = 23 + \Delta T \text{ bus-bar} + \Delta T \text{ unité}$ (°C)
- Courbe 2 : $T_2 = f(Q) = 17 + \Delta T \text{ bus-bar} + \Delta T \text{ unité}$ (°C)

4.3.3 Différences de débit dans les circuits

La différence de pression entre les conduites d'eau froide et d'eau chaude n'étant pas constante sur le pourtour de la machine, toutes les galettes n'ont pas le même débit moyen de 6, 4 l/min. Les débits mesurés en mars 1992 sont compris entre :

5,5 l/min par galette (unité de référence) et
7,5 l/min sur les galettes de l'unité 52.

Ces deux valeurs reportées en abscisse de la Fig. 4 déterminent, en ordonnée, toutes les valeurs que peut prendre la température de l'eau à la sortie des unités.

On peut voir ainsi que les températures de l'eau à la sortie des galettes peuvent être comprises entre 31 et 47°C pour la puissance maximale appliquée à l'aimant principal.

4.4 Détermination de la température à l'endroit des capteurs. Influence de la résistance thermique

Dans le système actuel de protection, les thermomètres à mercure sont fixés sur une équerre en cuivre placée entre les deux galettes d'une unité.

Pour des raisons pratiques, le même système sera reconduit dans la nouvelle version (Note PS/PA 91-12). Dans ce système, l'équerre est en contact avec l'isolation de la galette, d'où une résistance thermique importante qui ne lui permet pas d'atteindre la température du conducteur.

Le rapport entre le ΔT sur l'équerre et le ΔT de l'eau est compris entre 0,75 et 0,8 selon la qualité du contact thermique.

La Fig. 5 représente la courbe de la température de l'équerre en fonction de la température de l'eau. Pour les valeurs de température déterminées précédemment (31°C à 47°C), la température à l'endroit des capteurs est comprise entre 29°C à 41°C.

4.5. Choix de la température de déclenchement

En conclusion, on peut dire que la température maximale que peut atteindre le capteur est de 41°C. Pour éviter les déclenchements intempestifs, une marge de sécurité de 2°C nous semble suffisante. Le thermo-contact ne devra donc pas déclencher pour des températures

inférieures à 43°C. A ces 43°C, il faut ajouter la tolérance du constructeur sur la température de déclenchement des thermo-contacts.

Pour le modèle que nous préconisons, la tolérance est de $\pm 3^\circ\text{C}$. La température de déclenchement à spécifier doit être de 46°C.

4.6 Modèle de thermostat préconisé

Nous avons une très bonne expérience avec les thermo-contacts de marque "ELMWOOD", dans les types 3100 ou 3150. Nous les utilisons depuis plus de 20 ans sans aucune défaillance sur les aimants des sections droites du PS. Ils ont l'avantage d'avoir un boîtier parfaitement étanche et électriquement isolé des contacts. Ils sont composés de matériaux résistant bien aux radiations (métaux, mica, céramique...). Ils ont l'inconvénient d'être un peu plus chers que d'autres, mais pour la quantité nécessaire au PS, leur prix devrait se situer entre 15 et 20 CHF.

5. MESURES COMPLEMENTAIRES

5.1 Débits réduits dans une seule galette

L'équerre est placée entre deux galettes qui peuvent être bouchées séparément (les deux galettes d'un circuit sont refroidies en parallèle). Dans le cas d'une obstruction dans une seule galette, l'équerre serait chauffée par la galette non refroidie mais serait également refroidie par la galette normalement alimentée en eau. L'équerre prend alors la température moyenne de ces deux galettes.

Nous avons réduit progressivement le débit dans une galette, l'autre galette étant alimentée normalement à 6,4 l/min, et nous avons relevé la courbe de la température sur l'équerre pour le courant efficace maximum du PS (Fig. 6).

5.2 Déclenchement dynamique

Toutes les courbes relevées jusqu'ici étaient des courbes statiques. A chaque mesure, on a attendu que les équilibres thermiques soient atteints.

Si l'on applique le courant maximum sur des galettes sans circulation d'eau (cas d'une vanne fermée), il ne faudrait pas que les bobines atteignent des températures excessives avant que le circuit de détection ne réagisse. Nous avons donc appliqué un courant de 3 140 A au temps t_0 sur les galettes supérieures refroidies par un très faible débit d'eau et relevé les variations de température du conducteur de la galette et de l'équerre toutes les minutes après t_0 (Fig. 7).

Analyse du résultat

Si les thermostats installés déclenchent à $46^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$, il faudra, dans le pire des cas, avoir 49°C sur l'équerre pour que l'alimentation s'arrête, soit, si l'eau d'entrée est au minimum (17°C), avoir sur l'équerre un ΔT de $49^\circ\text{C} - 17^\circ\text{C} = 32^\circ\text{C}$.

