

FR8202855

SACLAY, le 16 Avril 1982

ALH-JMH-JJQ-AL/MCR

JMH JL

International workshop on containment integrity  
Washington, DC, USA 7 - 9 June 1982  
CEA-CONF-- 6302

Note Technique DMT/SYST/LECS/82/022  
F.E. 4152.01.000.157

COMPORTEMENT THERMIQUE ET RELACHEMENT  
EN EAU DU BETON CHAUFFE A DES TEMPERATURES  
COMPRISES ENTRE 300 ET 600°C

A. L'HOMME - J.M. HUMBERT

J.J. QUILLICO - A. LOURENCO

Les informations contenues dans ce document sont réservées aux destinataires  
nommément désignés. Elles ne peuvent recevoir aucune autre diffusion sans  
l'autorisation expresse du Département des Etudes Mécaniques et Thermiques.

## R E S U M E

---

Un programme d'études important est poursuivi par le C.E.A. depuis 1980 sur le comportement thermique et le relâchement en eau du béton soumis à des températures comprises entre 300 et 600°C.

Notre exposé est orienté sur la description du dispositif expérimental, du programme d'études et du modèle physique en cours d'élaboration pour l'interprétation finale des expériences. Quelques résultats expérimentaux sont donnés à titre d'exemple.

Le dispositif expérimental permet de chauffer sur une face un cylindre de béton de 1 m<sup>3</sup> (section 1 m<sup>2</sup>, hauteur 1 m), instrumenté dans la masse en mesures de température et de pression. L'eau est recueillie en continu sur chacune des 2 faces.

Plusieurs expériences ont été effectuées sur des éprouvettes de béton ferraiillées ou non, pour des températures maximales de face chaude comprises entre 300 et 600°C. La durée d'une expérience varie entre 2 jours et 1 semaine.

Le modèle physique mis au point pour interpréter les expériences tient compte de tous les échanges thermiques et des divers types de transport de l'eau dans la porosité du béton (en phase gazeuse ou liquide, vers la face chaude ou vers la face froide).

## I - INTRODUCTION

Un programme d'études important est poursuivi par le C.E.A. depuis 1980 sur le comportement thermique et le relâchement en eau du béton soumis à des températures comprises entre 300 et 600°C.

Ce programme comprend 2 parties :

### a) Une partie expérimentale :

Un dispositif expérimental a été mis au point en 1980, permettant de chauffer sur la face inférieure un cylindre de béton de 1 m<sup>3</sup> (section 1 m<sup>2</sup>, hauteur 1 m), instrumenté dans la masse en mesures de température et de pression. L'eau, à l'état liquide ou vapeur, est recueillie en continu sur chacune des 2 faces d'extrémité, la surface latérale étant isolée thermiquement et étanche.

Plusieurs essais ont été effectués en 1981 et 1982 sur des éprouvettes de béton, ferraiillées ou non, pour des températures maximales de face chaude comprises entre 300 et 600°C. La durée d'un essai est de l'ordre d'une semaine.

### b) Une partie théorique :

Un modèle physique réaliste a été mis au point pour analyser les résultats expérimentaux, tenant compte de tous les échanges thermiques et des divers modes de transport de l'eau dans la porosité du béton (en phase gazeuse ou liquide, vers les faces chaudes ou froides).

-----

Nous décrivons plus en détail dans la suite de notre exposé : le dispositif expérimental, le programme expérimental, les résultats expérimentaux obtenus, les moyens d'interprétation.

## II - DISPOSITIF EXPERIMENTAL :

Le dispositif expérimental développé par le C.E.A. pour la réalisation de ce programme fait appel à une technologie assez proche de celle antérieurement mise en oeuvre par l'équipe KORDINA-SCHNEIDER de l'Université de BRAUNSCHWEIG dans le cadre d'une étude de même nature [1].

### 2.1. Equipement expérimental :

Le dispositif d'essai, dont la figure n° 1 représente le schéma de principe, se compose à sa partie inférieure d'un cadre chauffant constitué de 7 éléments tubulaires de 8 KW de puissance unitaire maximale.

Le béton expérimental, directement coulé à l'intérieur de l'enveloppe métallique de confinement, est disposé, après un séchage minimal de 28 jours, au dessus des éléments chauffants.

Trois dynamomètres assurent le maintien de l'éprouvette d'essai sur le bâti métallique entourant le système de chauffage.

Les deux extrémités du cylindre de béton par lesquelles s'effectuent les dégagements d'eau sont obturées par des plaques métalliques équipées de tuyauteries destinées à la récupération de l'eau libérée.

L'étanchéité est assurée, en face chaude, par un joint fibreux haute température comprimé par des tirants métalliques fixés à la périphérie de la cuve.

Un joint PVC maintient l'étanchéité sur la face froide de l'échantillon.

Chaque plaque d'obturation est mécaniquement conçue de façon à ménager sur chacune des faces du bloc de béton deux zones distinctes de dégagement d'eau. L'une, circulaire, de 600 mm de diamètre, est dite zone centrale, l'autre, annulaire, est dite zone périphérique.

Les circuits de prélèvement et de mesure de l'eau libérée par le béton sont différents selon qu'il s'agit de la face chaude ou de la face froide mais identiques pour les deux zones d'une même face.

## 2.2. Evaluation des quantités d'eau libérées par le béton :

Pour évaluer les quantités d'eau libérées par le béton à chacune de ses faces, on a imaginé deux systèmes différents, l'un applicable à la face froide, l'autre à la face chaude.

Ces deux dispositifs sont schématiquement présentés sur la figure n° 2.

L'eau libérée en face chaude se dégage pour l'essentiel sous forme de vapeur. Cette vapeur est préalablement refroidie dans un échangeur puis condensée dans un réfrigérant à boules. Le condensat est récupéré dans un réservoir de stockage dont on mesure en permanence la variation de poids.

Afin de réduire le temps s'écoulant entre la libération de l'eau sur la peau de béton et sa récupération dans le réservoir de stockage, on injecte en permanence dans la zone de prélèvement de la cellule d'essai un gaz (azote) destiné à accélérer l'écoulement de la vapeur condensée.

Une mesure de la teneur en eau de ce gaz est faite avant son rejet dans l'atmosphère afin d'évaluer la quantité d'eau ainsi perdue.

Sur la face froide, on dispose dans chaque zone d'un capteur d'humidité qui analyse en permanence la teneur en eau de la lame de gaz confinée dans la zone considérée. Lorsque l'hygrométrie ambiante s'élève, on déclenche le passage d'un flux gazeux sec destiné à éliminer l'eau nouvellement apparue. Le mélange  $N_2 - H_2O$  ainsi créé est dosé en fin de circuit afin d'évaluer la quantité d'eau entraînée.

Si la masse d'eau dégagée en face froide devient trop importante pour être évacuée par simple dilution gazeuse, on dispose également d'un système de récupération d'eau par condensation et stockage, analogue dans son principe à celui mis en oeuvre sur la face chaude.

## 2.3. Bilan en eau et teneur en eau résiduelle du béton :

En fin d'essai, il est possible de faire un bilan en eau en comparant le volume d'eau recueillie sur l'ensemble des zones de prélèvement à la variation de masse de l'éprouvette, variation mesurée à l'aide des dynamomètres de maintien du bloc de béton.

Chaque éprouvette d'essai comporte par ailleurs un ou deux échantillons de forme conique, situés en zone centrale, de même composition que le bloc lui-même, destinés à la mesure de la teneur en eau résiduelle du béton après essai.

Une technologie particulière a été mise en oeuvre lors de la préparation de l'éprouvette afin que ces échantillons puissent être aisément extraits sans que leur présence ne perturbe l'homogénéité de l'éprouvette.

#### 2.4. Acquisition et centralisation des informations :

Au dispositif expérimental précédemment décrit est associée une centrale d'acquisition de données permettant la scrutation des voies de mesure et l'enregistrement des valeurs numériques correspondantes.

Chaque essai se caractérise par une centaine de voies de mesure comprenant les mesures thermiques et celles liées au dégagement d'eau.

Pendant toute la durée de l'essai, l'ensemble des voies de mesure est scruté à la fréquence d'un enregistrement toutes les 5 minutes.

### III - PROGRAMME EXPERIMENTAL :

Les essais sont conduits de façon à maintenir au centre de l'éprouvette et à 5 cm de la face chaude une température constante. La montée en température jusqu'à la température de consigne est la plus rapide possible compte tenu des possibilités et de la sécurité de l'installation.

Le programme expérimental comporte actuellement 4 essais : 2 sur éprouvette non ferrailée (avec 2 échantillons de prélèvement) et 2 sur éprouvette ferrailée (avec 1 seul échantillon de prélèvement) :

a) Essai préliminaire : (effectué fin Mars 1981) Cet essai, effectué sur une éprouvette non ferrailée, a permis de tester le bon fonctionnement du dispositif expérimental. Trois paliers de température ont été imposés successivement à la température de consigne :

1er palier : 320°C, maintenu jusqu'à obtenir 100°C à 330 mm de la face chaude de l'éprouvette.

2ième palier : 440°C, maintenu jusqu'à obtenir 100°C à 650 mm de la face chaude

3ième palier : 550°C, maintenu jusqu'à obtenir 100°C à 800 mm de la face chaude.

b) Essai à 320°C sur éprouvette ferrillée : (effectué fin Sept. 81) Un seul palier (320°C) a été imposé, jusqu'à obtenir 100°C à la face froide de l'éprouvette.

c) Essai à 550°C sur éprouvette ferrillée : (effectué fin Mars 82) Un seul palier (550°C) a été imposé, jusqu'à obtenir 100°C à la face froide de l'éprouvette.

d) Essai à 550°C sur éprouvette non ferrillée : (prévu pour Sept. 82) Un seul palier (550°C) sera imposé, jusqu'à obtenir 100°C à la face froide de l'éprouvette.

