

AFREM-Bretagne - Ingénierie et Matériel Agro-Alimentaire
14 Rue François-Robin
56100 LORIENT

Ecole Nationale d'Ingénieurs des Techniques des Industries Agricoles et Alimentaires
(ENITIAA)
Laboratoire de Génie des Procédés Alimentaires
Domaine de la Géraudière
44072 NANTES CEDEX 03

Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER (IFREMER)
Laboratoire de Génie Alimentaire
Rue de l'Île d'Yeu
44037 NANTES CEDEX 01

CORNIER G., COLIN D., GUIHARD L., LE BAIL A., LEROY M., ORCIL Y.,
RANNOU M.H., VALLET J.L.

**ETUDE, CONCEPTION ET EXPERIMENTATION D'UN
PASTEURISATEUR INDUSTRIEL POUR LA PREPARATION
DE PLATS CUISINES EN CYCLE COURT**

Avril 1994

Décision d'aide n° 89 G 0505

Résumé

Le cuiseur-pasteurisateur qui a fait l'objet de l'étude est destiné à réaliser des cuissons courtes de plats cuisinés sous vide.

Le prototype expérimenté comportait les caractéristiques originales suivantes :

- cuisson et refroidissement par immersion dans des cuves distinctes qui restent pleines d'eau pendant la période de production.**
- Disposition verticale des produits à cuire.**
- Agitation des bains par bullage d'air.**
- Transfert automatique des produits entre les différents postes de traitement.**

Les mesures de température en différents points du bain et dans les produits ont permis de déterminer les conditions de fonctionnement (chauffage, refroidissement, bullage) qui assurent l'homogénéité des bains et rendent la machine apte à être un pasteurisateur.

Remerciements

Nous tenons à adresser nos remerciements à :

Mme BOQUIER Martine et Melle PASCO Maryvonne, Techniciennes, qui ont largement participé aux expérimentations nécessaires à la réalisation du travail.

Melle BENECH Nadine, secrétaire, dont l'habileté a contribué à la présentation de notre étude.

TABLE DES MATIERES

	Page
Introduction	1
Chapitre 1. LA CUISSON DE PRODUITS ALIMENTAIRES, ASPECTS THEORIQUES	2
1.1 Introduction	
1.2 La valeur pasteurisatrice	
1.3 La valeur cuisatrice	
1.4 Les barèmes de cuisson	
1.5 La cuisson sous vide	
Chapitre 2. LE CUISEUR - REFROIDISSEUR AFREM	3
2.1 Le principe	
2.2 Description des différents éléments	
2.2.1 Les cuves	
2.2.2 Les résistances	
2.2.3 Le système de bullage	
2.2.4 Le chargement et le transfert des produits	
2.3 Les autres systèmes existants	
2.4 Conclusion	
Chapitre 3. MISE AU POINT D'UN SYSTEME DE MESURE	15
3.1 Introduction	
3.2 Essai de cuisson au bain-marie de filets de poisson ensachés	
3.2.1 Le matériel utilisé	
3.2.2 Les mesures effectuées	
3.2.3 Conclusion	
3.3 Recherche d'un succédané	
3.3.1 ⁿ Caractéristiques physiques du succédané	
3.3.2 Quel succédané employer ?	
3.4 Etude de l'évolution de la température sur de la tylose	
3.5 Conclusion	

Chapitre 4. DETERMINATION DES PARAMETRES DE REGULATION DE LA MACHINE 21 AVEC CHAUFFAGE ELECTRIQUE

- 4.1 Introduction
- 4.2 La régulation de la température de la cuve de cuisson
 - 4.2.1 Schéma fonctionnel de l'ensemble bouclé
 - 4.2.2 Identification des éléments et fonctionnement
 - 4.2.3 Méthodes de réglage du régulateur
- 4.3 Etude expérimentale du fonctionnement
 - 4.3.1 Montée en température et stabilisation : réponse en poursuite à un échelon de consigne
 - 4.3.2 Le plongement des produits : réponse à une perturbation
 - 4.3.2.1 Influence de la charge
 - 4.3.2.2 Influence de la température initiale du produit
 - 4.3.2.3 Influence de la puissance disponible
 - 4.3.3 La stabilité de la réponse en régime permanent
- 4.4 Conclusion

Chapitre 5. TESTS DE LA MACHINE AFREM AVEC CHAUFFAGE ELECTRIQUE 27

- 5.1 Introduction
- 5.2 Conditions expérimentales
- 5.3 Etude de l'homogénéité du bain chaud
 - 5.3.1 L'obtention de l'homogénéité de température, mode opératoire
 - 5.3.2 Résultats expérimentaux
 - 5.3.3 Conclusion
- 5.4 Etude de l'élévation de température au centre thermique des pains de tylose
 - 5.4.1 Résultats expérimentaux
 - 5.4.1 Conclusion
- 5.5 Etude du refroidissement
 - 5.5.1 Etude de l'homogénéité du bain froid
 - 5.5.2 Evolution de la température du produit lors du refroidissement avec bullage
 - 5.5.2.1 Refroidissement eau de ville
 - 5.5.2.2 Pré-refroidissement eau de ville + refroidissement eau glacée
 - 5.5.2.3 Refroidissement à l'eau réfrigérée

- 5.5.3 Exploitation des résultats
 - 5.5.3.1 Temps de demi-refroidissement
 - 5.5.3.2 Influence de la charge
 - 5.5.3.3 Influence du type de refroidissement, configuration d'une machine industrielle
- 5.5.4 Valeurs pasteurisatrices lors du refroidissement
- 5.5.5 Conclusion

Chapitre 6. TESTS DE LA MACHINE AFREM AVEC CHAUFFAGE AU GAZ

49

- 6.1 Introduction.
- 6.2 Fonctionnement du Tube Imméré Compact. Puissance fournie.
- 6.3 Une cuisson type : évolution de la température dans les pains de tylose.
 - 6.3.1 Conditions expérimentales.
 - 6.3.2 Résultats et analyse.
- 6.4 Pertes de chaleur dans la cuve de cuisson.
- 6.5 Optimisation du bullage.
 - 6.5.1 Effet du bullage sur l'homogénéité de température du bain.
 - 6.5.2 Influence du bullage sur la cuisson.
- 6.6 Conclusion

Chapitre 7. TESTS DE LA MACHINE AFREM AVEC LES PRODUITS EN POSITION HORIZONTALE

64

- 7.1 Introduction.
- 7.2 Méthode et conditions expérimentales.
 - 7.2.1 Méthodes.
 - 7.2.2 Dispositif expérimental.
 - 7.2.3 Matériel de mesure et méthode d'exploitation.
- 7.3 Résultats expérimentaux et analyse statistique
 - 7.3.1 Résultats expérimentaux
 - 7.3.2 Analyse statistique des résultats
- 7.4 Conclusion

Chapitre 8. CONSTITUTION ET FONCTIONNEMENT DE L'ENSEMBLE DE LA MACHINE 74

8.1 Constitution de la machine

8.2 Fonctionnement de la machine

Chapitre 9. ETUDE DE CUISSONS SOUS VIDE EN CYCLE COURT 76

Conclusion 78

Liste des annexes

Annexe n° 1 : La cuisson des produits alimentaires, Etude bibliographique, aspects théoriques.

Annexe n° 2 : Les autres matériels de cuisson sous vide.

Annexe n° 3 : Le matériel utilisé : système de mesure.

Annexe n° 4 : Diagrammes d'étude de l'élévation de température à coeur des pains de tylose (chauffage électrique).
Diagrammes d'étude du refroidissement à coeur de pains de tylose.

Annexe n° 5 : Fonctionnement du Tube Immergé Compact (TIC).

Annexe n° 6 : Effet de la position des thermocouples sur la précision.

Annexe n° 7 : Cahier des charges et automatisme du cuiseur-refroidisseur.

Annexe n° 8 : Etude de cuissons sous vide en cycle court - cuisson du poisson.

Introduction

Le changement des modes de consommation alimentaire et l'ingéniosité des cuisiniers ayant entraîné la création d'une nouvelle catégorie de produits alimentaires : les plats cuisinés sous vide, les différents participants à la création de ces produits ont dû trouver des procédés de cuisson adaptés à leur fabrication.

C'est dans ce cadre que la société AFREM-Bretagne a construit une machine répondant à ce nouveau besoin.

Les caractéristiques de cette machine diffèrent de celles rencontrées sur les machines classiques issues des cuiseurs-pasteuriseurs-stérilisateurs ; l'une des idées directrices de sa conception est de lui donner la possibilité de traiter des produits à cuisson courte (produits de la mer en particulier).

Un prototype a donc été construit possédant des caractéristiques originales.

- Cuisson par immersion en cuve chaude, chauffée directement.
- Refroidissement par immersion en cuve froide.
- Les cuves restent pleines d'eau pendant la période de production.
- Disposition verticale des produits à cuire.
- Agitation des bains par bullage d'air.
- Transfert automatique des produits entre les différents postes de traitement.

L'objet de l'étude que nous avons menée était donc essentiellement de vérifier que le procédé mis en oeuvre possédait les capacités nécessaires pour maîtriser la cuisson et la pasteurisation, et que sa mise en oeuvre assurait la sécurité des consommateurs.

Notre étude a donc consisté :

- A replacer la conception de la machine dans sa problématique théorique et réglementaire.
- A situer la machine parmi les autres machines préexistantes.
- A faire fonctionner le prototype et à en corriger les faiblesses pour obtenir une machine expérimentale apte à l'utilisation dans un atelier de production.
- A mettre au point un système de mesure adapté permettant de tester ses performances.
- A tester les performances de la machine avec les deux systèmes de chauffage possibles (électricité, gaz).

Au cours de cette étude, nous nous sommes particulièrement attachés à déterminer les conditions dans lesquelles on obtient une homogénéité suffisante de température, puisque c'est cette homogénéité qui garantit une homogénéité de pasteurisation, et donc, est à la base de la qualité sanitaire des produits.

L'ensemble de l'étude nous conduira à exprimer les caractéristiques, (dimensions, paramètres essentiels de fonctionnement...) à respecter, pour obtenir une machine fonctionnelle.

CHAPITRE 1

LA CUISSON DE PRODUITS ALIMENTAIRES. ASPECTS THEORIQUES

1.1) INTRODUCTION

La cuisson (voir étude bibliographique en annexe n° 1) consiste à porter un produit alimentaire à des températures généralement supérieures à 50°C ; le maintien, pendant un certain temps, des produits alimentaires à ces températures provoque des réactions physico-chimiques responsables de modifications organoleptiques (3, 13, 17, 18, 19) qui confèrent au produit les caractéristiques d'un produit cuit. Les modifications dépendent du type de produit, des niveaux de température utilisés, du mode de traitement thermique mis en oeuvre.

La cuisson s'accompagne d'une destruction plus ou moins importante des micro-organismes (7, 12, 16, 17) présents dans les produits soumis à la chaleur, c'est la pasteurisation (6, 15).

1.2) LA VALEUR PASTEURISATRICE

Afin de quantifier l'efficacité de la pasteurisation, on a créé le concept de valeur pasteurisatrice.

La **valeur pasteurisatrice** $VP = P_{70}^z(T)$ d'un traitement thermique est la durée nécessaire, en minutes, pour obtenir, à 70°C la réduction du nombre d'un germe de référence de 10^{13} à 10 par gramme de produit (15).

Pour un traitement à une autre température (T en °C), il est possible de calculer le temps nécessaire t pour obtenir le même effet qu'à 70°C en utilisant la relation suivantes (12, 14) :

$$P_{70}^z(T) = t \times 10^{\frac{T-70}{z}}$$

t = durée de maintien (en minute) à la température T(°C)

z = variation de température qui entraîne une variation du temps de réduction décimale d'un facteur 10.

Dans les traitements thermiques réels, la température subit des variations, au moment du chauffage et du refroidissement ; on détermine en conséquence l'efficacité du traitement en cumulant les valeurs pasteurisatrices partielles.

Chaque valeur pasteurisatrice partielle $P(T_i)$ est calculée pour une température T_i intermédiaire considérée constante pendant une durée de 1 minute.

$$P(T_i) = 10^{\frac{T_i-70}{z}}$$

La valeur pasteurisatrice a une influence certaine sur la qualité microbiologique du plat cuisiné et donc sur sa durée de conservation. C'est pourquoi elle a été choisie, avec la température maximale atteinte à cœur, pour déterminer les catégories 1, 2 et 3 dans lesquelles sont classés les plats cuisinés (2) :

catégorie	1	2	3
valeur pasteurisatrice	< 100	> 100	"plats pasteurisés"
température à cœur	$57^{\circ}\text{C} < \theta < 65^{\circ}\text{C}$	$\theta > 65^{\circ}\text{C}$	$\theta > 70^{\circ}\text{C}$
DLC maximum	14 jours	21 jours	42 jours

1.3) LA VALEUR CUISATRICE

La valeur pasteurisatrice a servi de modèle à la création du concept de Valeur Cuisatrice (15).

Celle-ci permet de quantifier les effets du maintien d'un produit à une température pendant un temps donné sur les qualités organoleptiques d'un produit. Cette notion permet de s'affranchir de la diversité des effets constatés sur les catégories de produits.

On caractérise par cette notion de valeur cuisatrice des modifications qualitatives et quantitatives survenant en fonction de la température et du temps.

La valeur cuisatrice totale du traitement, à température variable, correspond à la somme des valeurs cuisatrices partielles déterminées en cours de traitement à des instants donnés.