Ce résultat, d'après la courbe, peut être atteint au maximum en 29'. Le ΔT du conducteur est alors de 48°C et sa température de $17^\circ\text{C} + 48^\circ\text{C} = 65^\circ\text{C}$. On a encore une bonne marge de sécurité avant que les galettes ne subissent des détériorations dues à la température, même si la température continue à monter un peu après la coupure de l'alimentation. Par contre, les

contraintes mécaniques dues à la dilatation de l'aluminium ne doivent pas être sous-estimées. Pour un ΔT de 48°C, la galette s'allonge de 5,5 mm.

6. CONCLUSION

Nous proposons donc des thermo-contacts à 46°C \pm 3°C pour déclencher l'alimentation de l'aimant principal quand la température sur l'équerre atteint 43°C.

Si les conditions de refroidissement devaient être modifiées prochainement (réduction du débit du circuit anneau ou modifications sur les échangeurs), il faudrait nous en avertir au plus vite. La commande des thermo-contacts doit être passée en octobre 1992.

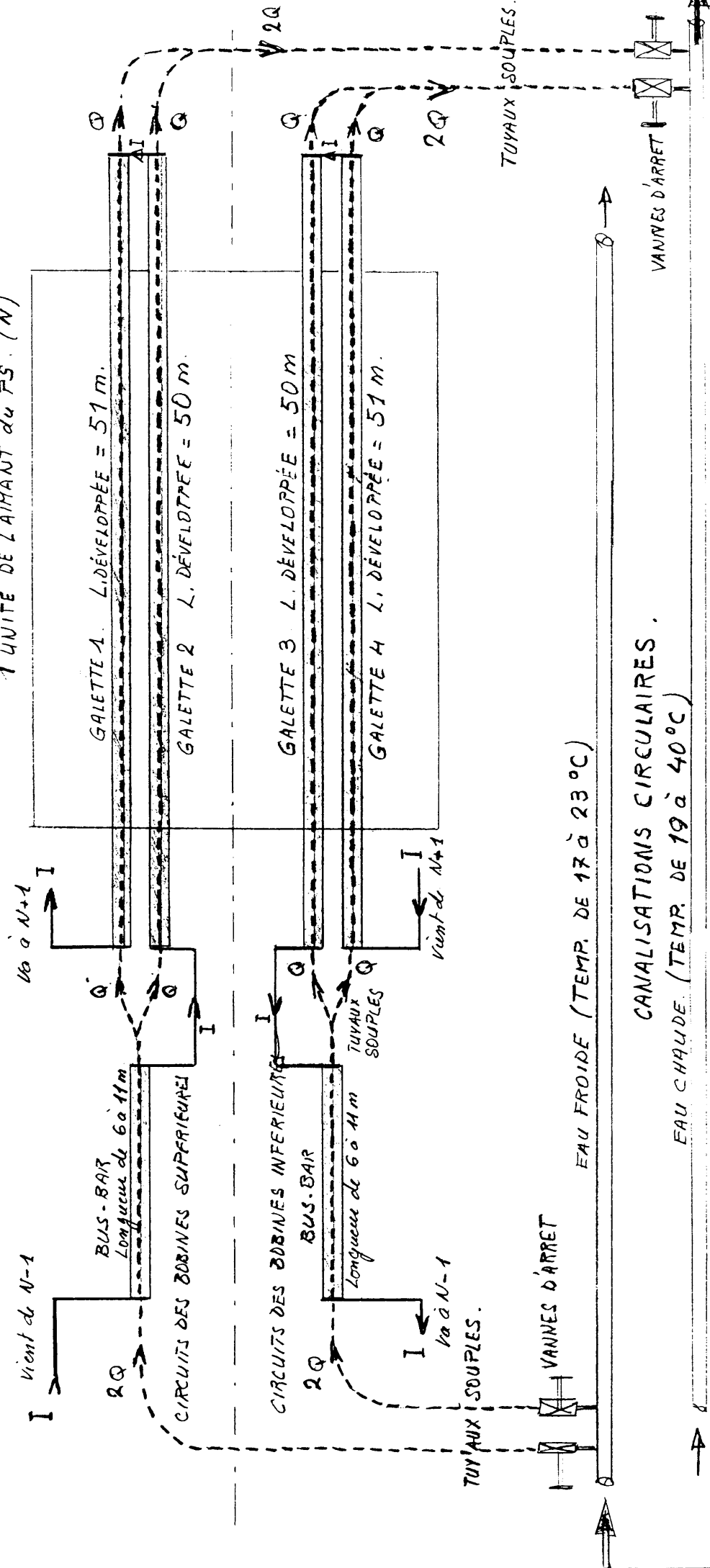
REFERENCES

- L. BROUWERS & B. SAGNELL, PS Magnet Cooling System, March 1961.
 H. ULLRICH, Communication personnelle.