Lors de ces essais, nous mesurons au cours du temps :

- Les températures en divers points de l'éprouvette (environ 60 thermocouples sont prévus)
- Les quantités d'eau dégagées sur les deux faces de l'éprouvette.

A la fin de chaque essai, les échantillons de prélèvement sont extraits de l'éprouvette et découpés en tronçons dont on mesure l'humidité résiduelle.

#### IV - RESULTATS D'ESSAI :

A titre d'exemple nous donnons ci-dessous les résultats les plus significatifs de l'essai à 320°C sur éprouvette ferrillée.

##### 4.1. Courbes des températures axiales :

La figure n° 3 donne les courbes des températures relevées en zone centrale de l'éprouvette en fonction de la distance à la face chaude ( $\theta = f(z)$ ) et pour les trois instants suivants :  $t = 18h$ ,  $t = 69h$ ,  $t = 129h$ .

#### 4.2. Evolution des températures en fonction du temps :

La figure n° 4 montre l'évolution en fonction du temps des températures de la face chaude de l'éprouvette et d'un point situé à 50 mm de la face chaude en zone centrale ; la température de ce point a été maintenue à 320°C pendant 120h environ.

La figure n° 5 montre l'évolution en fonction du temps, au début de l'essai ( $3h < t < 6h$ ), des températures des points situés en zone centrale et proches de la face chaude (niveaux 50, 70 et 90 mm). Les trois courbes présentent chacune un palier. Pour des distances à la face chaude croissantes, les paliers se produisent à des températures plus basses et durent plus longtemps. Au delà de 100 mm les paliers ne sont plus perceptibles.

#### 4.3. Dégagement d'eau :

La figure n° 6 donne en fonction du temps la masse d'eau recueillie en face chaude de l'éprouvette ; à la fin de l'essai la quantité d'eau recueillie est de 90 kg environ.

A ceci il faut ajouter l'eau recueillie en face froide soit environ 4 kg.

#### 4.4. Humidité résiduelle du béton :

L'échantillon de prélèvement a été extrait de l'éprouvette en fin d'essai et sectionné en 8 tronçons. L'humidité résiduelle de chaque tronçon a été mesurée par étuvage : la figure n° 7 donne la courbe de l'humidité perdue par l'échantillon en fonction de la distance à la face chaude (L'humidité initiale du béton est de  $150 \text{ kg/m}^3$ ).

Les tronçons proches de la face chaude ont perdu beaucoup d'eau ( $130 \text{ kg/m}^3$ ) alors que ceux proches de la face froide en ont perdu très peu. En moyenne sur la hauteur de l'échantillon, la perte d'eau est de  $88 \text{ kg eau/m}^3$  béton ce qui est comparable aux 94 kg d'eau recueillie sur les deux faces de l'éprouvette lors de l'essai.

## V - COMPARAISONS CALCULS - EXPERIENCE :

Pour ces comparaisons, nous avons utilisé le code DATRAN [2] développé par INTERATOM et le code DELFINE du CEA/SEMT [3] dans lesquels nous avons entré en donnée l'évolution en fonction du temps de la température de la face chaude relevée au cours des essais.

DATRAN est un code monodimensionnel qui modélise la vaporisation de l'eau et les écoulements de vapeur par perméabilité et diffusion.

DELFINE est un code de thermique bidimensionnel classique où nous avons tenu compte de la chaleur absorbée par l'évaporation de l'eau du béton par une augmentation de la chaleur spécifique du béton (voir figure 10).

A titre d'exemple nous donnons ci-dessous les comparaisons calculs-experience de l'essai préliminaire.

### 5.1. Données des calculs :

#### a) Calcul avec DELFINE :

Nous avons modélisé uniquement l'éprouvette, la virole et le calorifuge. Voir la figure n° 8 qui précise également les conditions aux limites et les propriétés des matériaux. La figure n° 9 donne la conductivité du béton en fonction de la température et la figure n° 10 la chaleur volumique ( $\rho \cdot Cp$ ) en fonction de la température. La courbe présente plusieurs pics dont les deux premiers correspondent à l'enthalpie de vaporisation de l'eau libre et de l'eau liée du béton. Le troisième pic, débutant au delà de 600°C correspond à l'enthalpie de décomposition des carbonates (dégagement de  $CO_2$ ).

#### b) Calcul avec DATRAN :

Les données entrées dans le calcul sont les suivantes :

. Chaleur volumique :  $\rho \cdot Cp = 2.03 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$

. Conductivité thermique : voir figure n° 9

. Porosité du béton :  $\psi = 0.05$

. Section moyenne des pores :  $A = 0.78 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$

. Loi de perte d'humidité du béton en fonction de la température : voir figure n° 11

## 5.2. Comparaison des températures :

Les figures 12, 13 et 14 comparent les températures relevées sur l'axe de l'éprouvette à celles calculées par DATRAN et DELFINE, pour les instants 16, 40 et 61 heures.

Nous constatons que :

. Les calculs DELFINE et DATRAN donnent des résultats sensiblement identiques.

. A partir de l'instant 40 heures, les calculs diffèrent sensiblement de l'expérience, notamment pour  $0.3 < z < 0.5$  m. Nous pensons que ceci est dû au fait que les codes de calcul utilisés ne tiennent pas compte du flux de chaleur absorbé par l'échauffement de la vapeur pendant son trajet entre le front de vaporisation et la face chaude.

## 5.3. Comparaison des dégagements d'eau :

La figure n° 15 compare la courbe des quantités cumulées d'eau recueillie en face chaude lors de l'essai à celle calculée par DATRAN. Nous constatons que le calcul surestime le débit d'eau pour  $t < 13$  heures et le sous-estime ensuite. L'erreur n'est pourtant pas trop élevée (erreur maximale = 12 %)

## 5.4. Conclusions :

Les moyens de calculs dont nous disposons donnent une assez bonne approximation de la réalité, néanmoins :

- le code DELFINE ne donne aucune indication sur le dégagement d'eau, ni sur les pressions à l'intérieur du béton ;

- le code DATRAN ne tient pas compte de la migration de l'eau vers la face froide de l'éprouvette, donne des pressions de vapeur à l'intérieur du béton qui semblent irréalistes et ne tient pas compte de l'échauffement de la vapeur pendant son trajet vers la face chaude.

C'est pour ces raisons que nous développons notre propre code de calcul ("TEMIGRO") qui sera mieux adapté à nos conditions (températures maximales de 600°C avec chocs thermiques assez violents).

## VI - CODE DE CALCUL TEMIGRO :

En résumé, le code de calcul TEMIGRO, actuellement en cours d'élaboration, repose sur les hypothèses physiques suivantes :

### a) Représentation du béton (voir figure 16)

On suppose que le béton est un milieu poreux uniforme, dont la porosité ouverte ne contient que de l'eau libre ou de la vapeur (on néglige le transitoire initial pendant lequel l'air est expulsé), l'eau liée chimiquement faisant partie du matériau de structure.

### b) Echanges thermiques :

On tient compte de la conduction thermique dans le matériau de structure, de l'écoulement des fluides dans la porosité ouverte (eau libre + vapeur), des échanges (condensation, vaporisation, passage de l'état lié à l'état libre supposé instantané et ne dépendant que de la température) entre les diverses phases de l'eau (vapeur, eau libre, eau liée).

### c) Transferts de masse :

On admet que la vapeur et l'eau libre s'écoulent dans la porosité ouverte, sous l'action du gradient de pression (loi de DARCY).

Ces hypothèses conduisent à un système d'équations aux dérivées partielles assez complexe, qui sera vraisemblablement résolu par une méthode de différences finies avec frontière mobile.

On espère par ce modèle reproduire de façon réaliste les écoulements de fluides dans le sens et à contresens du gradient de température, ainsi que la pression régnant dans les pores.

## REFERENCES

- [1] - KORDINA K., SCHNEIDER U.  
Moisture transport and vapor release of concrete structures  
at temperatures > 100°C  
Paper H 1/5, proceedings of 5 th SMIRT Conference, BERLIN 1979
- [2] - HUBNER R, DORNER G.  
" Feuchtetransport im Beton bei hoher instationärer thermischer  
Belastung/Programmbeschreibung DATRAN"  
Technischer Bericht, ITB 78.52  
Juni 1978
- [3] - Système CEA/SEMT DELFINE - Notice d'utilisation  
Rapport SMTS/78/25  
MM. S. GOLDSTEIN, N. JUIGNOT, J. JOLY