On prend en compte la diversité des cuissons par l'intermédiaire des paramètres D, z et T_{ref} (15, 10).

Le paramètre D correspond au temps de destruction thermique ; il est défini différemment suivant la nature des modifications prises en compte.

* Pour des modifications quantifiables (dégradation des vitamines; dépôt de gelée pour le jambon), D correspond au temps nécessaire, à une température donnée, pour diviser par 10 la grandeur prise en compte ou pour la multiplier par 10 dans le cas où la modification est indésirable.

* Pour des modifications appréciées de manière subjective par un jury de dégustateur qui utilise une échelle de notation, D correspond au temps nécessaire, à une température donnée, pour passer de la note la plus élevée à la note la plus basse.

Le paramètre z correspond à l'augmentation ou la diminution de température permettant de diviser ou de multiplier par 10 le paramètre D (15).

Il est à noter que le choix d'un critère pour la valeur de z varie en fonction du produit, et de l'importance que l'on donne à une caractéristique plutôt qu'à une autre. Cependant, un critère donné ne pouvant caractériser à lui seul l'ensemble des modifications qualitatives survenant au cours de la cuisson, il est préférable de choisir une valeur de z qui puisse représenter le plus fidèlement possible les effets de la cuisson.

La température de référence doit correspondre à un maximum de types de cuisson possibles. Elle est en général relativement proche des températures de cuisson appliquées à un produit donné (17):

- en général: 100°C;
- pour le jambon: 70°C;
- pour le poisson: 80°C.

1.4) LES BAREMES DE CUISSON (17)

Un barème de cuisson est un couple (temps, température), dont la combinaison donne des résultats plus ou moins satisfaisants en fonction des contraintes suivantes (17) :

- application d'une valeur pasteurisatrice minimale à l'endroit où le produit est le plus long à s'échauffer;
- application d'une valeur cuisatrice optimale;
- réduction de l'écart de valeur cuisatrice entre la surface et le coeur du produit;
- application de la température la plus élevée possible, en tenant compte des contraintes évoquées ci-dessus, afin de réduire le temps de cuisson, donc l'immobilisation des appareils.

Un barème de cuisson est spécifique à un aliment donné, et on essaie au mieux de gérer les hétérogénéités de matière première et la diversité des réactions engendrées. La valeur pasteurisatrice et la valeur cuisatrice sont deux nombres susceptibles de servir à quantifier les effets d'une cuisson.

L'optimisation d'une cuisson consiste à trouver le juste compromis entre les impératifs visant d'une part à garantir une qualité hygiénique satisfaisante, et d'autre part à obtenir les caractéristiques organoleptiques et nutritionnelles définies et attendues par le consommateur.

1.5) LA CUISSON SOUS VIDE

Le procédé de cuisson sous vide consiste soit à réaliser la cuisson - pasteurisation de produits crus préalablement emballés sous vide, soit à effectuer une pasteurisation de produits précuits emballés sous vide (4).

L'emballage sous film imperméable aux gaz et aux liquides, sous pression réduite permet d'allonger la durée de conservation du produit, s'il est associé au respect d'une hygiène satisfaisante et à l'utilisation du froid (21).

Le conditionnement sous vide exerce sur la flore microbienne une action inhibitrice (5, 21, 22) et une action sélective (8, 9, 11, 21).

Ces effets ajoutés à l'étanchéité de l'emballage sont favorables à l'allongement de la durée de conservation.

La cuisson sous vide s'apparente à une cuisson en papillote (12).

Le produit étant protégé de son environnement, les pertes en composés volatils par évaporation sont évitées, ce qui entraîne un renforcement du goût et de la saveur des produits. Par ailleurs, les rendements de cuisson sont considérablement augmentés; ils sont voisins de 100% dans ce cas, pour une pièce de boeuf, contre 70-80% avec une cuisson au four.

L'intérieur de l'emballage étant rapidement saturé de vapeur d'eau, la migration de l'eau en dehors du produit est freinée, ce qui améliore nettement la jutosité d'un filet de poisson ou d'un morceau de viande.

L'avantage lié au vide réside en une amélioration du coefficient global de transfert d'énergie car l'air, mauvais vecteur de chaleur, est éliminé. Par contre, l'eau maintenue dans le produit est un bon véhicule de la chaleur.

Par ailleurs, la faible teneur en oxygène, dans le produit et à sa surface, limite considérablement les risques d'oxydation des matières grasses. Ceci est particulièrement intéressant pour le poisson qui renferme de nombreux acides gras insaturés très sensibles à ces réactions d'oxydation.

La cuisson sous vide se faisant à des températures où les réactions chimiques sont optimales, les produits présentent des qualités organoleptiques supérieures aux produits traditionnels.

Mais "le vide d'air" par lui-même ne constitue pas un procédé de conservation. Il n'est qu'un adjuvant, efficace certes mais un adjuvant seulement, aux méthodes de conservation réelles qui existent: le (très) froid, le (très) chaud ou le (très) sec" (20, 21).

Une des caractéristiques principales des plats cuisinés sous vide réside dans le conditionnement étanche aux gaz et aux liquides, ce qui les rapproche des conserves (21).

Mais ce ne sont que des conserves mal stérilisées! En effet la stérilisation des produits cuits sous vide n'est pas envisageable dans la mesure où de tels barèmes annuleraient tout l'intérêt du procédé, qui est avant tout d'optimiser la cuisson (1).

Ainsi les traitements thermiques se font à des températures inférieures à 100°C, souvent entre 65 et 95°C (1). A ces températures les formes végétatives sont en général détruites mais les formes sporulées résistent; il est alors important de fabriquer ces produits en respectant des règles d'hygiène rigoureuses (20).

Pour assurer la sécurité du consommateur, l'utilisation du sous vide impose donc le respect de conditions très précises ; en conséquence une réglementation (2, 7, 20) édictant les règles à appliquer a fait l'objet d'arrêtés et de circulaires :

Arrêté du 26 juin 1974 (J.O. du 16 juillet 1974).

Circulaire du 3 mars 1975 (Direction des Services Vétérinaires)

Arrêté du 26 septembre 1980 (J.O. du 15 octobre 1980).

Arrêté du 3 mars 1981 (J.O. du 25 Mars 1981).

Note de Service DGAL/SVHA/N88/N°81 du 31 Mai 1988.

Liste bibliographique

- (1) Anonyme, 1986. - Cuisson sous vide : compte-rendu. *Revue Française de Diététique*, n°117-2, 16-18.
- (2) BEAUFORT A. et ROSSET R., 1989. - Durée de vie des plats cuisinés sous vide réfrigérés : adaptation de la réglementation française. *Industries Alimentaires et Agricoles*, n° 6, 475-477.
- (3) BOUTON P.E. et HARRIS P.V., 1972. - The effects of cooking temperature and time on some mechanical properties of meat. *Journal of Food Science*, 37(1), 140-144.
- (4) BOUVIER C., 1987. - Observations en réponse à l'article de MM. P. ESTOUP et J.J. BARBIERI sur le régime juridique de la cuisson sous vide. *Option Qualité*, n°37, 19-20.
- (5) BUREAU G., PASCAT B. et TISSOT L., 1987. - Conditionnement et qualité : conditionnement sous vide ou sous atmosphère modifiée et qualité bactériologique. *Viandes et Produits Carnés*, 8(5), 166-167.
- (6) CERF O., DOUSSET X. et BROSSARD J., 1988. - Pasteurisation et stérilisation thermique. In : *Microbiologie Alimentaire : aspects microbiologiques de la sécurité et de la qualité alimentaire*. Technique et Documentation (Lavoisier), Paris, vol. 1, 308-328.
- (7) ESTOUP P. et BARBIERI J.J., 1987. - Le régime juridique de la cuisson sous vide. *Option Qualité*, n°37, 12-18.
- (8) GOLA S. et ROSSI M., 1985. - Vacuum-packaging of fresh fish : effect of oxygen permeability of packaging material on the development of botulinal toxin. In : *Aptitude à la conservation des poissons et produits de la mer réfrigérés et congelés*. Institut International du Froid, Paris, 211-215.
- (9) HAUSCHILD A., POSTE L. et HILSHEIMER R., 1985. - Toxin production by *Clostridium botulinum* and organoleptic changes in vacuum-packaged raw beef. *Journal of Food Protection*, 48(8), 712-716.
- (10) KARL H. et SCHREIBER W., 1985. - Texture analysis of canned fish. *Journal of Texture Studies*, 16, 271-280.

- (11) KENNEDY J.E., OBLINGER J.L. et WEST R.L., 1980. - Fate of *Salmonella infantis*, *Staphylococcus aureus*, and *Hafnia alvei* in vacuum packaged beef plate pieces during refrigerated storage. *Journal of Food Science*, **45**, 1273-1277 et 1300.
- (12) KNOCKAERT C., 1989. - Une innovation dans l'art culinaire : la cuisson sous vide. Applications aux produits de la mer. *Equinoxe*, n°28, 12-19.
- (13) LAROCHE M., 1981. - *Libération et migration du jus pendant le chauffage de la viande*. Thèse de docteur-ingénieur, Ecole Nationale Supérieure des Industries Agricoles et Alimentaires, Massy, 116 p.
- (14) MAFART P., 1991. - Les traitements thermiques : 1- Optimisation des traitements thermiques. In : *Génie Industriel Alimentaire : les procédés physiques de conservation*. Technique et Documentation (Lavoisier), APRIA, vol. 1, 86-104.
- (15) MARTIN J.L., 1984. - Conduite des cuissons à l'aide des valeurs pasteurisatrice et cuisatrice. *Viandes et Produits Carnés*, **5**(2), 62-63, **5**(3), 107-108, **5**(4), 146-148, **5**(5), 204-207.
- (16) OTENG-GYANG K., 1984. - La chaleur en microbiologie alimentaire. In : *Introduction à la microbiologie alimentaire dans les pays chauds*. Lavoisier, Paris, 104-122.
- (17) PINEL M., 1987. - L'optimisation des cuissons : un impératif qualitatif et économique. *La Bretagne Agro-Alimentaire*, n° 6, 4-8.
- (18) PRIESTLEY R.J., 1979. - *Effects of heating on foodstuffs*. Applied Science Publishers, London, 417 p.
- (19) ROSSET R., LAMELOISE P. et ROUSSEL-CIQUARD N., 1984. - *La tendreté de la viande*. Recueil CDIUPA n°33, Edition APRIA, Paris, 234 p.
- (20) ROSSET R. et LAMELOISE P., 1988. - Risques microbiologiques liés à la fabrication et à la conservation de plats cuisinés. *Industries Alimentaires et Agricoles*, n° 4, 241-243.
- (21) ROSSET R. et LAMELOISE P., 1989. - *Conditionnement sous vide (viande, poisson, plats cuisinés)*. Recueil CDIUPA n° 41, Edition APRIA, Paris, 77 p.
- (22) VALIN C. et LACOURT A., 1980. - Etude comparée de différents modes de conditionnement des viandes bovines hachées et réfrigérées. *Industries Alimentaires et Agricoles*, n° 3, 123-129.

CHAPITRE 2

LE CUISEUR-REFROIDISSEUR AFREM

Le cuiseur refroidisseur type 1C-1R 120 G/E construit par la société d'ingénierie **AFREM BRETAGNE** est un prototype industriel n'ayant jamais fonctionné en industrie et qui a fait l'objet d'un brevet (n°89-08-232).

La présentation, ci-dessous, se propose de décrire, dans un premier temps, les principaux organes de la machine. Puis, figure une étude critique résultant d'une première série d'expérimentations et de l'étude bibliographique des autres machines. Par ailleurs, ces expérimentations ont permis d'effectuer les premières modifications visant à rendre la machine fonctionnelle.

2.1) LE PRINCIPE

Le cuiseur refroidisseur adopte le principe de la cuisson et du refroidissement par immersion dans l'eau. Les produits sont immergés alors qu'ils sont disposés dans des paniers supports.

Il se compose de deux cuves identiques de 750 l. : une d'eau chaude et une d'eau froide.

Le chauffage de l'eau dans la cuve chaude est réalisé initialement par 7 résistances électriques d'une puissance totale de 127 kW (une adaptation au chauffage au gaz naturel par tube immergé compact est prévue).

Le refroidissement a été prévu, dans un premier temps, à l'eau du réseau afin d'amener la température du produit aux environs de 10 à 15 °C, la fin du refroidissement s'effectuant en chambre froide. Un système de prise et dépôt des paniers supports, commandé par un automate programmable permet de transférer les produits entre chacune des positions.

On peut programmer les temps de séjour du produit dans chaque cuve et un système de régulation de la température du bain d'eau chaude doit permettre de maîtriser la cuisson.