 K.H. REICH, The CERN Proton Synchrotron Magnet, MPS/int.DL 63-13.
 M. BOLE-FEYSOT, Proposition pour le remplacement du système de détection de surtempérature des bobines de l'aimant principal, PS/PA Note 91-12.
 Compte rendu de la réunion du 10 juin 1991, PS/PA Min. 91-09.

TITRES DES FIGURES

- Fig.1 : Circuits de refroidissement d'une unité de l'aimant PS
 Fig. 2 : Courbe $\Delta T = f(I_{eff})$ [unité seule] pour $Q = 6,4$ l/min
 Fig. 3 : Courbe $\Delta T_{eau} = f(Q)$ avec et sans bus-bar pour $I = 3\ 140$ A
 Fig. 4 : Courbes $T = f(Q)$ pour une unité dans la machine. $I = 3\ 140$ A
 Fig. 5 : Courbe $T_{équerre} = f(T_{eau})$. $I = 3\ 140$ A
 Fig. 6 : Courbe $\Delta T_{équerre} = f(Q)$. Une seule galette bouchée
 Fig. 7 : Courbes $\Delta T_{eau} = f(t)$ et $\Delta T_{équerre} = f(t)$. $I = 3\ 140$ A

1 UNITÉ DE L'AIMANT du FS. (N)



CANALISATIONS CIRCULAIRES.
EAU FROIDE (TEMP. DE 17 à 23 °C)
EAU CHAUDE (TEMP. DE 19 à 40 °C)

---> CIRCUIT HYDRAULIQUE.
-> CIRCUIT ELECTRIQUE.
---+--- CIRCUIT ELECTRIQUE ET HYDRAULIQUE.

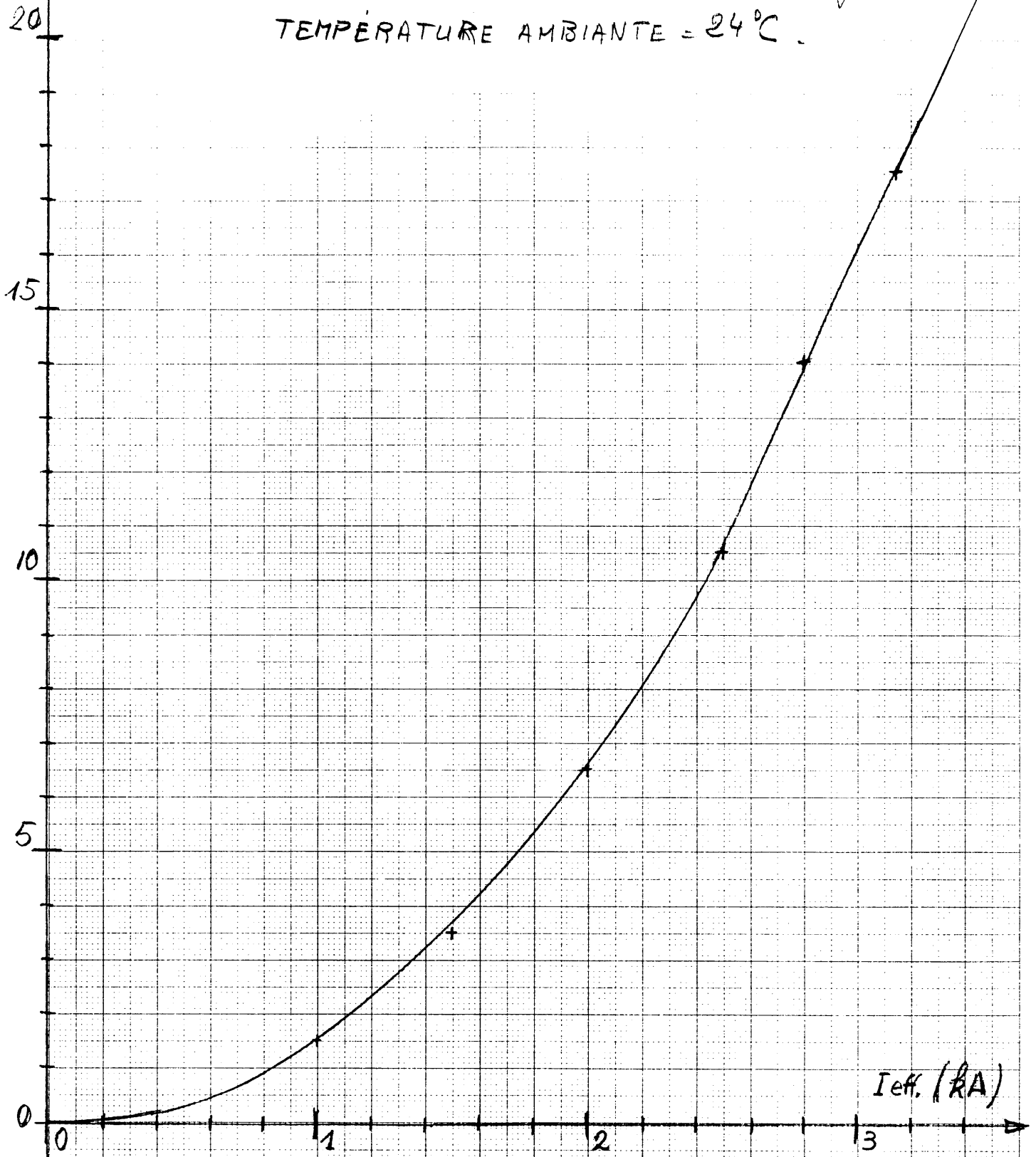
DEBITS :
 $Q_{\text{moyen}} = 6,4 \text{ l/mn.}$
 $Q_{\text{max.}} = 7,5 \text{ l/mn.}$
 $Q_{\text{min.}} = 5,5 \text{ l/mn.}$