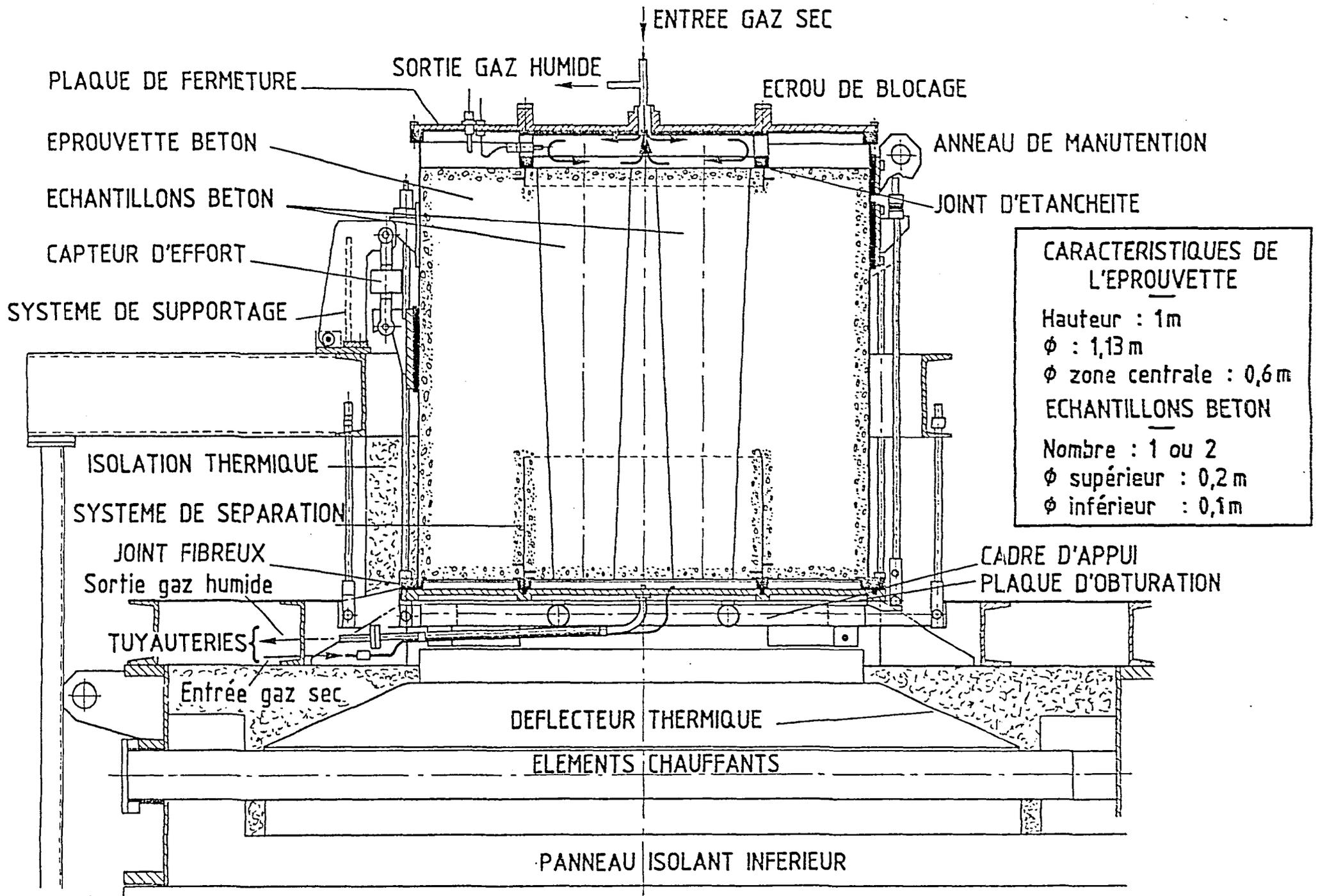
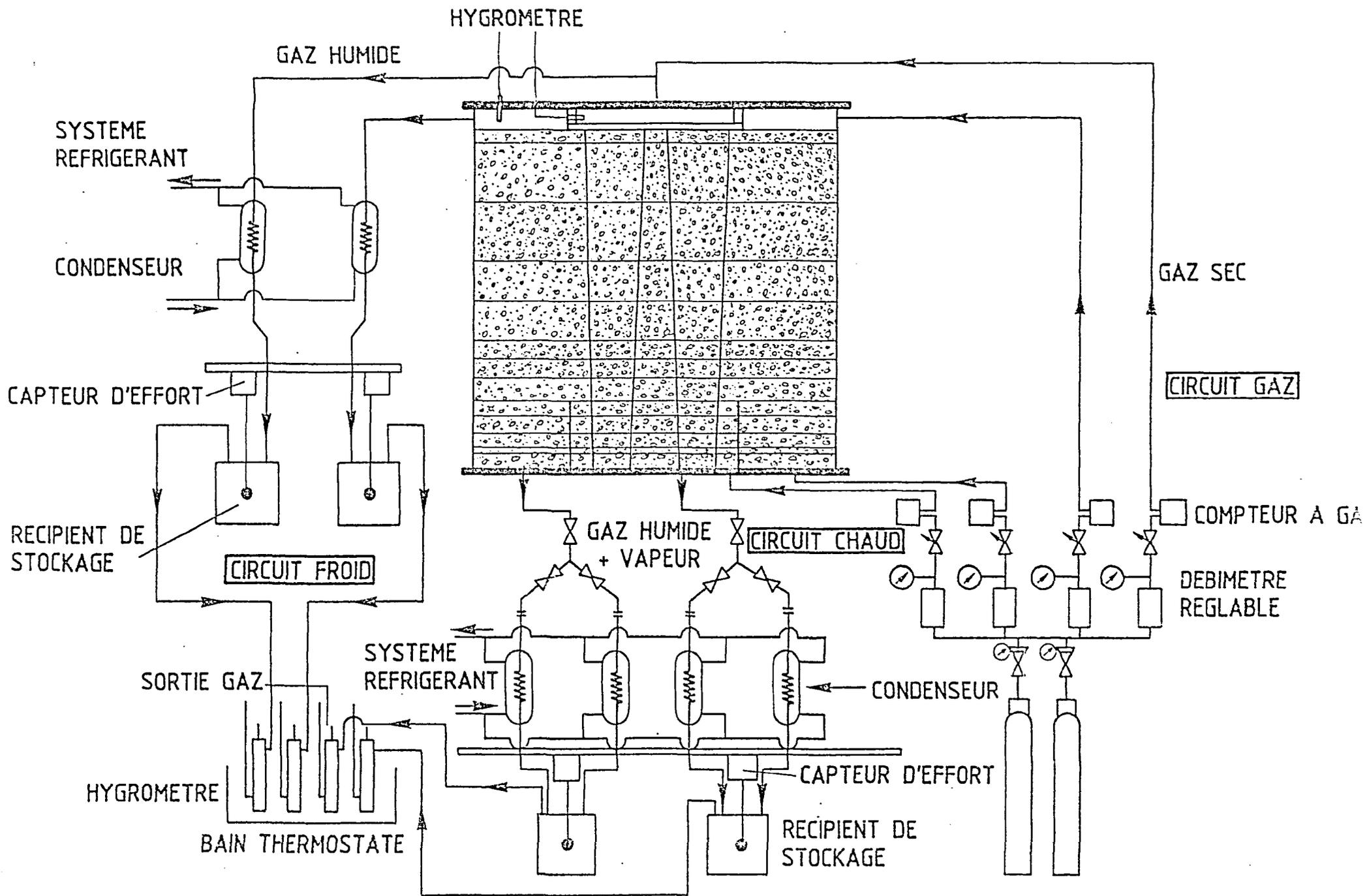
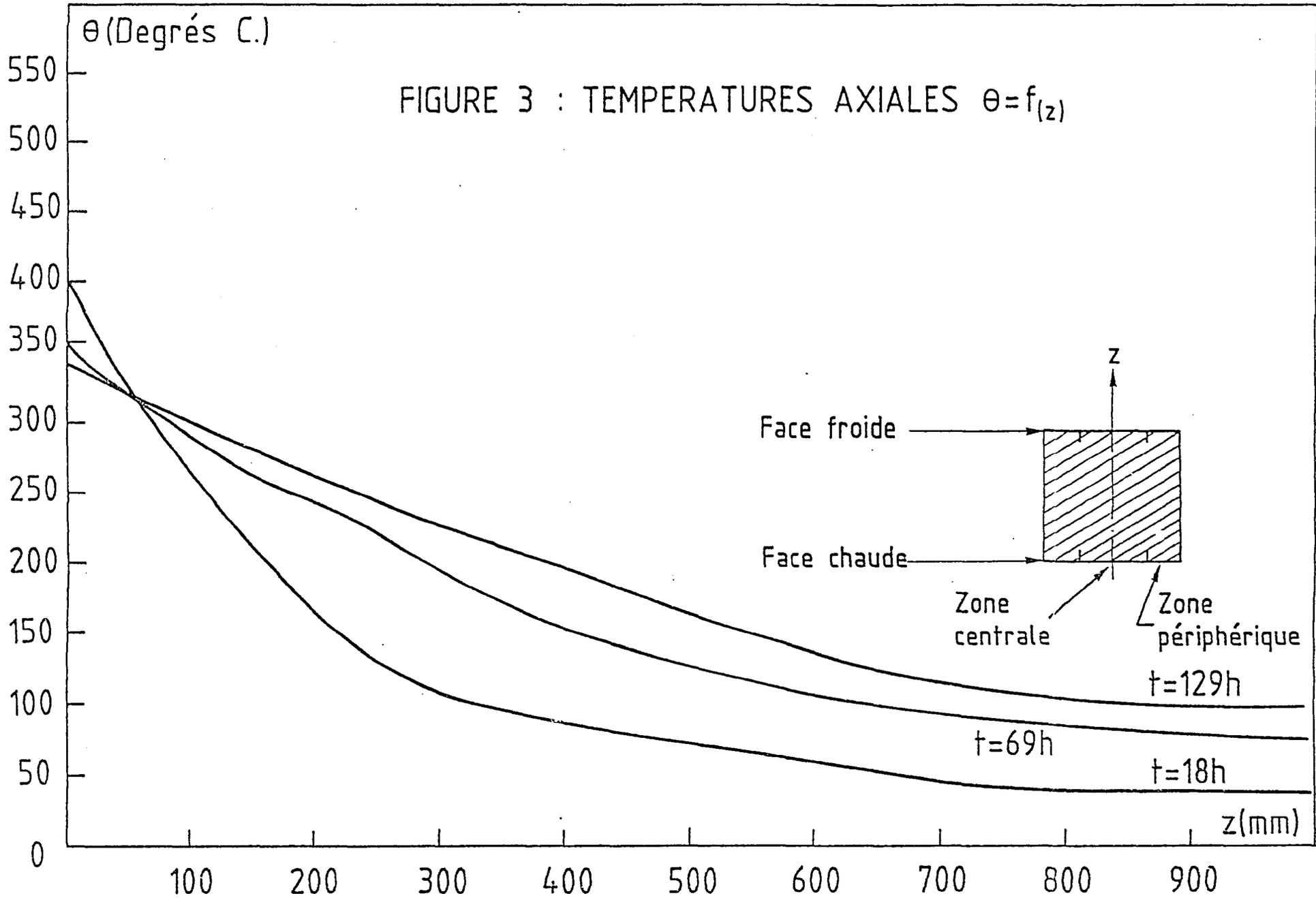
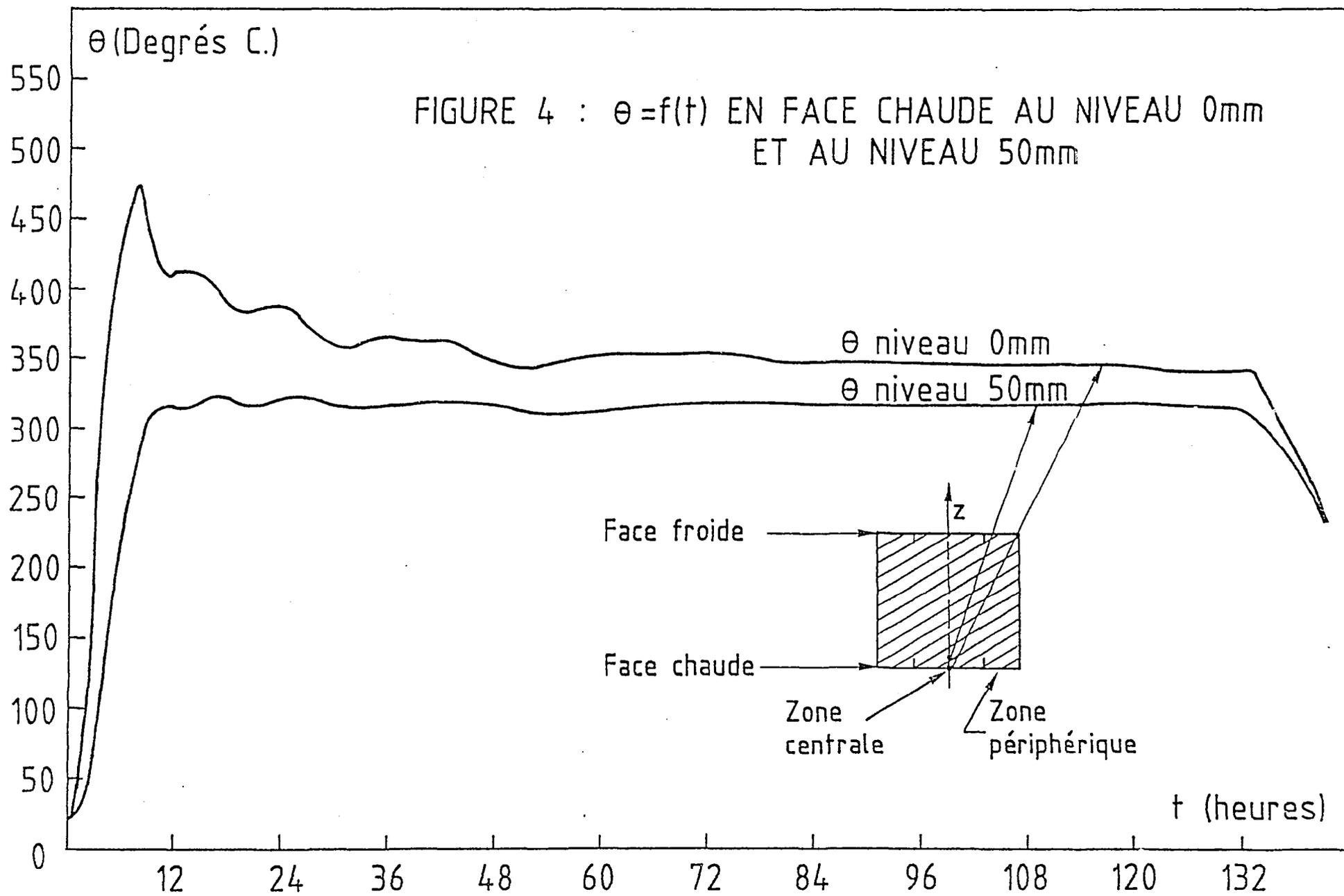