Les trois originalités combinées de cette machine sont les suivantes:

*Le produit est transféré de la cuve d'eau chaude vers la cuve d'eau froide par un système de palan et de clippage du panier automatique ;

*L'homogénéité en température des bains d'eau chaude et d'eau froide est assurée par un système de bullage, (cette homogénéité sera vérifiée ultérieurement) ;

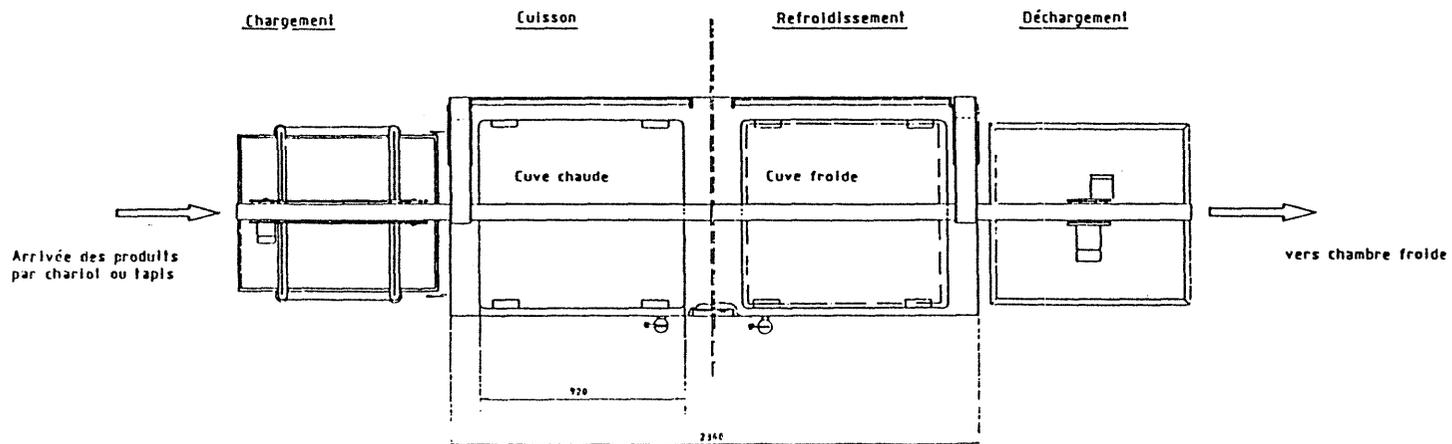
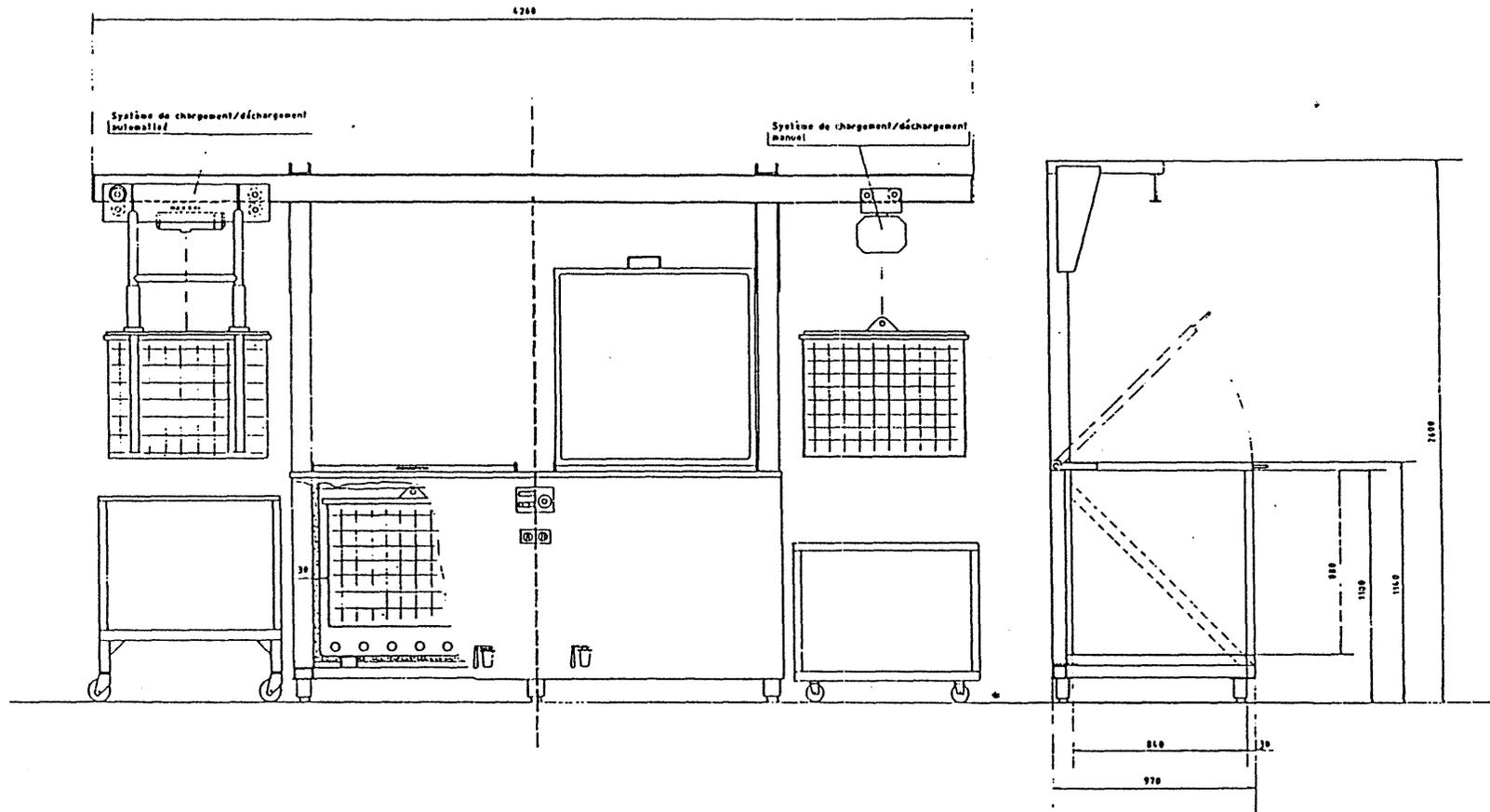
*les produits sont disposés verticalement et donc parallèlement au flux du fluide caloporteur.

2.2) DESCRIPTION DES DIFFERENTS ELEMENTS

Nous allons examiner plus précisément chaque élément qui constitue le cuiseur-refroidisseur (plan page ci-après).

Schéma de la machine AFREM

9



2.2.1) LES CUVES

Les dimensions intérieures des cuves sont les suivantes :

$$L = 0,92 \text{ m}$$

$$l = 0,92 \text{ m}$$

$$h = 0,88 \text{ m}$$

$$\text{volume total} = 750 \text{ l.}$$

$$\text{volume d'eau} = 500 \text{ l. (remplissage au } 2/3)$$

Les cuves sont en acier inoxydable. La cuve chaude est isolée par du polystyrène expansé de 20 mm sur les surfaces externes.

L'atmosphère humide qui règne autour du cuiseur-refroidisseur et les risques de débordement de la cuve lors de l'immersion des produits font qu'il est possible que la propriété isolante du polystyrène soit amoindrie car les possibilités de pénétration de la vapeur ou de l'eau sont nombreuses au niveau des jointures des plaques externes.

A noter que l'espace libre entre la masse de produits et la paroi est assez faible (2 cm) ; ce qui ne favorise pas les courants d'eau à ces endroits (contrairement à ce qui est utilisé dans d'autres procédés).

2.2.2) LES RESISTANCES

Le chauffage est assuré par 7 résistances branchées en parallèles, alimentées en 380 V et de 18 kW chacune. Chaque résistance est constituée de 3 brins et chaque brin est relié à une phase selon un montage de type étoile.

Remarque : On ne peut pas débrancher 1 brin sur 3 par résistance sans déséquilibrer les phases. On peut, par contre, relier les brins de plusieurs résistances et ainsi faire en sorte que les phases soient équilibrées.

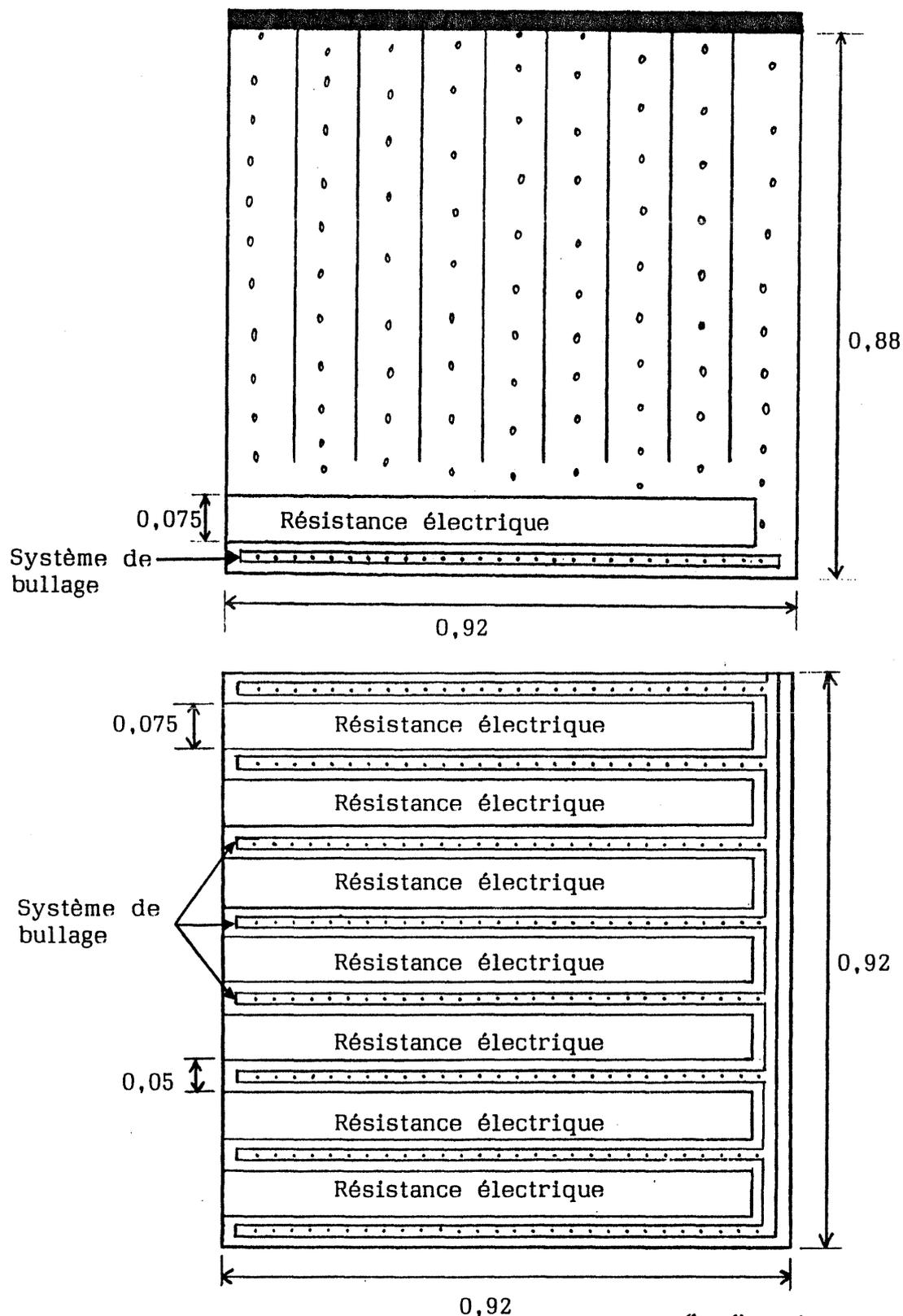
L'alimentation des résistances se fait par impulsion de 2 secondes, toutes les 2 secondes (à noter que la cadence des impulsions peut être modifiée en faisant varier le paramètre du régulateur).

2.2.3) LE SYSTEME DE BULLAGE

L'air insufflé à l'aide d'un surpresseur (pompe centrifuge à sec) n'engendre aucune souillure de l'eau par de l'huile comme le ferait un compresseur classique.

La dispersion de l'air sur tout le fond de la cuve se fait à l'aide de rampes munies de trous calibrés. La configuration initiale des rampes était perpendiculaire à l'alignement des produits et aux résistances. La disposition a été changée, on a adopté des rampes parallèles aux résistances. La circulation des bulles est en quelque sorte parallèle au flux thermique.

L'air s'échappant par les trous forme des bulles qui montent vers la surface entraînant avec elles l'eau chauffée. Il se crée donc entre les plaques de produit un courant d'eau vertical; il est cependant nécessaire que le niveau dans la cuve soit bien supérieur au niveau de la surface du cadre supportant les produits pour que les courants d'eau existent :



(les dimensions sont en mètre)

Le système en place a été refait en cuivre, pour des raisons économiques et pratiques, dans les ateliers de l'ENITIAA. Il a remplacé le système initial conçu en PVC, ce système ayant été détruit par la chaleur. Il pourra, par la suite, une fois son efficacité prouvée, être fait en inox, conformément à la législation en vigueur concernant les matériaux destinés à être en contact avec des denrées alimentaires.

Il est bien évident que l'air introduit à température ambiante dans la cuve se réchauffe avant de s'échapper inévitablement par le trop-plein entraînant un mélange air-vapeur. Nous déterminerons ultérieurement le débit d'air optimal pour diminuer le plus possible les pertes tout en assurant une parfaite homogénéité de température.

En ce qui nous concerne, nous avons établi une ouverture de vanne constante pour tous les essais avec chauffage électrique, correspondant à un bouillonnement important mais non excessif.

2.2.4) LE CHARGEMENT ET LE TRANSFERT DES PRODUITS

Les paniers sont conçus pour recevoir des plats cuisinés sous vide de différentes épaisseurs (de 1 à 5 cm). Ils sont formés par deux grilles verticales clippées qui ont théoriquement pour fonction de maintenir les sachets. Cependant, il s'avère que, pour que les sachets soient maintenus, il est nécessaire de les comprimer fortement, ce qui entraîne une dégradation de la présentation.

D'autre part, ce système est difficile à manipuler et il ne convient pas pour des produits de configuration particulière.