CIRCUITS DE REFROIDISSEMENT
D'UNE UNITÉ DE L'AIMANT DU FS.

Sept. 1992. M. BOLE-FEYSOT -

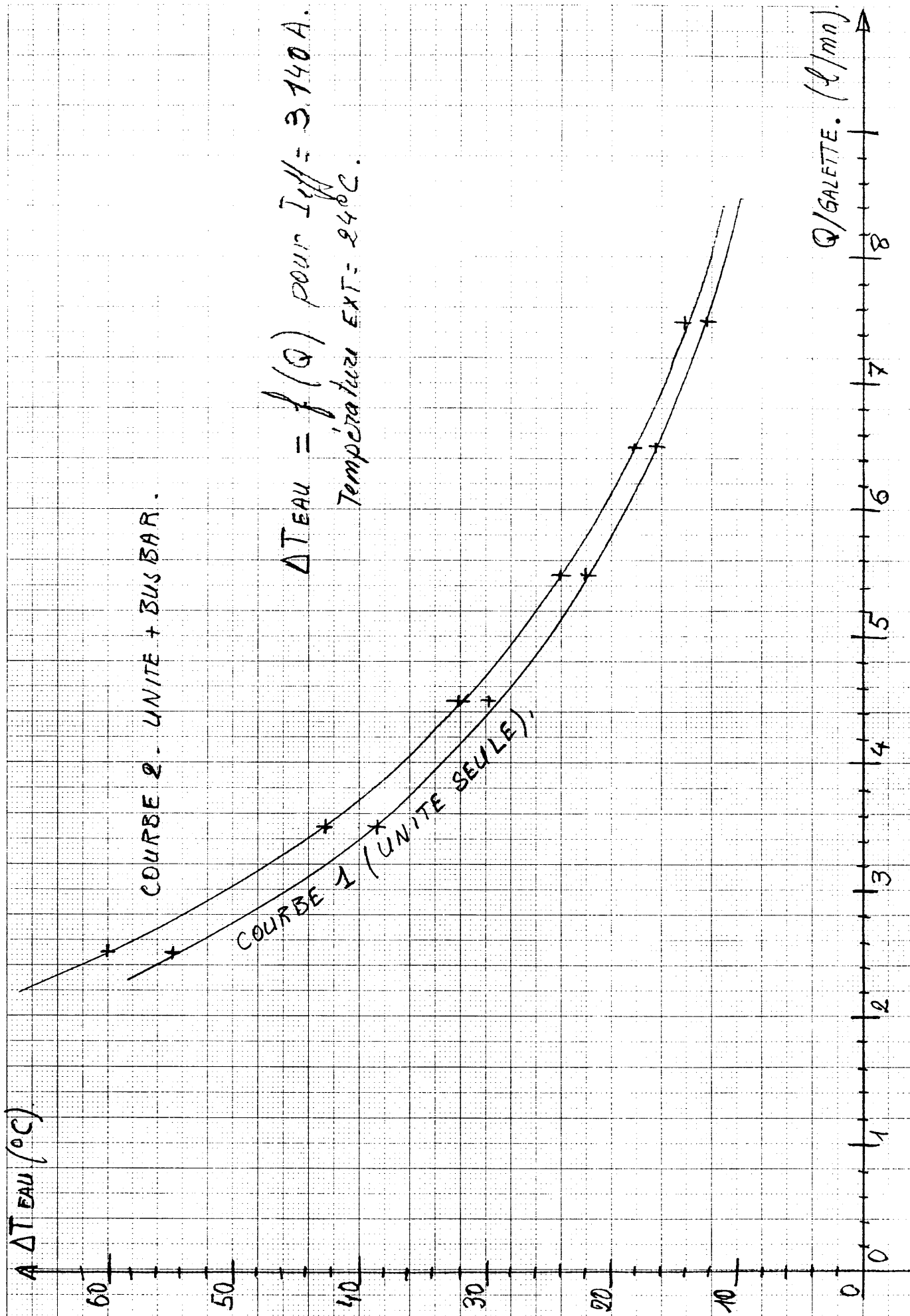
$\Delta T_{\text{eau}} (\text{°C})$

$\Delta T = f(I_{\text{eff.}})$ POUR UNE UNITÉ SEULE (SANS LES BUS BARS)