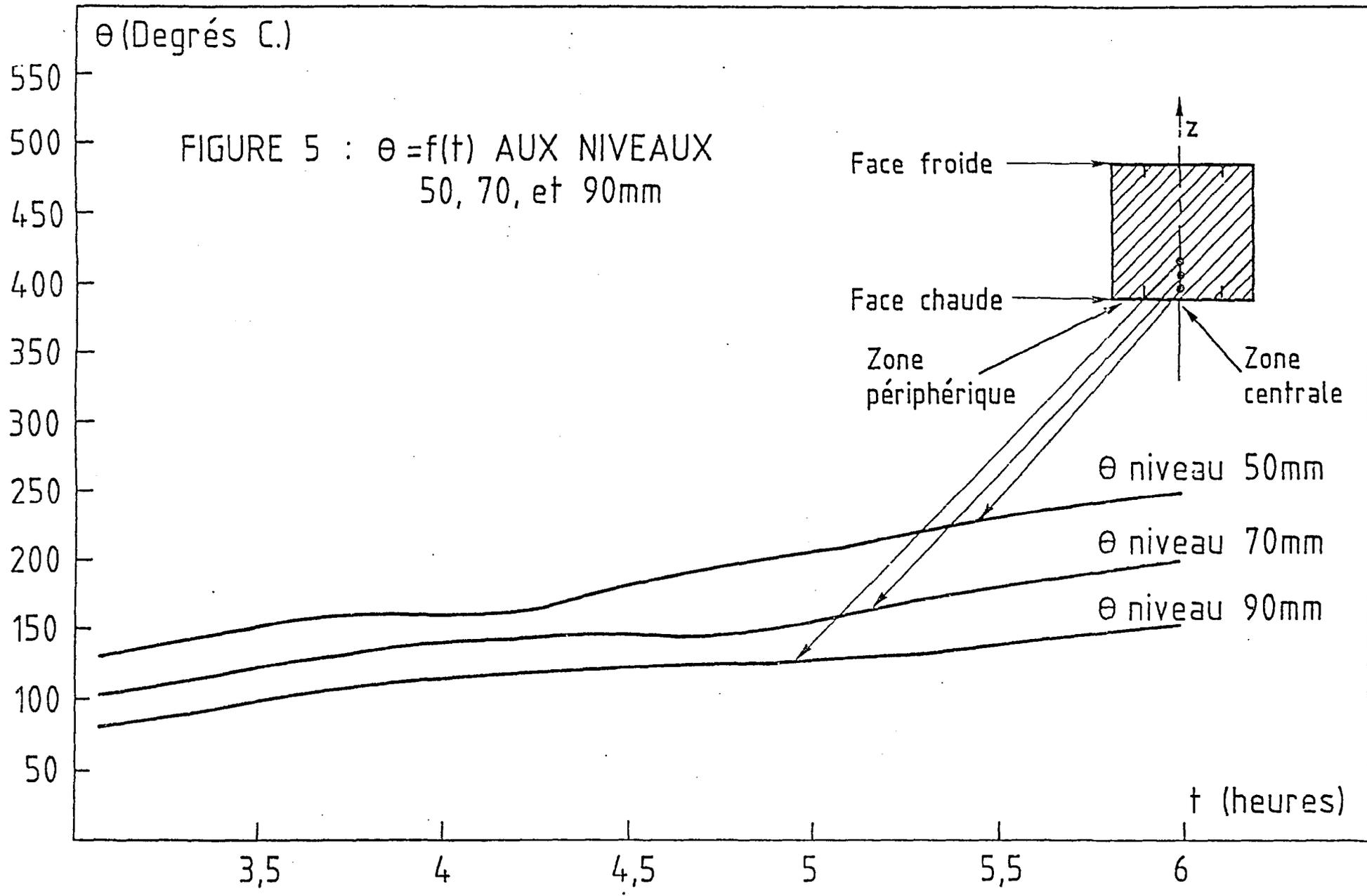
FIGURE 1 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL

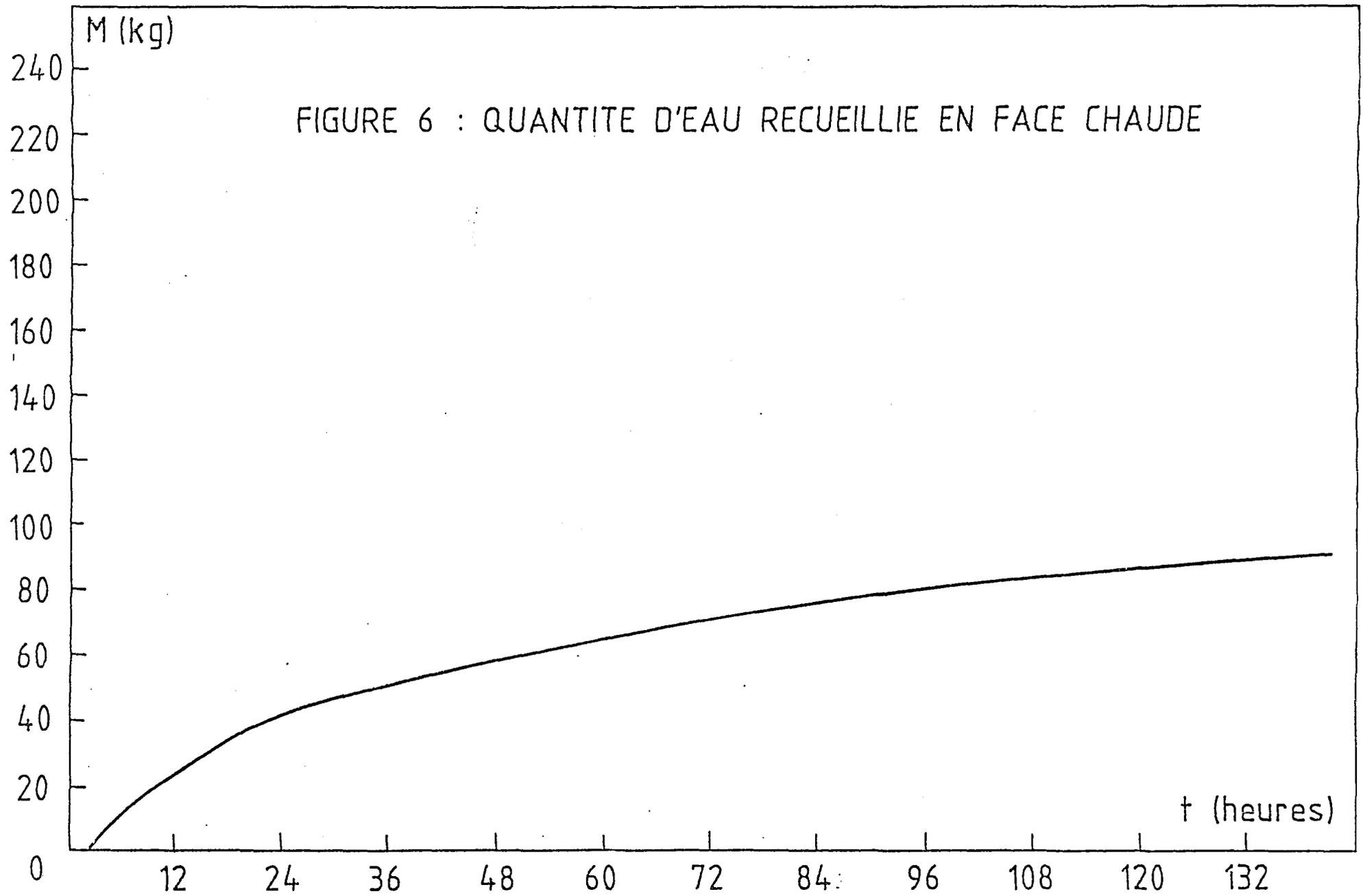
FIGURE 2 : CIRCUIT EXPERIMENTAL DE MESURE DE L'EAU RELACHEE PAR LE BETON





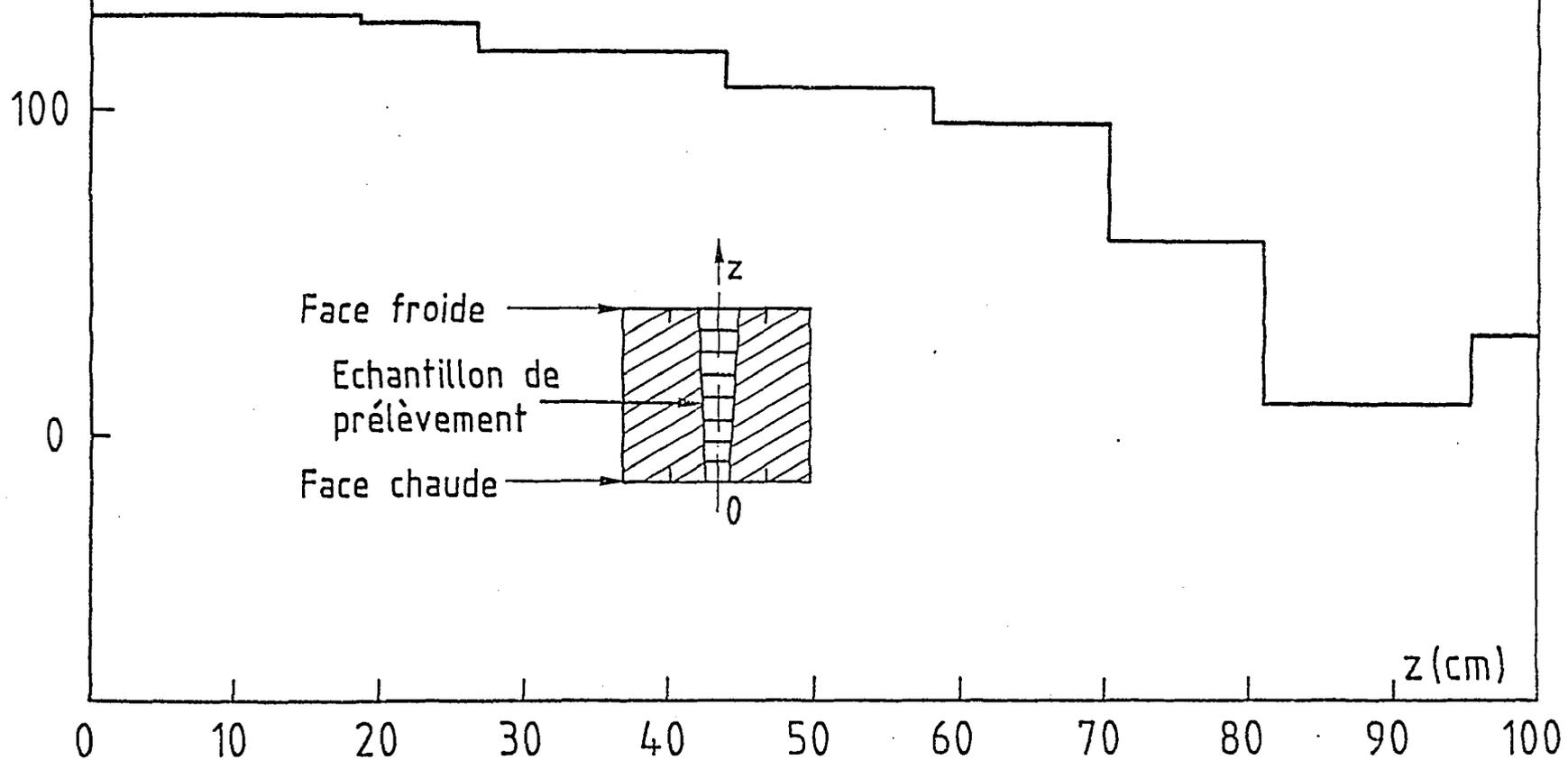