Ces paniers sont ensuite accrochés verticalement sur un cadre support. On peut placer 14 à 56 paniers par cadre selon l'épaisseur des produits. Cependant, il semble que 45 à 48 paniers chargés de produits liquides tels que des sauces soient un maximum, ce qui représente une charge de 172,8 kg maximum.

A noter que les paniers sont suspendus au cadre par l'intermédiaire de petites tiges de 2 cm dépassant des grilles. Ainsi, lorsque le chargement est faible ces grilles peuvent tomber lors des manipulations ou à cause du bouillonnement dans le bain. De même, lorsque le chargement est trop important, les tiges se chevauchent et nuisent à un bon rangement.

La manutention des cadres est assurée par un chariot transbordeur automatique situé sur un rail au dessus des cuves. Un automate programmable gère les séquences de transit des cadres, du poste de chargement vers la cuve chaude, puis vers la cuve froide, et enfin vers le poste de déchargement en assurant ainsi une utilisation maximum des cuves.

Deux fonctionnements ont été prévus: en manuel et en automatique. Cependant, en manuel, on agit directement sur les sorties et donc aucun système de sécurité n'est prévu (ex: on peut effectuer un déverrouillage alors que le panier est en position haute).

En automatique: le levage, l'introduction des paniers et les transferts se font selon deux vitesses différentes : une première phase à vitesse rapide puis, lorsqu'on arrive à la position d'arrêt ou de l'étape suivante, on passe en vitesse lente. En manuel, ces transferts ne peuvent se faire qu'en vitesse lente.

Remarque: Les temps de transferts sont certes très courts, mais ils doivent être pris en considération, notamment pour le transfert des produits de la cuve chaude vers la cuve froide pendant lequel la valeur pasteurisatrice continue de croître.

La pression d'air comprimé nécessaire à l'installation est de 7 à 8 bars en raison principalement de l'ouverture du couvercle qui demande une force importante et qui est effectuée par un vérin aéraulique.

2.3) LES AUTRES SYSTEMES EXISTANTS

(Voir annexe n° 2)

Pour la plupart, les matériels concurrents sont des adaptations des matériels de stérilisation, pasteurisation ou de cuisson à la vapeur.

Les modifications portent essentiellement sur :

- la mise en place d'un dispositif de régulation de température permettant d'obtenir des températures inférieures à 100°C.
- l'adoption d'un procédé de refroidissement rapide après cuisson.
- l'automatisation des cycles et l'utilisation d'automates programmables ou de micro-ordinateurs pour la commande des cycles.
- l'enregistrement centralisé des paramètres de fonctionnement.
- une enceinte unique qui sert successivement de four (vapeur + air) et d'enceinte de refroidissement.
- une enceinte unique avec un chauffage par aspersion d'eau chaude suivi d'un refroidissement par eau de ville ou eau glacée.
- une cuve unique avec un chauffage par immersion des produits suivi d'un refroidissement par eau glacée avec circulation par pompe de l'eau chaude et de l'eau froide.

2.4) CONCLUSION

Globalement, les expérimentations permettent de préciser les avantages et les inconvénients suivants:

* LES AVANTAGES

- Le système adopte le principe du bain-marie qui permet un bon transfert thermique entre le fluide caloporteur et le produit (meilleur qu'avec la vapeur).
- Le cuiseur-refroidisseur occupe un encombrement global minimal par rapport à d'autres procédés de cuisson par immersion.
- Son fonctionnement est simple.
- Le brassage de l'eau est simple, moins coûteux en investissement que les systèmes qui utilisent des pompes de circulation.
- Il convient à des unités de fabrication de petites tailles (cuisines centrales,...) où il permet d'effectuer des fabrications de petites quantités.

* INCONVENIENTS

- Les transferts de produit sont plus nombreux, ce qui multiplie les risques inhérents aux manipulations.
- Le chauffage et le refroidissement ne sont pas progressifs, ce qui peut engendrer des chocs thermiques importants à la périphérie des produits.
- Le maintien des produits en position verticale est pour certains préjudiciable à la qualité de présentation.

- La puissance électrique souscrite pour le chauffage est important : 126 kW.

- Il s'agit d'un prototype, pas encore totalement opérationnel, qui doit s'affirmer contre des machines déjà bien au point (voir annexe n° 2 : Thirode, Steamy Gourmet, Thermix, Steriflow, Cap-kold).

Ses atouts techniques résident dans ses dimensions compactes, sa facilité d'utilisation et sa simplicité. Toutefois, son prix devra être attractif pour contre-balancer les coûts énergétiques et pour qu'il satisfasse le marché des petites unités de fabrication. L'ajustement de la puissance de chauffage est l'un des problèmes à résoudre.

Dans toutes les machines existantes, les produits à cuire restent immobiles pendant le chauffage et le refroidissement, et les sachets ou les barquettes sont placés sur des claies horizontales ou en vrac, ce dernier point peut poser le problème de l'homogénéité des températures.

Par rapport à ces procédés, le cuiseur-refroidisseur AFREM présente deux particularités :

- Ce sont les produits qui circulent d'une cuve chaude à une cuve froide.
- Les produits sont placés verticalement, ce qui assure a priori une circulation optimale des fluides chaud et froid entre les produits. Nous devons vérifier que cette disposition et l'agitation permettent dans notre machine d'obtenir l'homogénéité des températures.

CHAPITRE 3

MISE AU POINT D'UN SYSTEME DE MESURE

3.1) INTRODUCTION

Le cuiseur-refroidisseur AFREM étant de dimension industrielle, il était matériellement impossible de travailler directement et immédiatement avec des produits alimentaires.

Par ailleurs, il s'agit là d'une machine particulièrement adaptée aux cuissons à cycle court, les montée et descente en température étant très rapides. Il était donc initialement prévu d'étudier essentiellement la cuisson sous vide du poisson.

C'est pourquoi, nous avons, dans un premier temps, cuit au bain-marie, des filets de poisson emballés sous vide. Ceci nous a permis de suivre l'évolution de la température à coeur en fonction du temps, d'avoir une idée de la valeur pasteurisatrice obtenue après l'application d'un couple (temps, température) déterminé et de mettre au point un système de mesure adapté à notre étude.

3.2) ESSAI DE CUISSON AU BAIN-MARIE DE FILETS DE POISSON ENSACHES

3.2.1) LE MATERIEL UTILISE (Annexe n°3)

La mesure de température est faite par des thermocouples placés en différents points de la charge ou au coeur des produits.

3.2.2) LES MESURES EFFECTUEES

Nous avons suivi l'évolution simultanée de 4 sachets: 3 dans lesquels les sondes ont été placées à coeur du produit; et un pour lequel la sonde était juste en surface.

La température du bain était de 85°C.

La valeur pasteurisatrice finale souhaitée était de 40.

La durée de chauffage a été de 13 min.

Les courbes obtenues sont consignées sur le diagramme 3.1. (p. 17).

On note des différences assez importantes entre les trois sondes à coeur, pour un même traitement. En effet :

- à $t = 10$ min, (ce qui correspond à 2 min de cuisson), on constate une différence de 6°C entre les sondes 3C (ou 5C) et 4C.

- à $t = 17$ min (= 9 min de cuisson), ce sont les sondes 3C et 5C qui révèlent une différence de température de 5°C.

Par conséquent, aucune des sondes n'évolue de façon similaire.

Il n'y a donc pas pour le poisson de généralisation possible.

Les répercussions sur les valeurs pasteurisatrices sont consignées sur les courbes figurant sur le diagramme 3.2. (p. 18).

* Il est à noter, pour les sondes à coeur, de très grosses différences de valeurs pasteurisatrices (VP) finales (au bout d'un temps de 29 min 34 ; 29 min 43 et 29 min 67). Ces différences résultent du cumul des différences constatées sur les valeurs pasteurisatrices partielles.

Exemple : pour la sonde 3C :

à $t = 21$ min. : $T = 80,6^{\circ}\text{C}$ ($T_{\text{moy}} = 80^{\circ}\text{C}$) ; $VP_{\text{part}} = 9,97$; $VP_{\text{cum}} = 27,52$

à $t = 22$ min. : $T = 80,7^{\circ}\text{C}$ ($T_{\text{moy}} = 80,65^{\circ}\text{C}$) ; $VP_{\text{part}} = 11,58$; $VP_{\text{cum}} = 39,10$

(N.B. : VP_{part} signifie Valeur Pasteurisatrice partielle, et VP_{cum} , Valeur Pasteurisatrice cumulée).

Ce phénomène permet de mettre l'accent sur l'importance de la prise de température. Un très petit écart relevé au niveau de la sonde entraîne un écart considérable de la valeur pasteurisatrice.

* Pour la sonde de surface, on observe une chute de température beaucoup plus rapide lors du refroidissement, ce phénomène entraîne rapidement des VP partielles faibles. Par exemple, à $t = 24$ min., $VP_{\text{part}} = 1,9$, alors que pour les autres sondes, elles varient de 3,2 à 7,7.

Ceci explique donc la faible Valeur Pasteurisatrice atteinte à la fin du traitement pour le point de mesure. On peut retenir que, du fait de la résistance thermique du produit, c'est l'extérieur qui a la valeur pasteurisatrice la plus faible.

3.2.3) CONCLUSION

On observe une telle hétérogénéité dans les résultats que l'on peut considérer qu'il n'y a aucune généralisation possible en ce qui concerne le comportement du poisson lors de la cuisson.

Par ailleurs, il est à noter que les sacs qui ont été employés pour la cuisson sont parfaitement inutilisables par la suite pour d'autres essais.

Il s'avérerait donc indispensable d'orienter nos recherches vers un succédané de poisson qui ne poserait aucune difficulté de manipulation.

En outre, l'hétérogénéité constatée donne une idée de l'hétérogénéité de la cuisson d'un produit vrai dans des conditions de chauffage très homogènes.

3.3) RECHERCHE D'UN SUCCEDANE

3.3.1) CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU SUCCEDANE

* Ce produit de remplacement doit posséder la même chaleur massique que le poisson, et son utilisation doit être compatible avec des traitements thermiques (cuisson, refroidissement) successifs.

* Il doit donc être thermoréversible et stable d'un point de vue microbiologique aussi bien que d'un point de vue biochimique.

* Par ailleurs, il devra être facile à réaliser, étant donné la grande quantité à produire, et avoir une consistance relativement épaisse afin de limiter les effets de convection qui n'existent pas dans le poisson.

3.3.2) QUEL SUCCEDANE EMPLOYER?

La chaleur massique du poisson est d'environ $3,55 \text{ kJ/kg.K}$.

Comme nous recherchons un produit de chaleur massique similaire, nous avons choisi de réaliser une saumure, dont on peut connaître facilement la chaleur massique en fonction de la concentration en sel.