POUR UN DÉBIT de 6,4 l/mn par galette.
TEMPÉRATURE AMBIANTE = 24°C.



M. BOLE-FEYSOT et F. EHERY - (MAI 92)

FIG 2



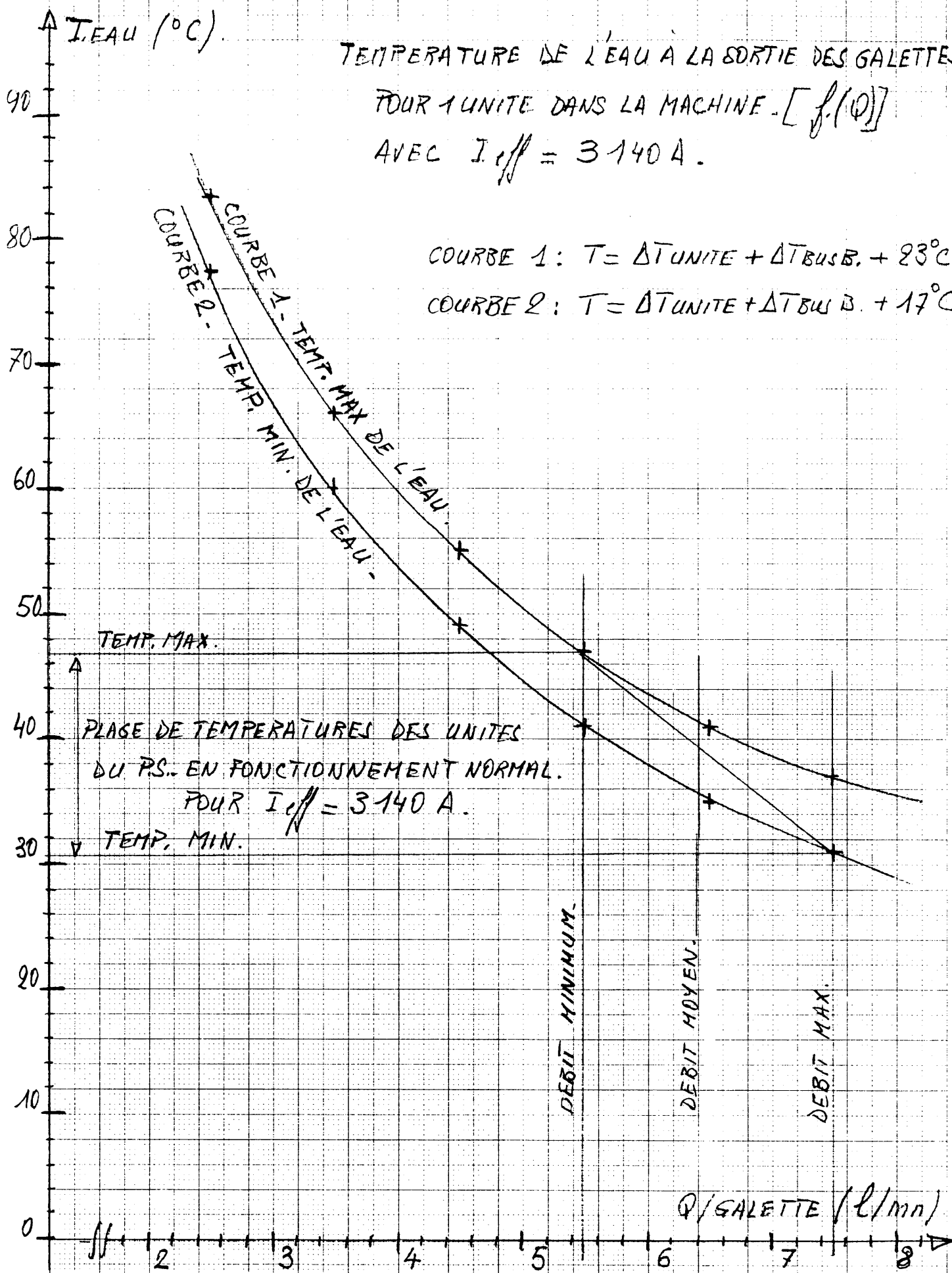
M. ROLLE-FEYSOT. F. EMERY (JUIN 92.)