Masse d'eau perdue  
kg eau / m<sup>3</sup> béton

FIGURE 7 : HUMIDITE PERDUE PAR LE BETON



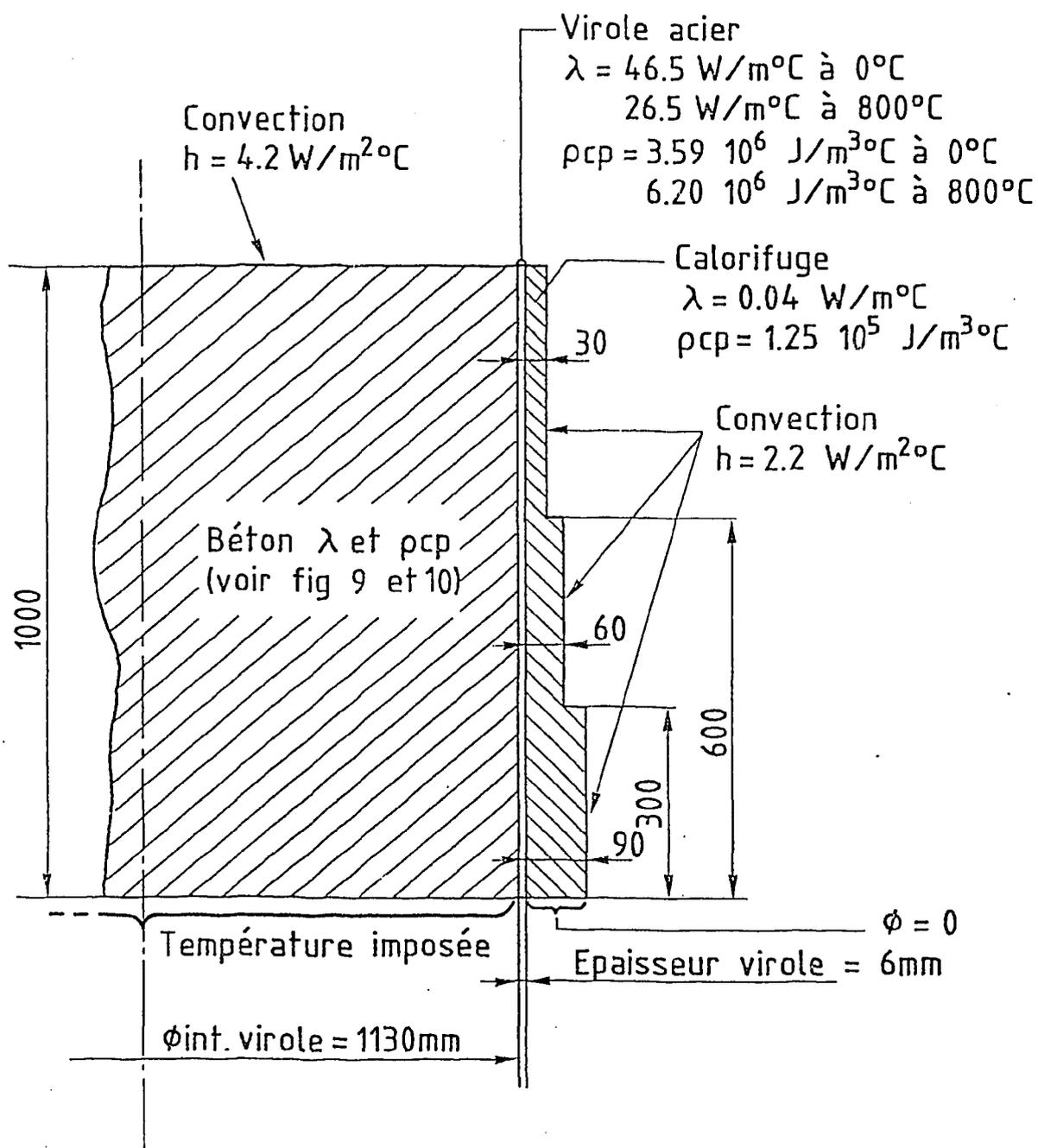
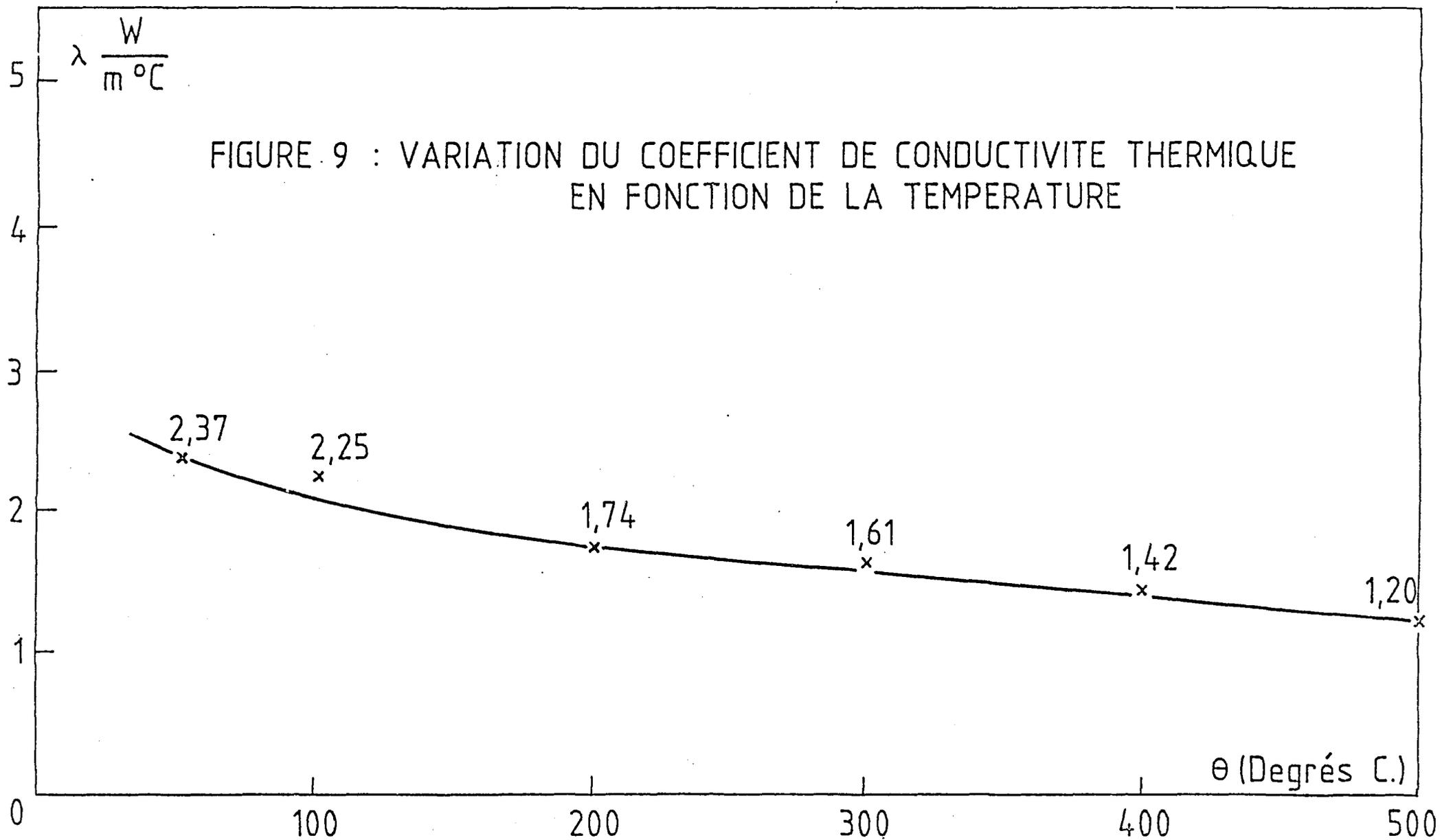