Diagramme 3.1

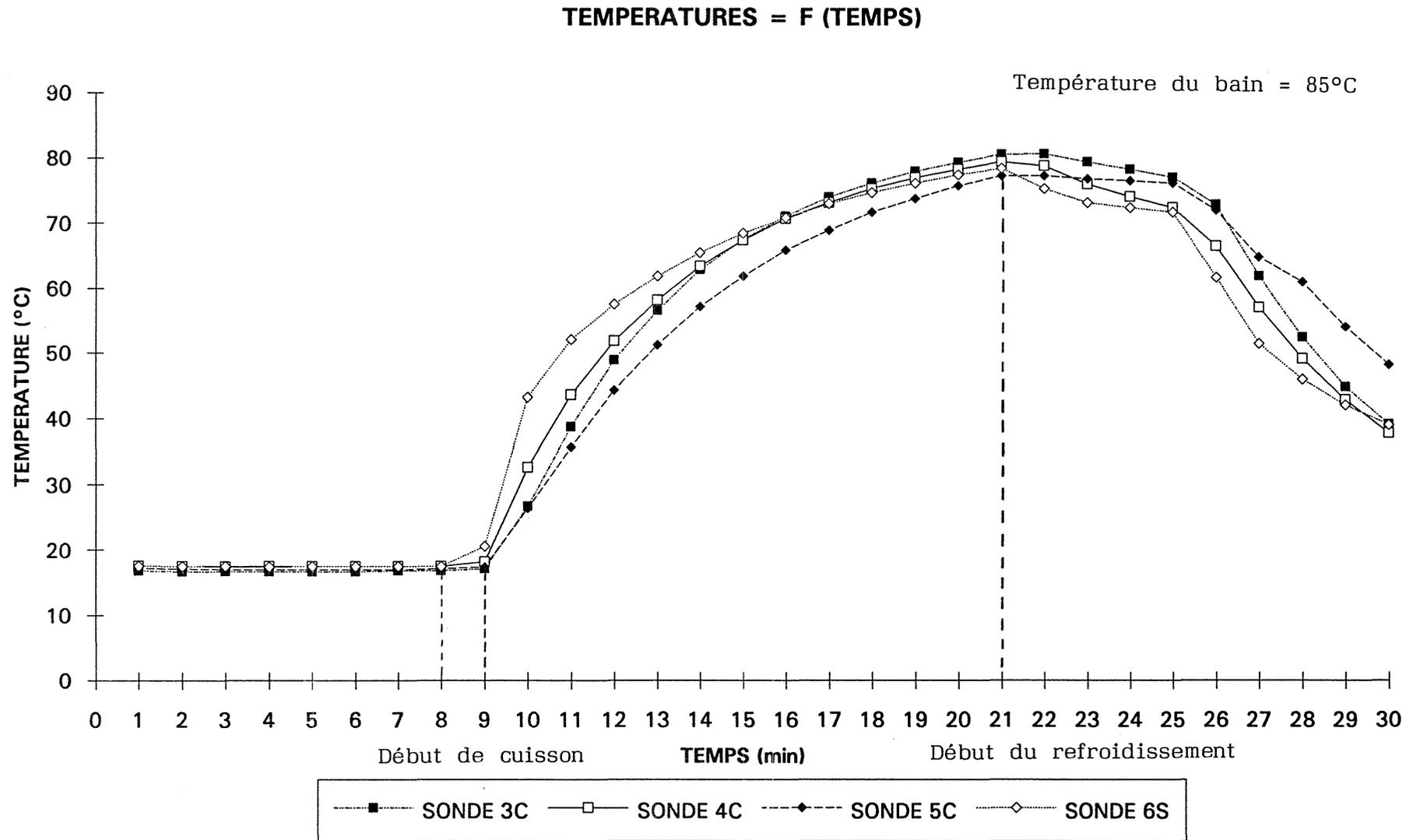
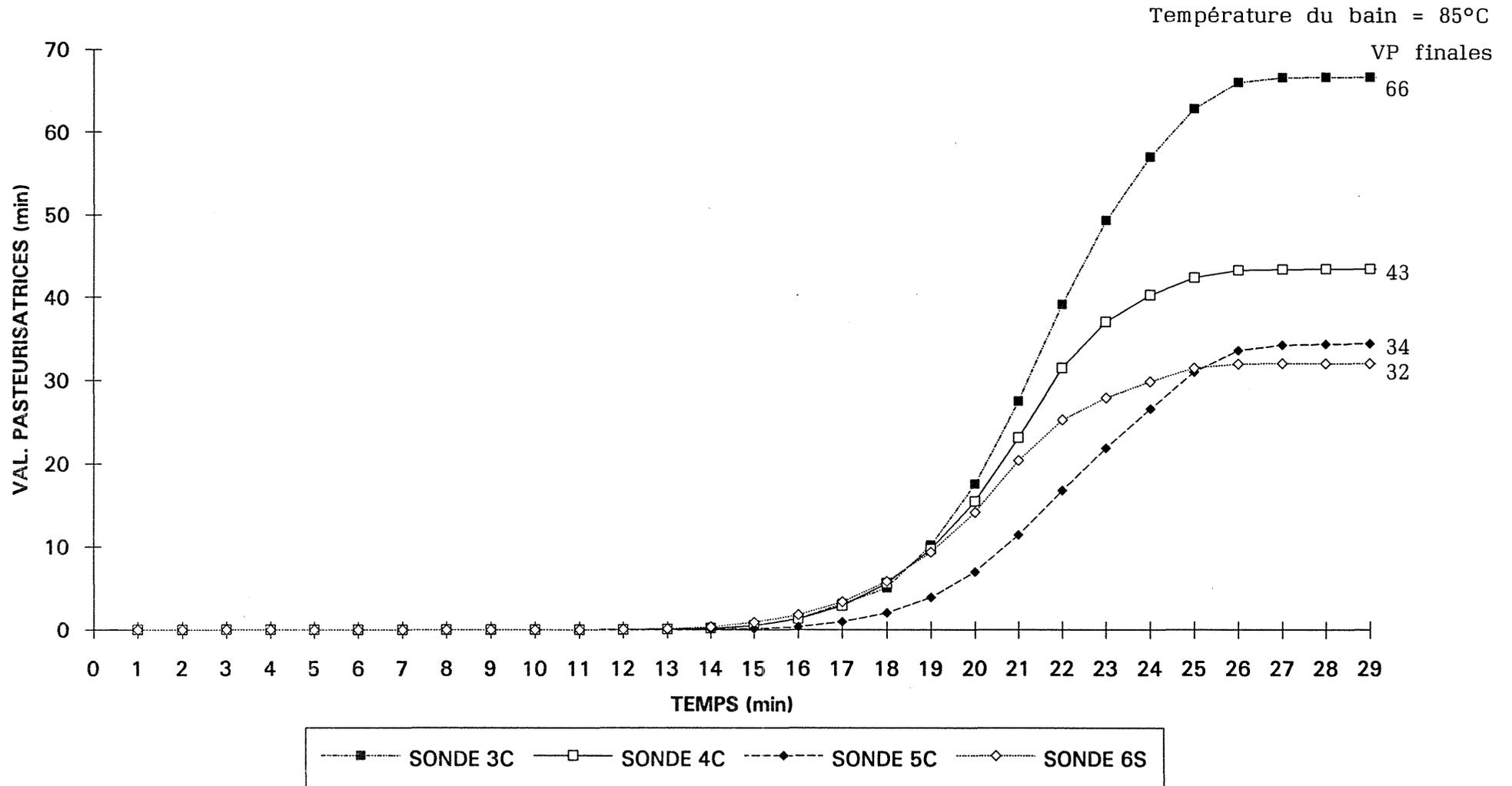


Diagramme 3.2

VALEURS PASTEURISATRICES = F (TEMPS)



Or une saumure à 16,2% de la masse de la solution (soit 19,3 kg de NaCl pour 100 kg d'eau) a une chaleur massique de:

3,507 kJ/kg.K à 0°C

3,56 kJ/kg.K à 50°C.

C'est la concentration retenue. Ceci correspond à une masse volumique de 1,12 kg/l.

Pour augmenter la consistance, on ajoutera 2% de Flanogen 523, qui est un mélange de carraghénane (extraits d'algues rouges) et de farine de graines de caroube. Ceci n'aura que très peu d'influence sur la chaleur massique.

La composition du succédané sera donc la suivante:

- 19,3% de sel;

- 2% de Flanogen.

Il faut cependant remarquer qu'il sera impossible de suivre l'évolution de la température avec ce type de mélange qui est relativement liquide ; la question est donc posée de la modélisation d'échantillons d'expérience stables permettant des expérimentations répétables. Nous avons en conséquence adopté comme éléments d'expérience des pains de tylose (méthylcellulose moulée dont les propriétés thermiques sont très voisines de celles de la viande).

3.4) ETUDE DE L'EVOLUTION DE LA TEMPERATURE SUR DE LA TYLOSE

Deux séries d'essais ont été réalisées, avec à chaque fois 3 sondes à coeur et 1 sonde de surface.

L'évolution de la température à l'intérieur des pains de tylose est semblable pour les deux séries d'essais réalisées.

Les courbes obtenues sont consignées sur le diagramme 3.3. (p. 20).

On obtient un faisceau de courbes correspondant aux sondes placées à coeur.

Il peut y avoir parfois un léger décalage par le fait qu'il est possible que toutes les sondes n'aient pas été placées réellement au même endroit dans le produit. Mais ce phénomène n'entraîne pas de différence significative dans les résultats.

Par conséquent, on peut considérer que les sachets de tylose sous vide sont un bon support pour suivre l'évolution de la température à coeur d'un produit, et l'évolution des valeurs pasteurisatrices d'échantillons d'essai.

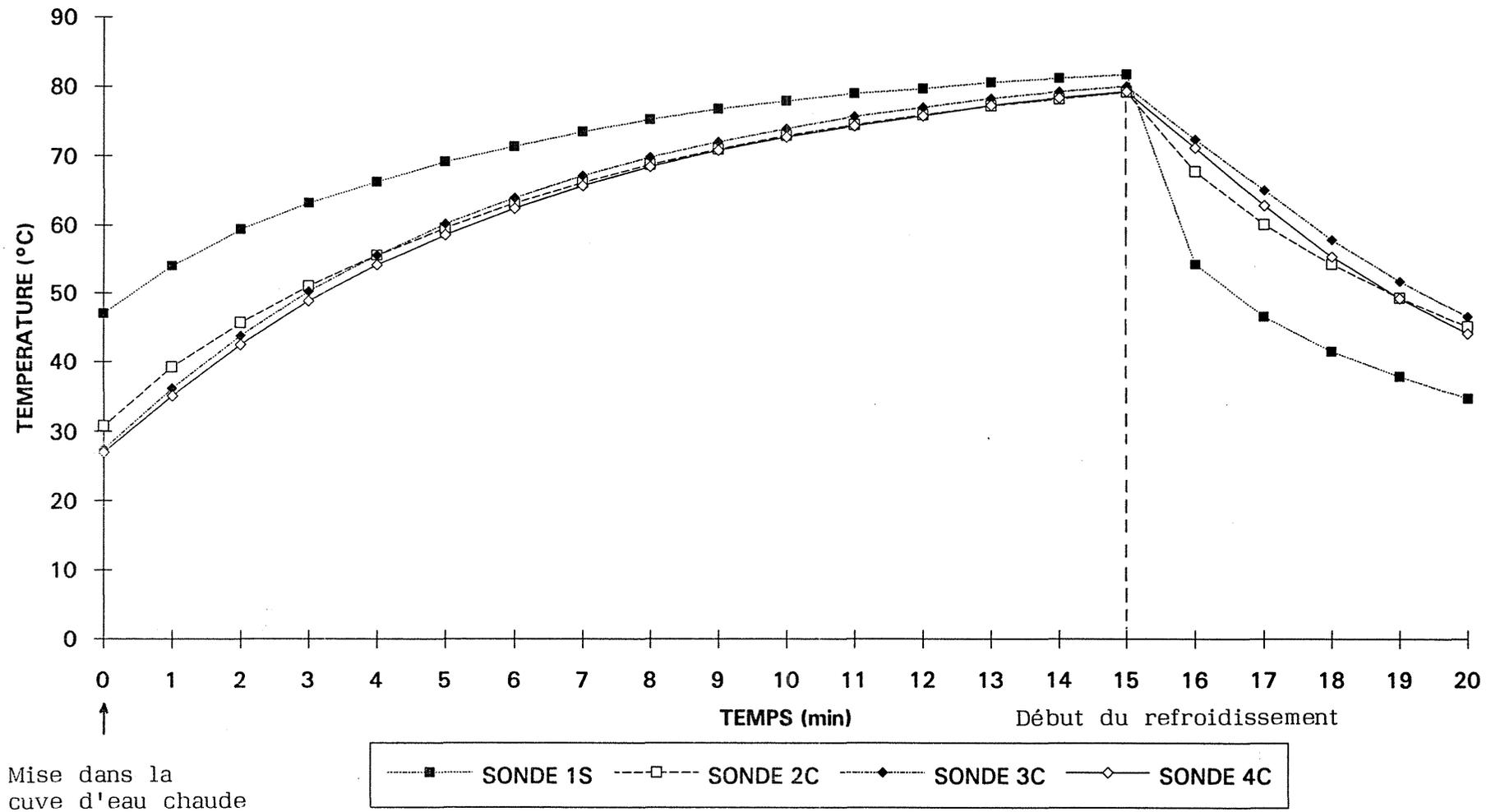
3.5) CONCLUSION

Afin de tester les capacités de la machine AFREM, il est indispensable, d'une part, d'avoir une charge, et d'autre part, de posséder un bon support de relevés de température.

La charge sera donc constituée par le mélange saumure + Flanogen, alors que les pains de tylose seront les éléments d'expérience à l'intérieur desquels seront placées les sondes de mesure.

Diagramme 3.3

TEMPERATURES = F (TEMPS)



CHAPITRE 4

DETERMINATION DES PARAMETRES DE REGULATION DE LA MACHINE AVEC CHAUFFAGE ELECTRIQUE

4.1) INTRODUCTION

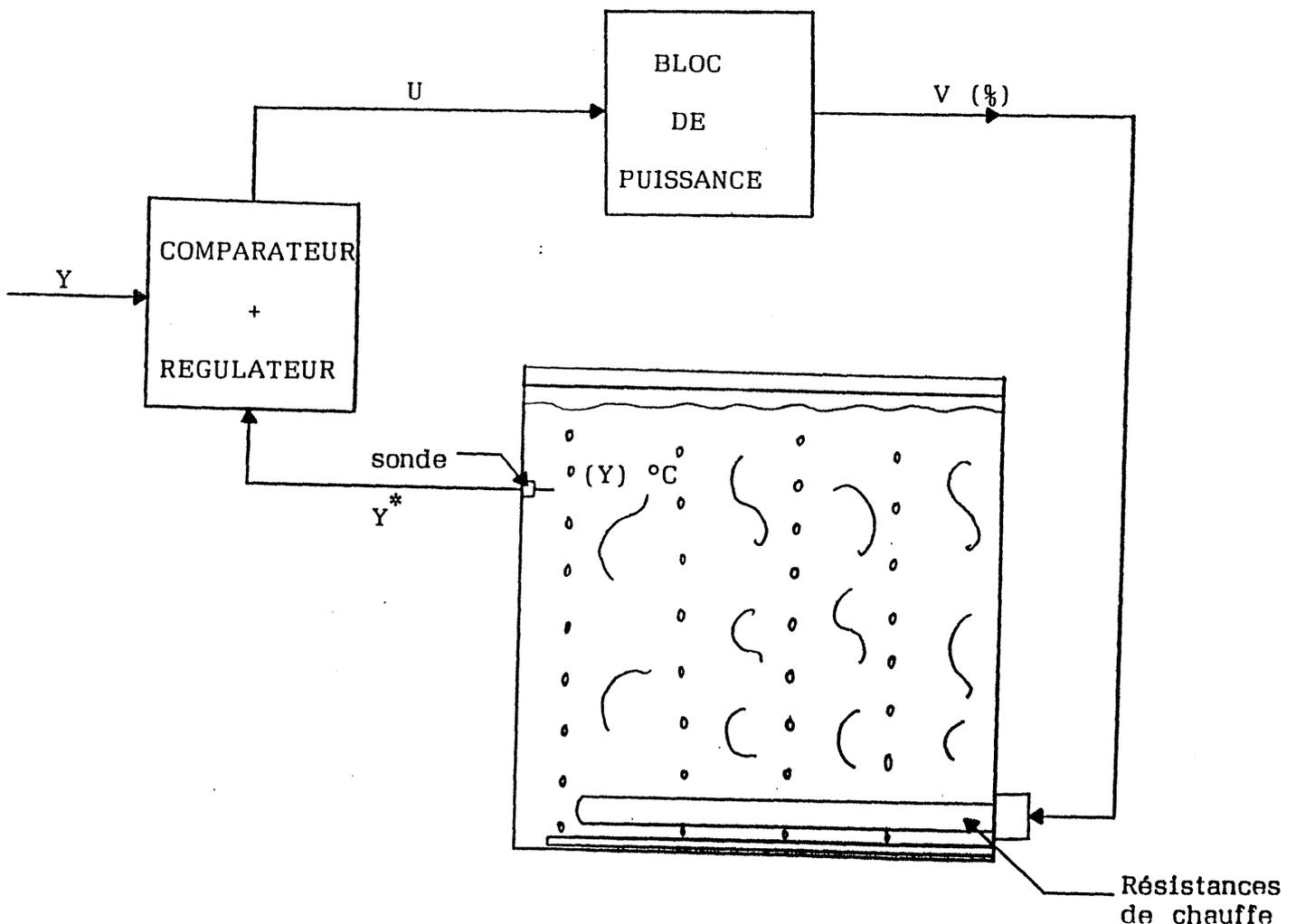
La maîtrise de toute cuisson passe par la maîtrise aussi précise que possible de la température de la cuve chaude, d'où la nécessité de déterminer les paramètres de fonctionnement du régulateur dans nos conditions particulières de travail.