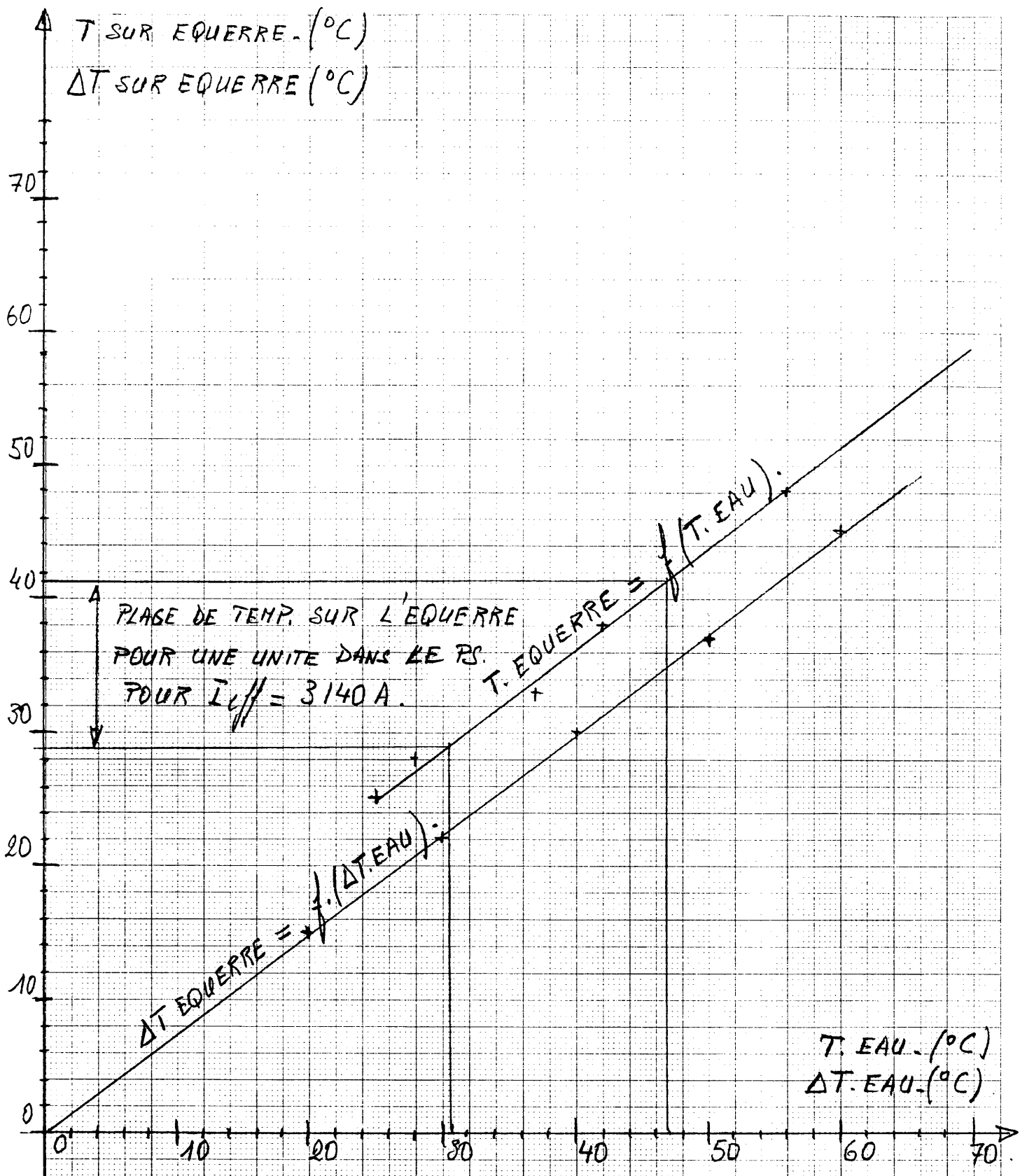
FIG: 3

TEMPERATURE DE L'EAU A LA SORTIE DES GALETTES.
 POUR 1 UNITE DANS LA MACHINE. [f. (Q)]
 AVEC $I_{eff} = 3140 A$.