FIGURE 8 : CALCUL DELFINE - DONNEES



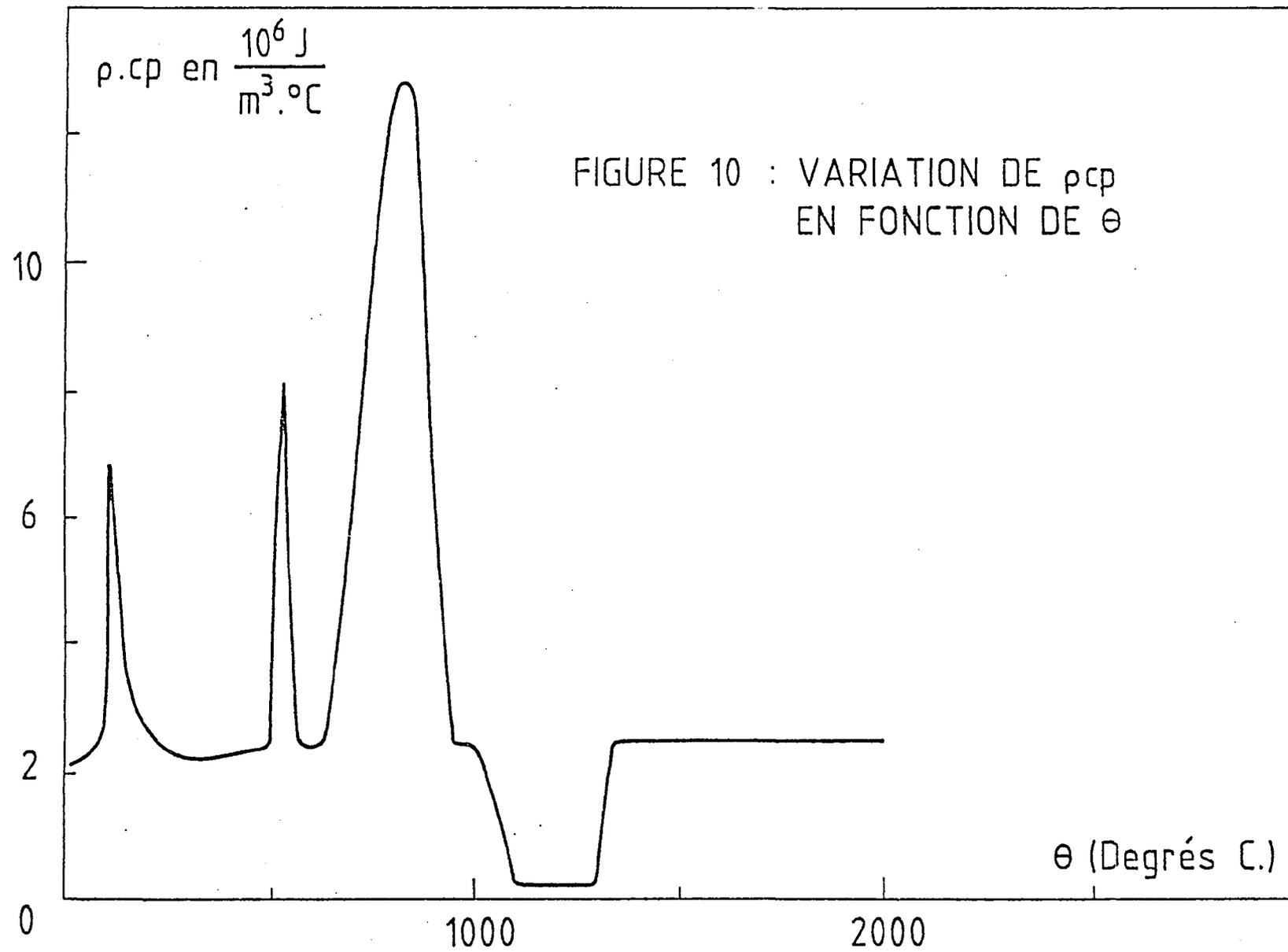
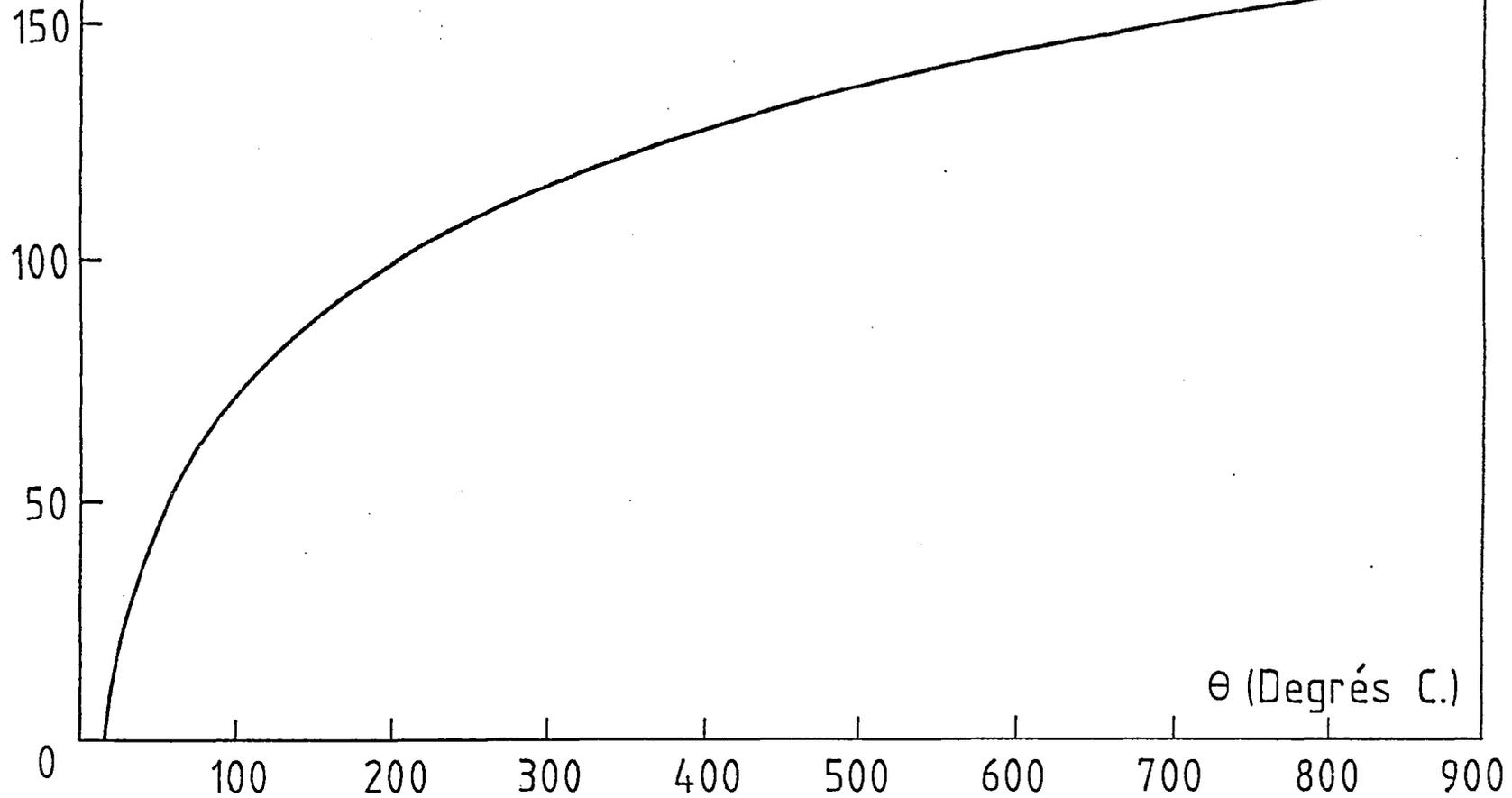
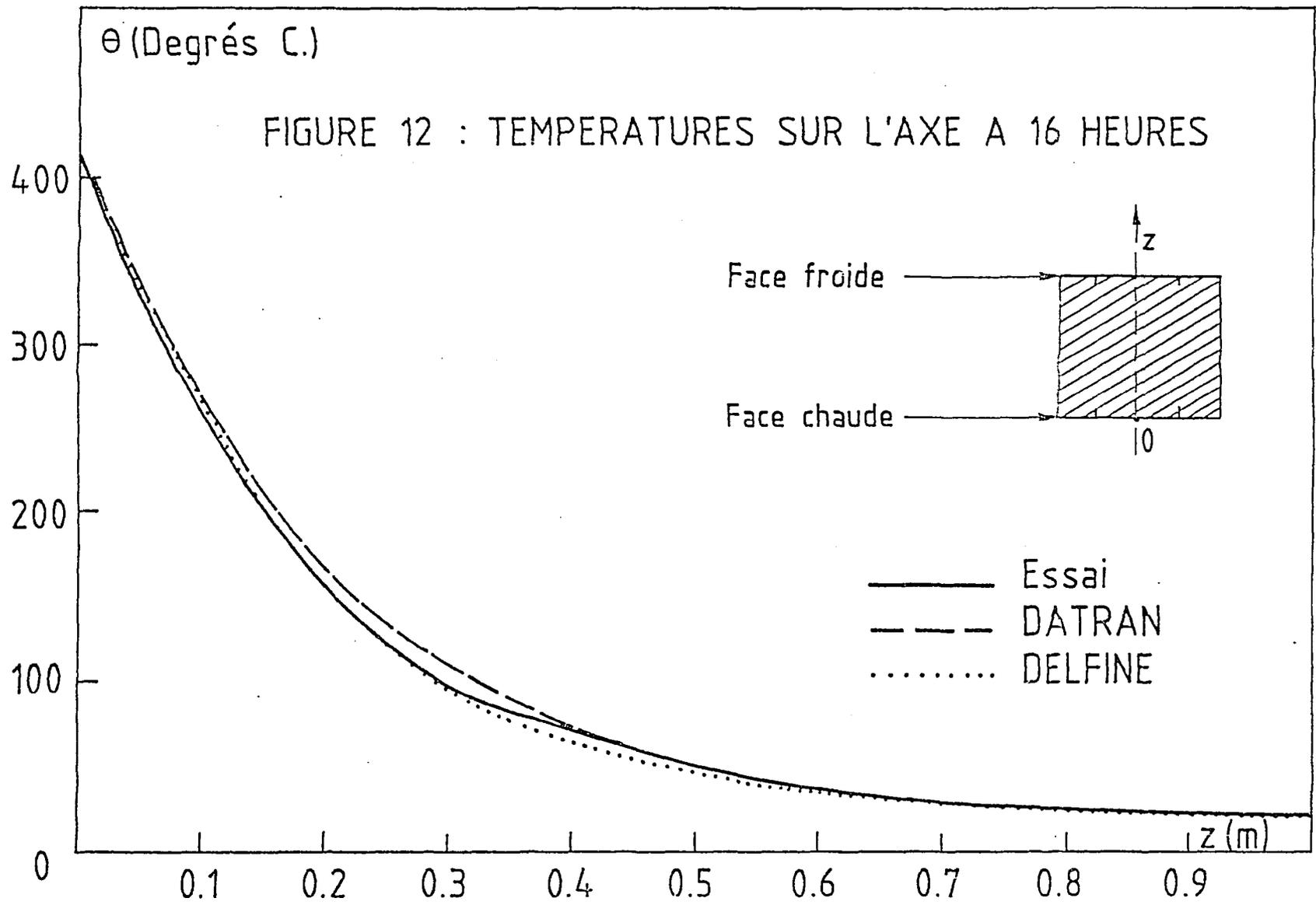


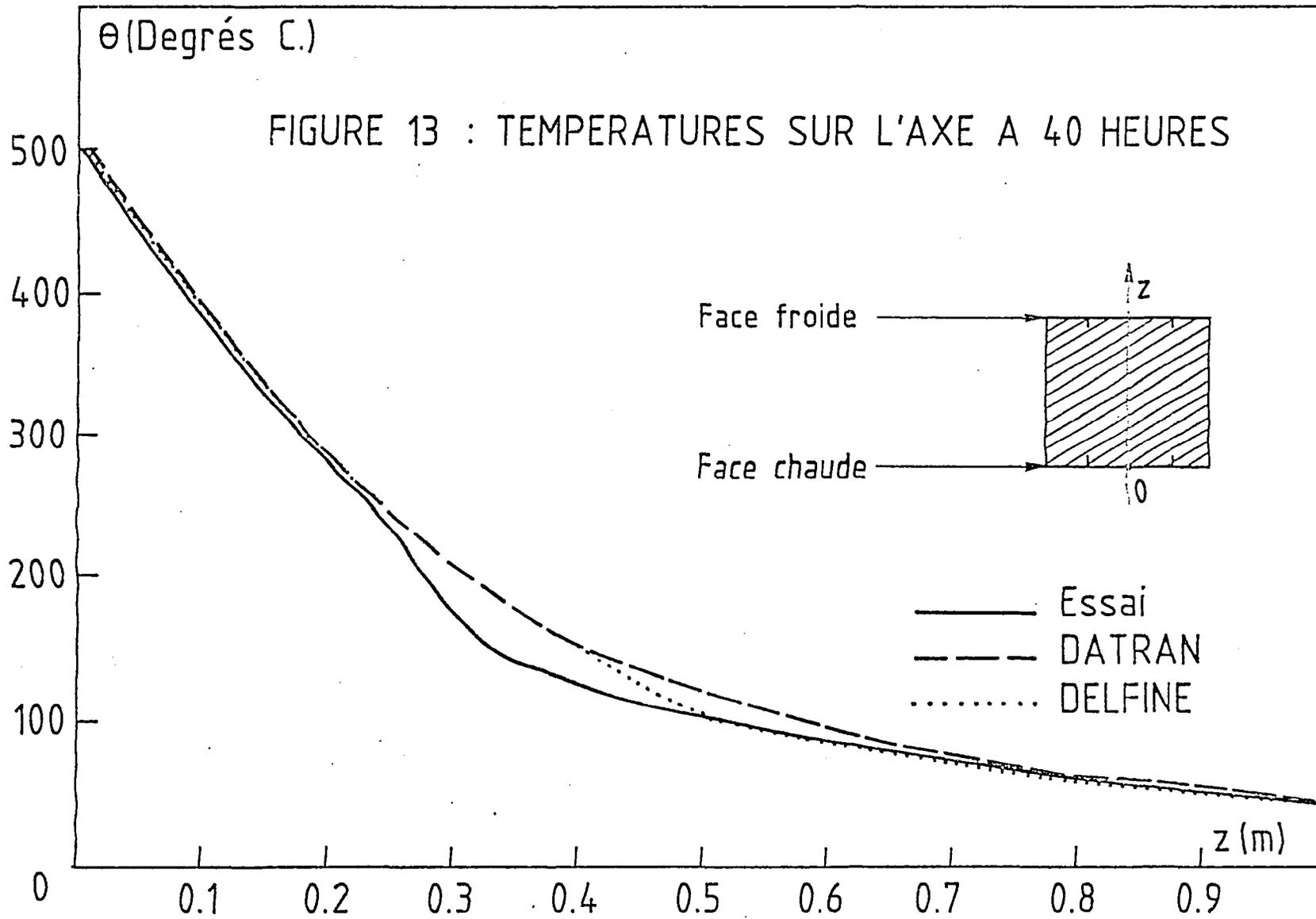
FIGURE 10 : VARIATION DE  $\rho c_p$   
EN FONCTION DE  $\theta$