La régulation a pour but de faire suivre à la grandeur contrôlée la valeur de consigne, quelles que soient les perturbations susceptibles de la faire varier.

Il s'agit de déterminer les paramètres à entrer dans le régulateur afin que celui-ci contrôle de façon satisfaisante la température de cuisson de produits sous vide, et plus particulièrement des cuissons de courtes durées.

4.2) LA REGULATION DE LA TEMPERATURE DE LA CUVE DE CUISSON

4.2.1) SCHEMA FONCTIONNEL DE L'ENSEMBLE BOUCLE



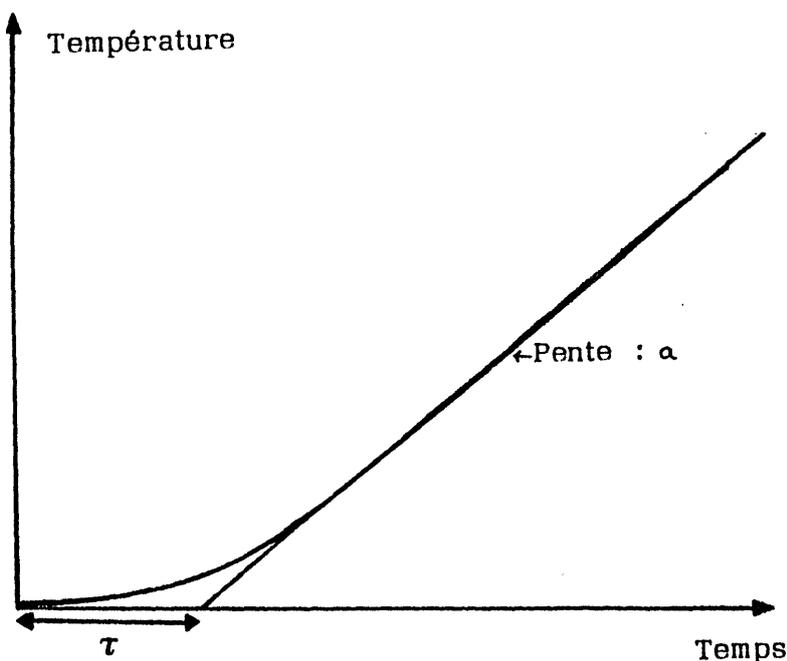
4.2.2) IDENTIFICATION DES ELEMENTS ET FONCTIONNEMENT

Grandeur réglée Y	: Température du bain
Capteur transducteur	: Sonde de platine
Grandeur de sortie Y* analogique	: Tension (mV)
Comparateur - régulateur	: Compare deux tensions, régulateur numérique P.I.D.
Signal de sortie U du régulateur	: Tension (0 à 20 mA)
Organe de réglage de la valeur contrôlée	: Bloc de puissance à thyristors
Grandeur réglante V	: % de puissance

Lorsqu'on plonge les produits froids dans le bain chaud, la température du bain diminue (Y). Il apparaît donc un écart e (consigne-mesure) qui est enregistré par le comparateur et qui entraîne une variation de la puissance de chauffe fournie (V) par l'intermédiaire du régulateur et de l'organe de réglage. Cette variation de puissance tend par sa valeur et par son sens à ramener Y à la valeur de consigne.

4.2.3) METHODES DE REGLAGE DU REGULATEUR

En mode P.I.D. manuel, l'utilisateur entre ses propres paramètres. La méthode de détermination des paramètres constitue donc une étude préalable. Nous avons utilisé la méthode de Ziegler et Nichols qui donne les valeurs de réglage du régulateur G, T_i , T_d .



Nous avons réalisé deux identifications pour les deux puissances totales disponibles que nous avons utilisées.

PUISSANCE totale en kW	G	Ti s.	Td s.
127	59	74	18,5
72,5	24	31,8	7,95

N.B. : l'étude avec 72,5 kW correspond à l'utilisation de 4 résistances sur 7.

Compte-tenu du format des grandeurs acceptées par le régulateur, les paramètres de réglages exacts sont les suivants avec $Bp(\%) = \frac{100}{G}$.

1) P = 127 kW

$Bp = 2\%$
 $Ti = 1 \text{ min}, 14 \text{ s.}$
 $Td = 19 \text{ s.}$

2) P = 72,5 kW

$Bp = 2\%$
 $Ti = 32 \text{ s.}$
 $Td = 8 \text{ s.}$

4.3) ETUDE EXPERIMENTALE DU FONCTIONNEMENT

A partir des paramètres définis précédemment, on se propose d'observer l'évolution de la réponse Y^* en fonction du temps, en réponse à la perturbation principale : le plongement des produits. Ceci correspond à des conditions d'utilisation industrielles et permettra de lever les doutes qu'on peut avoir quant à la précision de la méthode utilisée.

Dans un premier temps, nous déterminerons les caractéristiques de mise en fonctionnement de la machine ; puis, nous observerons les réponses à des perturbations différentes.

Etant donné le problème de consommation énergétique de l'installation, nous mettrons l'accent sur l'étude à 72,5 kW pour les études comparatives.

4.3.1) MONTEE EN TEMPERATURE ET STABILISATION : REPONSE EN POURSUITE A UN ECHELON DE CONSIGNE

Il s'agit essentiellement de déterminer le temps de mise en régime de l'installation pour les deux puissances disponibles (127 et 72,5 kW).

1^{ER} CAS : 127 kW

La montée en température dure environ 21 minutes au rythme de $2,5^\circ\text{C}/\text{min}$. Cependant, pour atteindre exactement la valeur de consigne, il faut attendre environ 45 minutes supplémentaires. Donc, le délai exact de mise en régime atteint en tout 66 minutes.

2^{EME} CAS : 72,5 kW

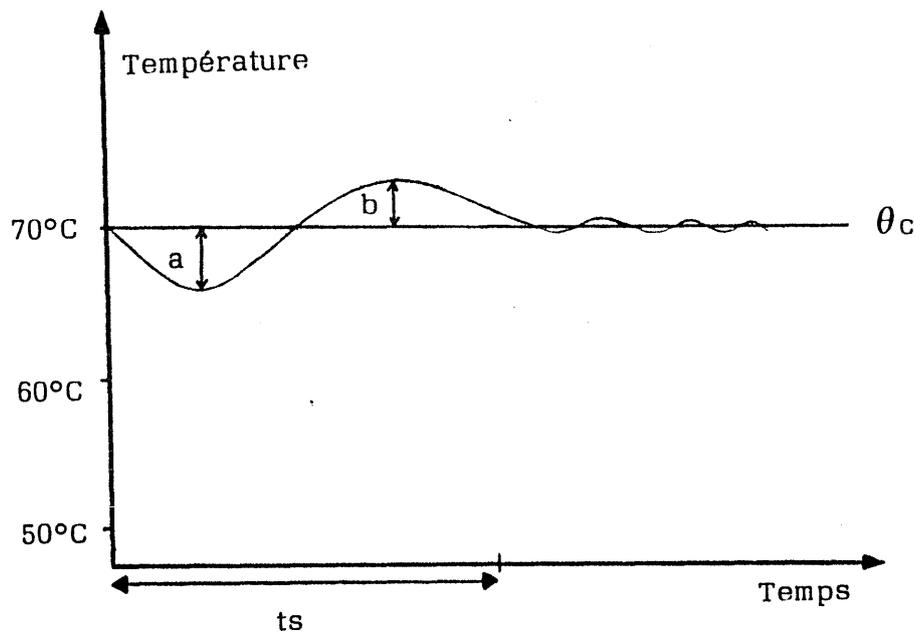
La montée en température dure ici environ 36 minutes à un rythme de $1,5^\circ\text{C}/\text{min}$. La valeur exacte de consigne est atteinte au bout de 72 minutes après le début de mise en chauffe.

Cependant, on note que la température atteint 99% de sa valeur assez rapidement: 30 minutes pour 127 kW et 40 minutes pour 72,5 kW. Ce qui est acceptable pour commencer les cuissons.

4.3.2) LE PLONGEMENT DES PRODUITS : REPONSE A UNE PERTURBATION

Il s'agit d'observer l'évolution de la température (Y) en fonction du temps pour des conditions d'utilisation différentes : la charge, la température initiale du produit et la puissance totale disponible.

Dans le cas général de la réponse à une perturbation, la température du bain évolue en réponse à une perturbation de la façon représentée dans le schéma ci-dessous :



4.3.2.1) INFLUENCE DE LA CHARGE

Nous examinerons les deux cas de puissance car ils correspondent à des paramètres de réglage du régulateur différents.

Deux séries d'essais de charge ont été réalisées : 176 kg et 104 kg.

On note les résultats suivants:

* 1^{er} cas : $P = 127 \text{ kW}$

charge (kg)	a (°C)	b (°C)	ts (min)
176	4	3	27
104	3,2	2	19

La baisse de 40% de la charge engendre une réduction de la baisse de température de 20 % et le dépassement de la valeur de consigne est diminué de 33 %.

Le plus petit dépassement de la valeur de consigne se traduit par un retour à la stabilité plus rapide. En effet, on retrouve plus tôt la valeur de consigne, environ 8 minutes avant.

La pente de la remontée en température est plus faible à 104 kg qu'à 176 kg (1,6°C au lieu de 2°C) ; ce qui peut avoir une certaine influence sur la cuisson en surface du produit.

Si on examine l'évolution des puissances, il est net que pour un chargement de 176 kg la réponse obtenue est optimale. En effet, on utilise 100% de puissance pour répondre à la baisse de température.

Par contre, pour 104 kg, une puissance disponible aussi élevée n'est pas utile puisque la puissance maximum demandée n'est que de 85 % de 126 kW.

* 2ème cas : $P = 72,5 \text{ kW}$

charge (kg)	a (°C)	b (°C)	ts (min)
176	5,1	2,8	21
104	3	2	19,5

Dans ce cas, on note que la chute de la température dans la première partie de la courbe est importante avec 176 kg. Par contre, la charge ne semble avoir aucune influence sur le dépassement de la valeur de consigne et le temps nécessaire à la stabilisation.

La pente de la remontée en température est un peu plus faible pour 176 kg (1°C/min), que pour 104 kg (1,2°C/min).

Si on examine les puissances, on note que pour les deux charges la puissance maximale engagée est de 100%. Donc, on ne peut améliorer la rapidité de la réponse et la remontée de température avec cette puissance.

4.3.2.2) INFLUENCE DE LA TEMPERATURE INITIALE DU PRODUIT

Après avoir réfrigéré 104 kg de produits à 2,3°C, nous avons effectué un plongement de ces produits dans la cuve d'eau chaude (avec $P = 72,5 \text{ kW}$).

On obtient les résultats suivants :

température (°C)	a (°C)	b (°C)	ts (min)
2,3	3,4	2,5	24
12	3	2,8	21

Si on compare avec le cas de 104 kg de produits à température ambiante (10 à 12°C), on note une baisse un peu plus importante de la température (-11,3%) et un dépassement de la valeur de consigne un peu inférieur (-11%).