COURBE 1: $T = \Delta T_{UNITE} + \Delta T_{BUS B.} + 23^{\circ}C$

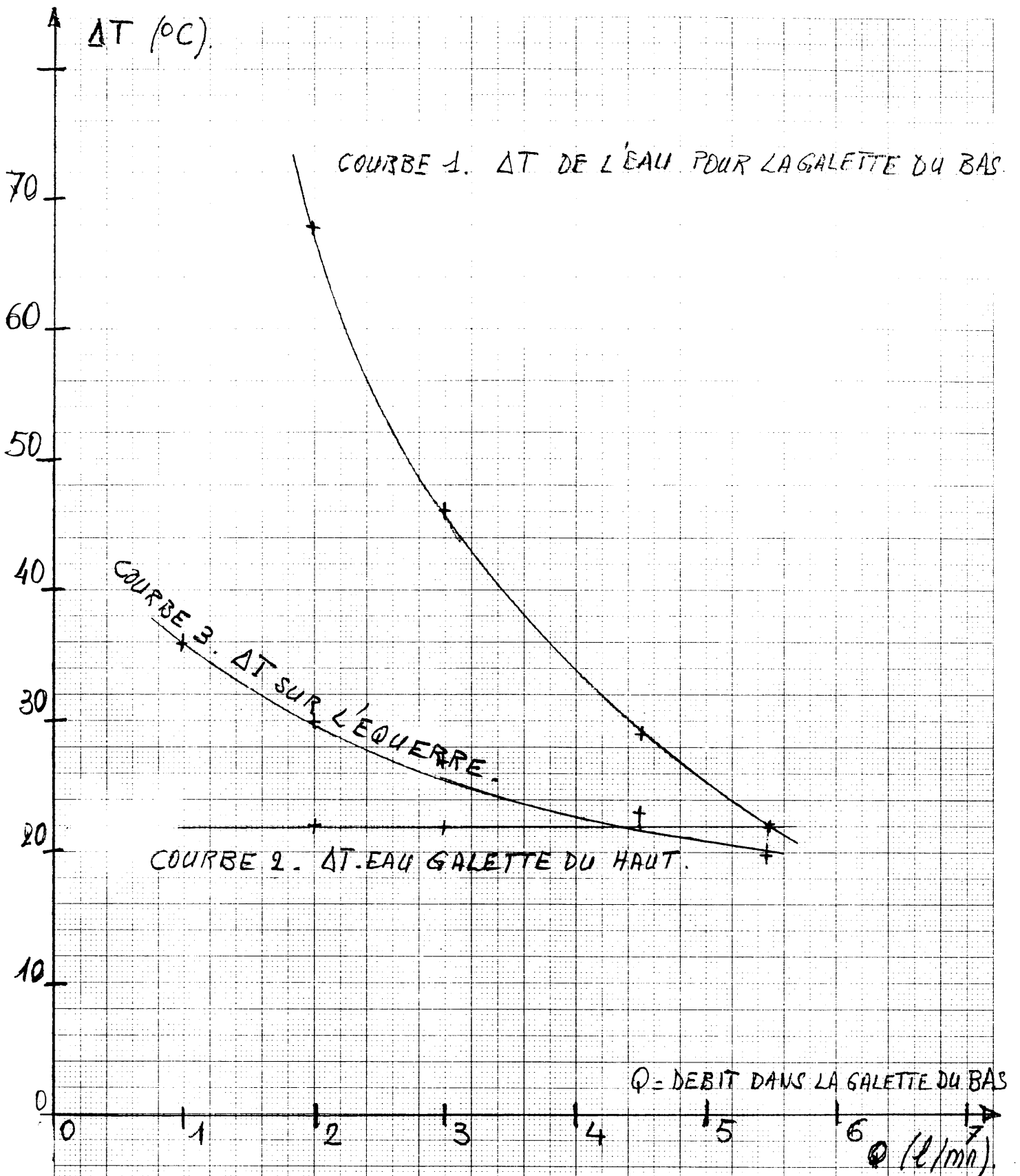
COURBE 2: $T = \Delta T_{UNITE} + \Delta T_{BUS B.} + 17^{\circ}C$