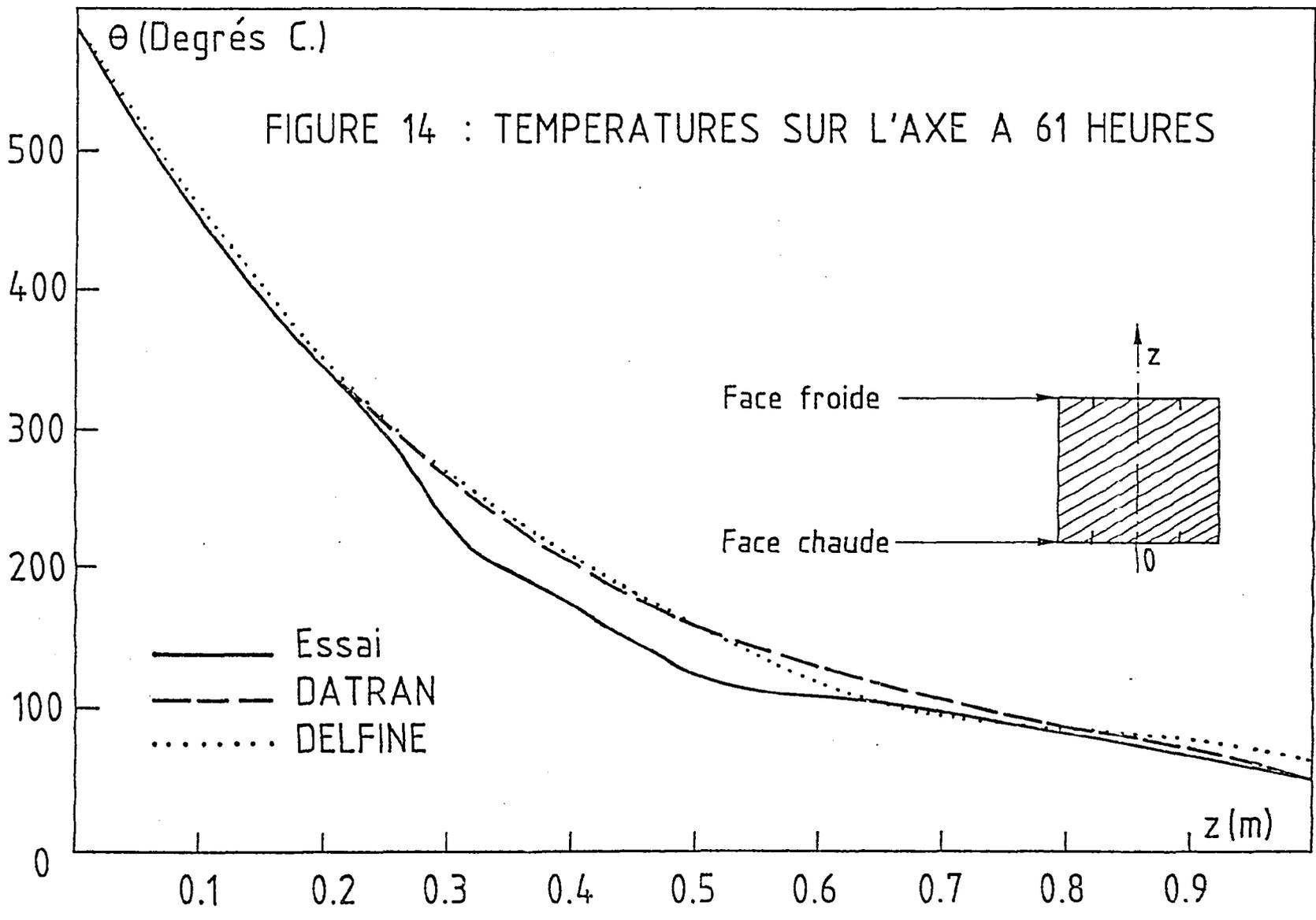
Perte d'eau (kg/m<sup>3</sup>)

FIGURE 11 : PERTE D'EAU EN FONCTION DE LA TEMPERATURE









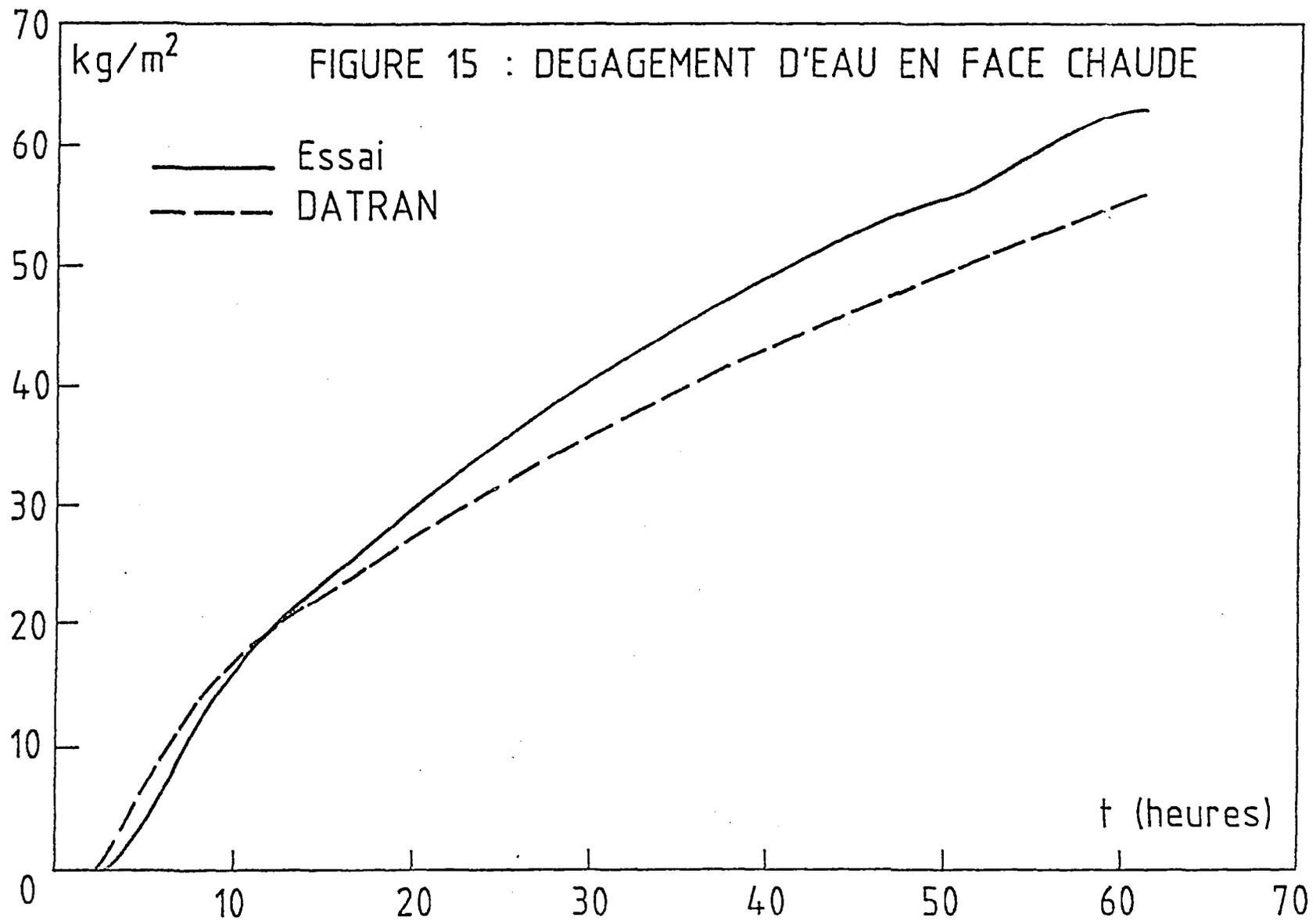


FIGURE 16 : REPRESENTATION DU BETON