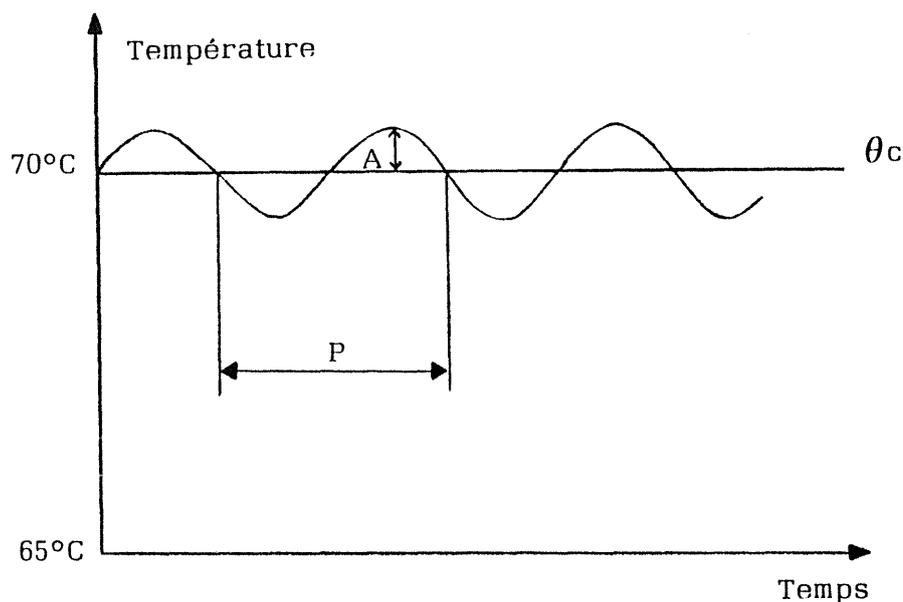
Donc, l'utilisation de produits froids n'apporte pas de modifications fondamentales aux résultats antérieurs.

4.3.2.3) INFLUENCE DE LA PUISSANCE DISPONIBLE

Si on compare les deux séries de résultats antérieurs pour les 2 charges 104 et 176 kg, on observe que les deux réglages donnent des résultats assez semblables à $0,3^{\circ}\text{C}$ près ; ce qui tend à prouver que l'on peut réduire la puissance disponible à 72,5 kW.

4.3.3) LA STABILITE DE LA REPONSE EN REGIME PERMANENT

Pour les essais à 72,5 kW, on a observé à partir de la 30^{ème} minute une instabilité de réponse matérialisée par des oscillations dont l'allure générale est:



Ces oscillations ont une amplitude (A) de $0,3^{\circ}\text{C}$ pour 104 kg, et de $0,2^{\circ}\text{C}$ pour 176 kg. La période (P) est sensiblement équivalente pour les 2 charges : $P = 10$ minutes.

Ce phénomène n'est pas très important pour des cuissons courtes (durée inférieure à 30 minutes), mais par contre, pour des cuissons longues, il doit être considéré pour l'établissement des barèmes.

4.4) CONCLUSION

Une puissance de 72,5 kW s'annonce donc comme étant suffisante pour la cuisson de charges de 104 à 176 kg, puisqu'elle n'engendre pas de grandes modifications de la réponse, du moins dans les 30 premières minutes.

Les valeurs de réglage $B_p = 2\%$, $T_i = 32$ s, $T_d = 8$ s donnent un fonctionnement optimal pour une charge dont la masse est située entre 100 et 176 kg. Pour cette même puissance, l'emploi de produits froids (2°C environ) modifie peu la réponse.

CHAPITRE 5

TESTS DE LA MACHINE AFREM AVEC CHAUFFAGE ELECTRIQUE

5.1) INTRODUCTION

Nous avons vu (paragraphe 3.2.3) que pour tester les performances de fonctionnement de la machine AFREM, il était préférable dans un premier temps d'opérer avec un produit homogène, dont le comportement à la chaleur était une donnée stable. La charge a donc été constituée pour nos essais, de pain de tylose dont les dimensions sont, sauf mention contraire, 10 cm x 10 cm x 2,5 cm et de sacs de succédané, l'ensemble constituant la charge mise en cuisson.

5.2) CONDITIONS EXPERIMENTALES

Nous avons pratiqué plusieurs séries de mesures en maintenant constante la température de consigne $T_c = 70^\circ\text{C}$, et en faisant varier d'autres paramètres :

- la puissance de chauffe : 126 et 72 kW,
- la charge en produit : 104 kg, 90 kg, 56 kg,
- la température initiale du produit: $12-15^\circ\text{C}$ et $2-3^\circ\text{C}$.

Les sondes de mesure (thermocouples) sont soit situées judicieusement en divers points de la charge, soit à coeur de pains de tylose conditionnés sous vide.

5.3) ETUDE DE L'HOMOGENEITE DU BAIN CHAUD

L'homogénéité de température du bain est une nécessité. En effet, l'obtention d'un lot homogène de produits, après traitement, n'est effective que dans la mesure où tout le lot de produits est traité dans les mêmes conditions. La température est un facteur déterminant dans l'application d'un barème de cuisson.

L'homogénéisation de la température du bain est assurée par une circulation de bulles d'air, de bas en haut dans la masse du fluide chauffant. L'efficacité du système dépend en grande partie de la répartition et du débit des bulles d'air créant des turbulences dans le fluide (voir paragraphe 2.2.2).

5.3.1) DETERMINATION DE L'HOMOGENEITE, MODE OPERATOIRE

L'homogénéité de température dans le bain est testée en mesurant la température en différents points du bain, au moyen de thermocouples placés sur les grilles.

Elle est vérifiée pour différentes conditions, à savoir:

- à vide: pour vérifier l'efficacité du système sur une masse importante d'eau.
- avec le produit: les produits, maintenus à la verticale dans les grilles, sont susceptibles de créer des zones préférentielles de circulation des bulles d'air, à l'origine de points froids.
- avec 3 résistances shuntées: pour contrôler que le shunt de ces résistances ne modifie pas la circulation de la chaleur. La puissance de chauffe est alors seulement de 72 kW.

Différents dispositifs de prise de température ont été utilisés en fonction de la progression de nos investigations :

- 1^{er} dispositif avec 27 sondes placées sur des grilles en périphérie des paniers (voir p.29),
- 2^{ème} dispositif avec 18 sondes placées au milieu des grilles chargées de succédané (voir p. 31),
- 3^{ème} dispositif avec 7 sondes placées de façon à mettre en évidence une éventuelle hétérogénéité provoquée par le shunt de 3 résistances (voir p. 30).

5.3.2) RESULTATS EXPERIMENTAUX :

Homogénéité de température avec une puissance de chauffage de 126 kW (7 résistances).

- dans le bain vide de produit :

La température est homogène à 0,1°C près dans l'ensemble du bain. Les différences observées sont dans la limite de précision de la chaîne de mesure. Le système de bullage est efficace à vide. Dans le cas contraire, il aurait fallu le modifier avant d'aller plus loin.

- dans le bain chargé de produit :

L'écart entre les grilles se réduisant lorsque la charge totale de produits augmente, nous sommes intéressés à l'effet de la charge sur l'homogénéité du bain, ceci afin de détecter d'éventuelles zones de circulation privilégiées des bulles d'air.

- avec 176 kg de produits :

L'essai réalisé suivant le premier dispositif a montré que la température était homogène à 0,1°C près à la périphérie du panier.

Par contre, d'autres essais réalisés avec le 2^{ème} dispositif ont montré que la température n'était homogène qu'au bout de 7 minutes. Le délai de mise en homogénéité correspond en fait au temps nécessaire pour que les produits passent de 12° à 50°C à coeur ; 50°C est le seuil à partir duquel commence le calcul des valeurs cuisatrice et pasteurisatrice; entre 50° et 60°C, ces valeurs sont relativement faibles, ce qui ne confère que peu d'importance aux écarts de température enregistrés, qui vont jusqu'à 3°C (voir diagramme 5.1 - p. 32).

- avec 104 kg de produit :

La température du bain est homogène à 0,5°C près, dans l'ensemble du bain, et ceci au bout de 4 minutes, ce qui est satisfaisant pour l'application d'un traitement thermique.

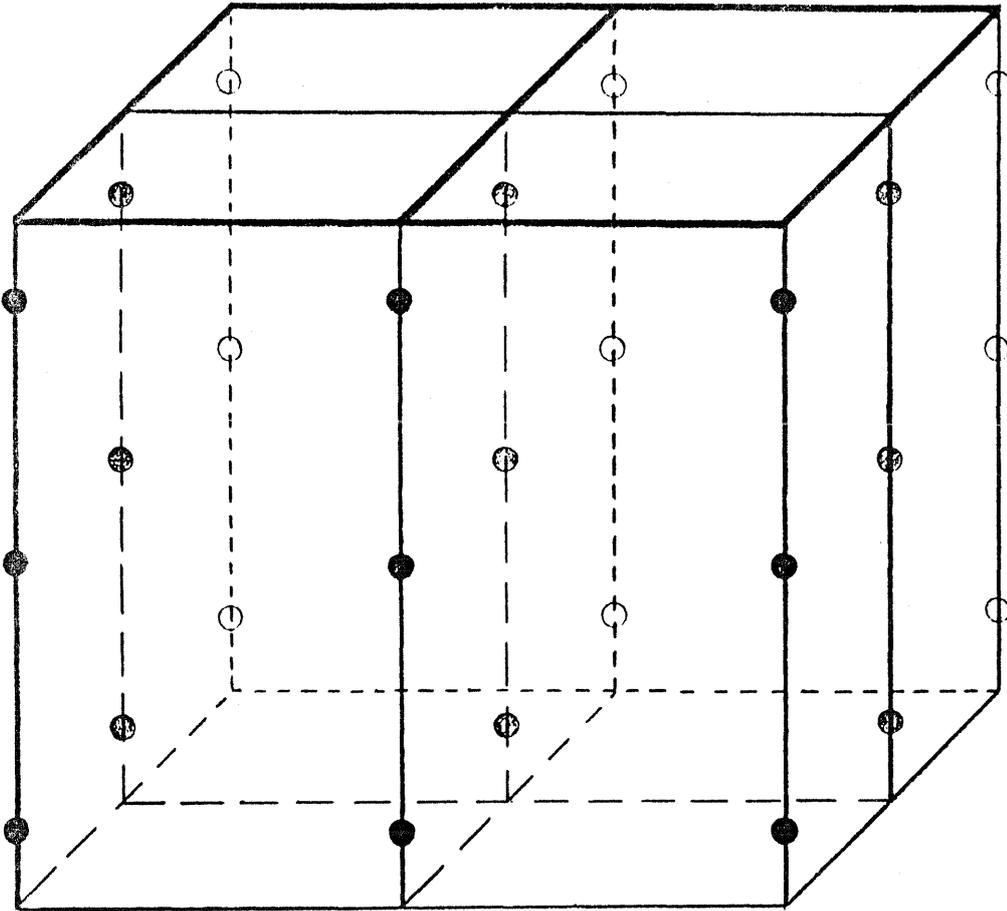
- avec 56 kg de produit :

L'ensemble du bain est homogène à 0,2°C près.

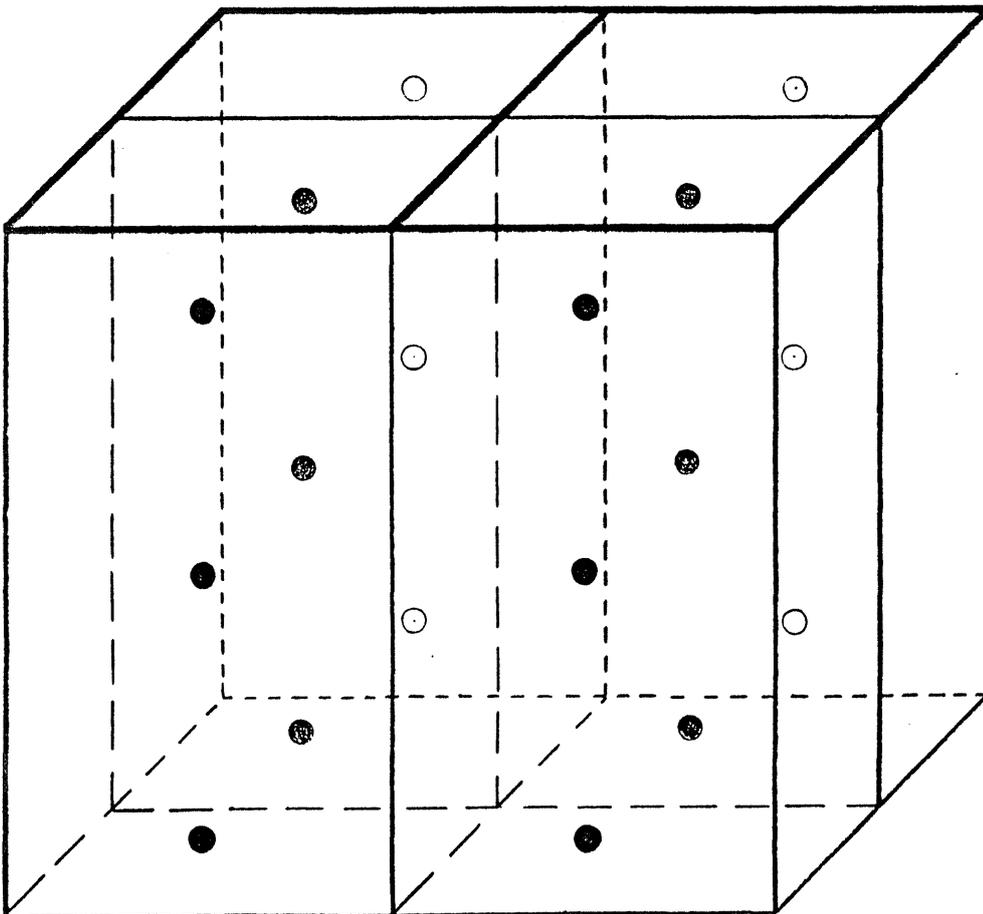
- homogénéité de température avec le shunt de 3 résistances :

Trois résistances sur sept ont été débranchées pour la réalisation d'essais à plus faible puissance de chauffage.