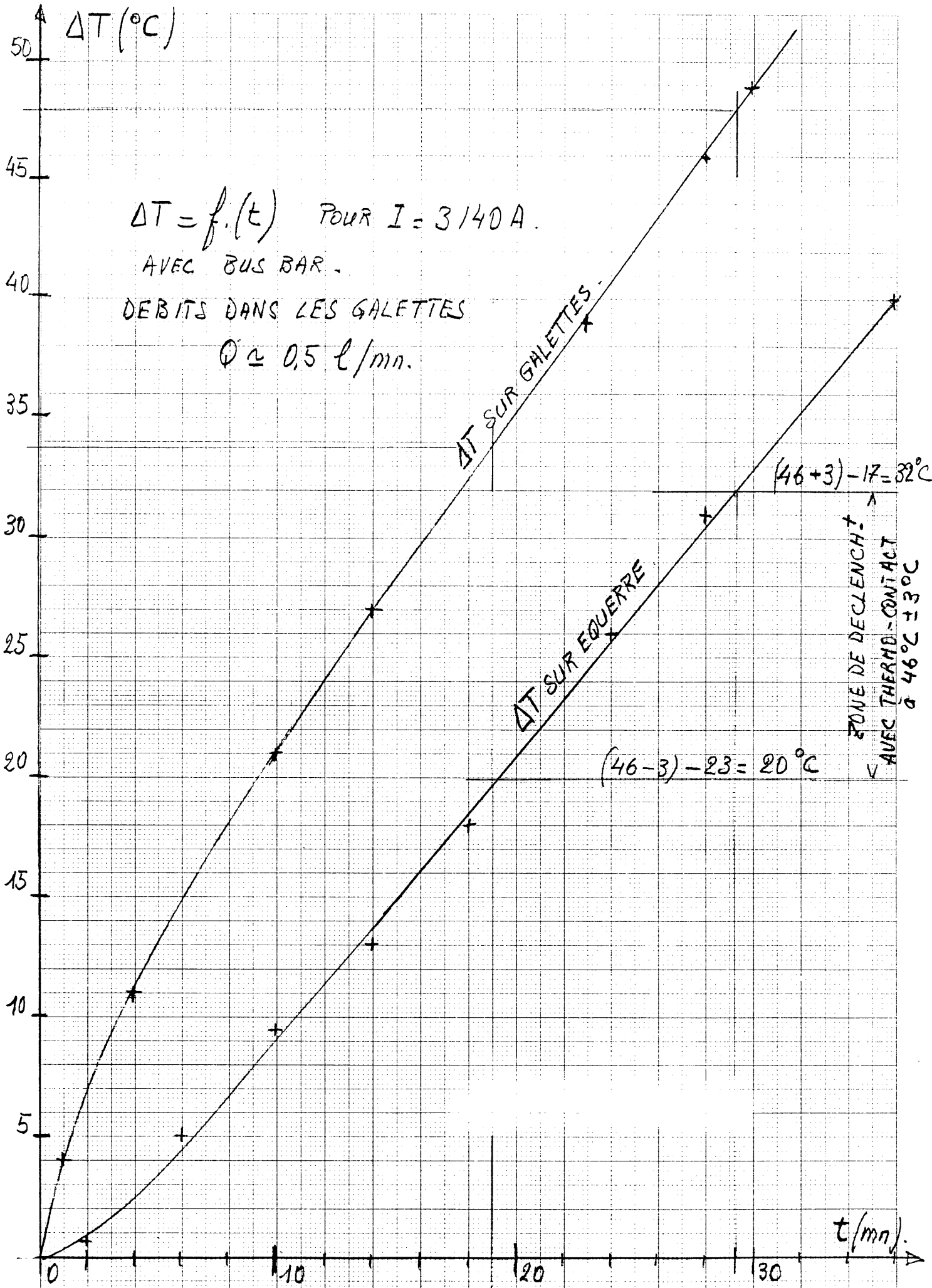


M. BOLE-FEYSOT. F. EMERY.

FIG: 5



CAS D'UNE REDUCTION DE DÉBIT DANS UNE SEULE GALETTE (GALETTE DU BAS)
 L'AUTRE ETANT ALIMENTÉE À DÉBIT CONSTANT de 6,4 l/min -
 POUR UN COURANT EFFICACE DE 3140A. (UNITE SEULE).



M. BOLE-FEYSDI - FIEMERY.

FIG 7

Distribution

- AT P. Bossard
F. Emery
R. Perin
S. Pichler
- PS B.W. Allardyce
J. Boillot
L. Danloy
J. Gruber
K. Hübner
M. Martini
T. Risselada
J.P. Riunaud
D.J. Simon
C. Steinbach
H. Ullrich
- ST A. Grossmann
A. Scaramelli
R. Van Cauter