A priori, nous pouvions suspecter une hétérogénéité entre, d'une part, les plans situés à la verticale des résistances chauffantes et, d'autre part, ceux situés au dessus des résistances shuntées. Or, les essais menés avec le 3^{ème} dispositif ont montré que l'homogénéité de température, 2 minutes après l'immersion de 90 kg de produit, était obtenue à 0,5°C près.

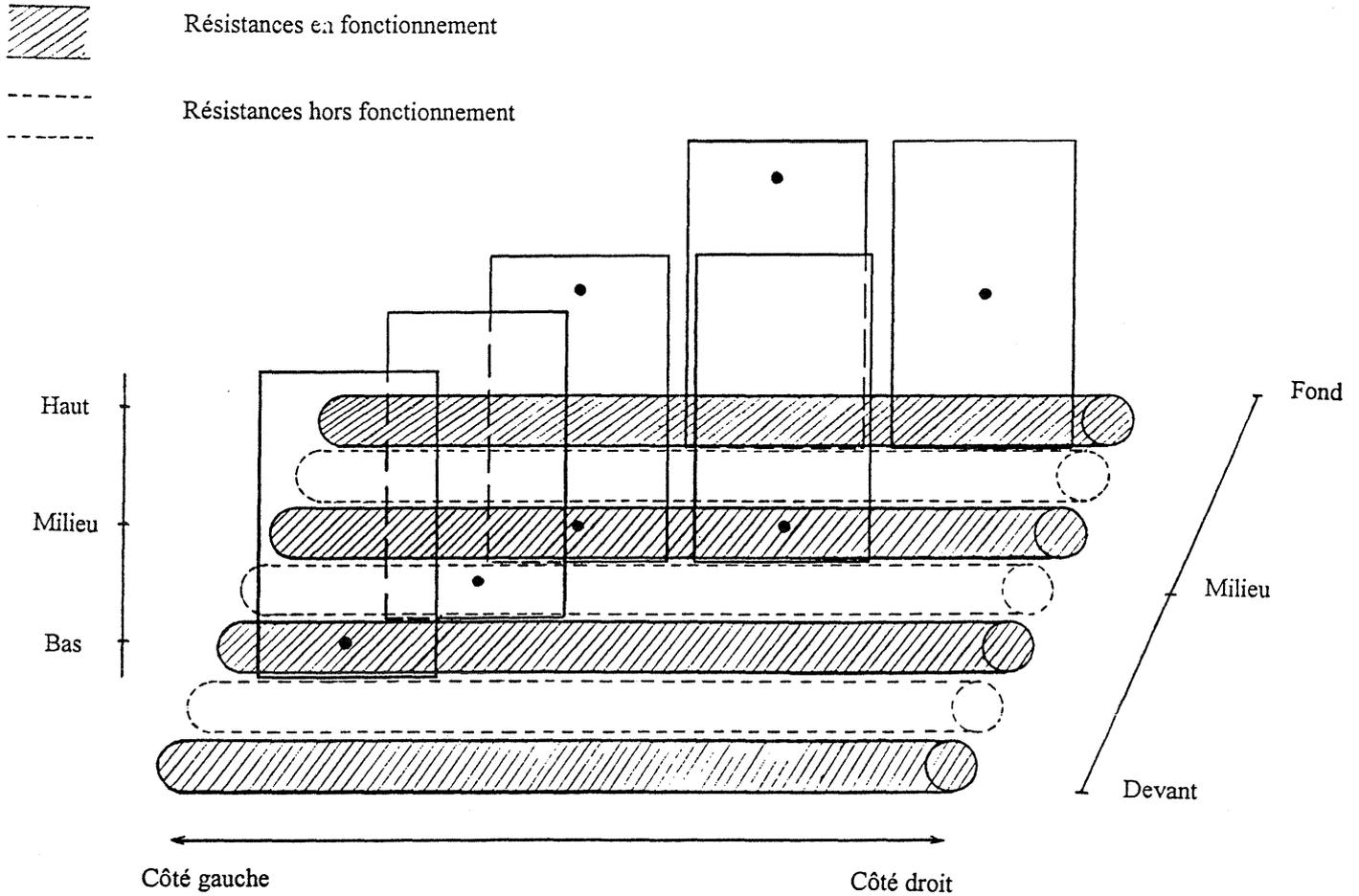


1^{er} dispositif
(27 sondes)



2^{ème} dispositif
(18 sondes)

3^{ème} dispositif
 (Homogénéité du bain avec le shunt de trois résistances sur sept)



- 11	(C6)	bas	devant gauche	R2
- 12	(C1)	bas	devant gauche	R3
- 13	(E3)	bas	milieu droit	R4
- 14	(B6)	bas	milieu gauche	R4
- 15	(B3)	haut	milieu gauche	R4
- 16	(F1)	haut	fond gauche	R7 - 6
- 17	(D2)	milieu	fond droit	R7 - 6

5.3.3) CONCLUSION

L'homogénéité de température du bain est obtenue de façon satisfaisante, même dans des conditions a priori défavorables, comme, par exemple, la charge maximale de produit ou le shunt de certaines résistances (avec une charge de 104 kg, les écarts sont inférieurs à 0,5°C). En tout état de cause, le temps de mise en homogénéité de température est au plus égal au temps nécessaire pour que les produits atteignent à coeur le seuil thermique de 50-60°C, à partir duquel apparaissent les premiers effets de la cuisson.

Le système de bullage, actuellement en place, se révèle donc efficace.

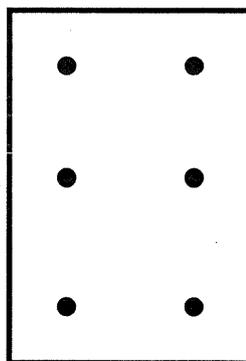
5.4) ETUDE DE L'ELEVATION DE TEMPERATURE AU CENTRE THERMIQUE DES PAINS DE TYLOSE

Dans l'industrie, une machine est jugée sur sa fiabilité mais aussi sur ses performances de productivité. C'est pourquoi, nous avons étudié les vitesses de montée en température des produits.

Voyons maintenant ce qui se passe quand on plonge des produits dans le bain dont la température de consigne est atteinte.

La charge introduite dans la cuve est constituée par des grilles chargées de succédané et des grilles chargées de pains de tylose ; c'est dans ces dernières que sont effectuées les mesures de température.

La disposition des thermocouples dans la cuve, représentée dans le schéma ci-dessous, montre leur projection sur un plan vertical, le repérage spatial est fait par les indications gauche-droite qui correspondent aux grilles situées de part et d'autre de la charge.



Tous les essais sont faits avec une température de consigne du bain à 70°C.

On a utilisé des échantillons de tylose de deux épaisseurs, 2,5 et 5 cm, les autres dimensions étant par ailleurs identiques (20 cm x 10 cm).

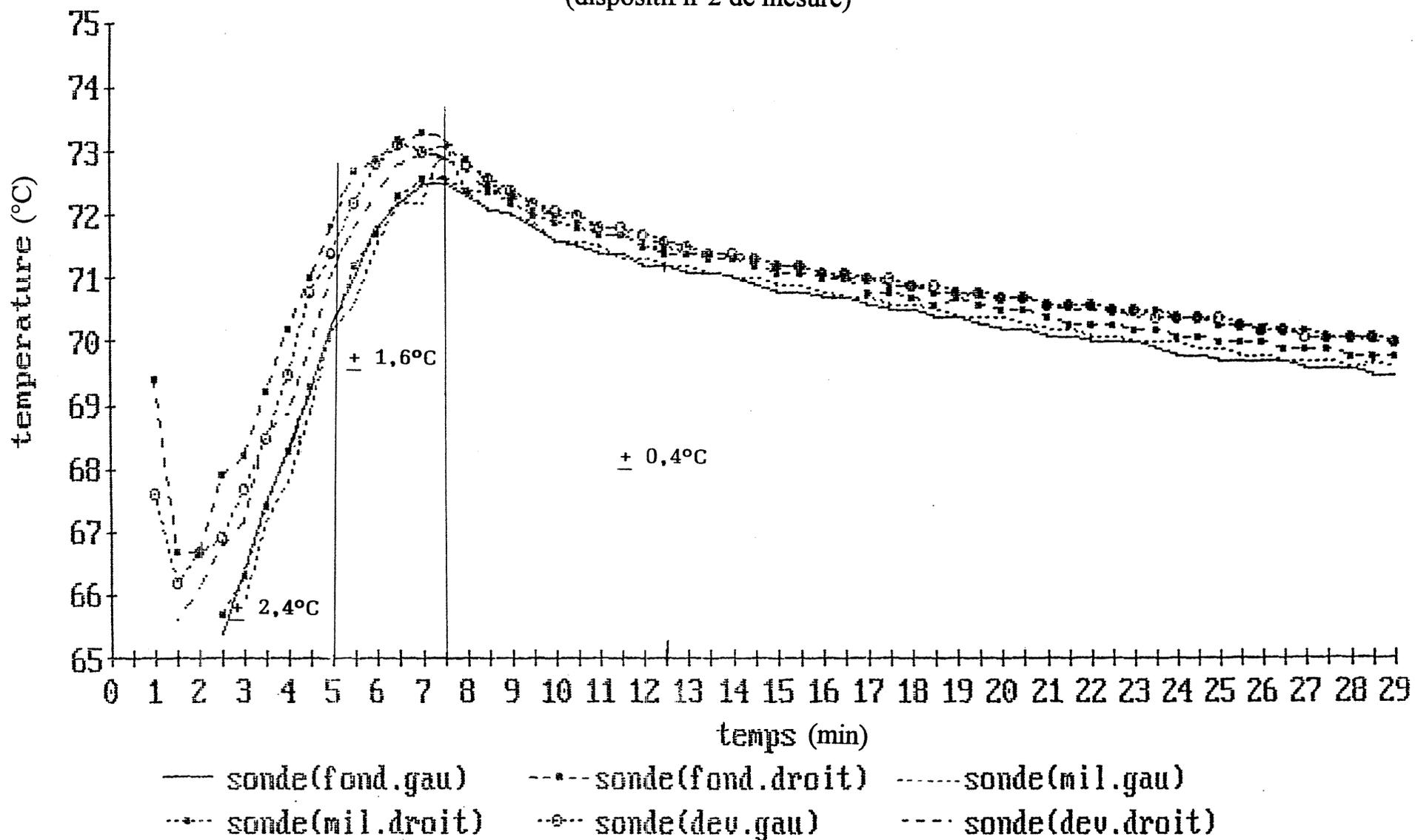
5.4.1) RESULTATS EXPERIMENTAUX

Afin de rendre les résultats plus aisément comparables, on a utilisé les températures normalisées (pourcentage d'écart de température = $\frac{T_{\text{instantanée}} - T_{\text{initiale}}}{T_{\text{finale}} - T_{\text{initiale}}}$).

On a tout d'abord étudié l'effet d'une diminution de la puissance de chauffe : passage de l'utilisation de 7 résistances (P = 126 kW) à 4 résistances (P = 72 kW).

Les résultats figurent sur les diagrammes 5.2 et 5.3 (pages 34, 35) et montrent des évolutions des moyennes de température très proches ; ce qui permet de dire qu'on peut diminuer la puissance installée sans modifier de façon importante l'efficacité de la machine.

Diagramme 5.1
 homogéneite 176 kg
 plan horizontal milieu
 (dispositif n°2 de mesure)



On a porté sur le diagramme 5.4 p. 36 :

- pour 1 charge de 104 kg : l'écart de température obtenu avec les 2 puissances de chauffe (celui-ci semble maximum au bout d'une minute) est inférieur à 1°C au bout de 7 minutes alors que la température du produit est de 55°C, et est nul à 12 minutes alors que la température du produit est de 70°C.

- pour 1 charge de 176 kg : les résultats sont similaires à ceux obtenus précédemment, écarts inférieurs à 1°C à 10 minutes alors que la température est de 60°C, et écarts nuls au bout de 13 minutes alors que la température est de 65°C.

On a porté sur le diagramme 5.5 p. 37 :

- pour 1 charge de 90 kg : les relevés de température à coeur dans les pains de tylose d'épaisseur 2,5 cm, le chauffage étant de 72 kW. On peut en retenir que, malgré toutes les précautions prises, on obtient une dispersion des résultats importante dans les premières minutes (voir moyenne et écart-type sur le diagramme 5.6 p. 38). Ces différences s'expliquent par la difficulté du positionnement identique des sondes de température dans les produits.

Sur le diagramme 5.7 (p. 39) figurent le relevé de température à coeur d'un pain d'épaisseur double (5 cm) et la moyenne de température à coeur des pains d'épaisseur 2,5 cm.

Le résultat laisse clairement apparaître l'impossibilité d'obtenir une cuisson rapide pour des produits d'épaisseur supérieure à 5 cm.

Les diagrammes 5.8, 5.9, 5.10 (annexe n° 4), pour une charge de 104 kg, mettent en évidence les mêmes résultats que dans le cas précédent.

Il en est de même pour une charge de 176 kg pour laquelle les résultats figurent sur les diagrammes 5.11, 5.12, 5.13 (voir en annexe n° 4).

Sur le diagramme 5.14 (annexe n° 4), on a porté l'évolution de la moyenne des températures normalisées à coeur de pains de tylose d'épaisseur 2,5 cm pour 3 charges différentes avec une puissance de chauffe identique de 72 kW. On constate que les relevés sont, dans la limite de précision vue précédemment, quasiment identiques.

5.4.2) CONCLUSION

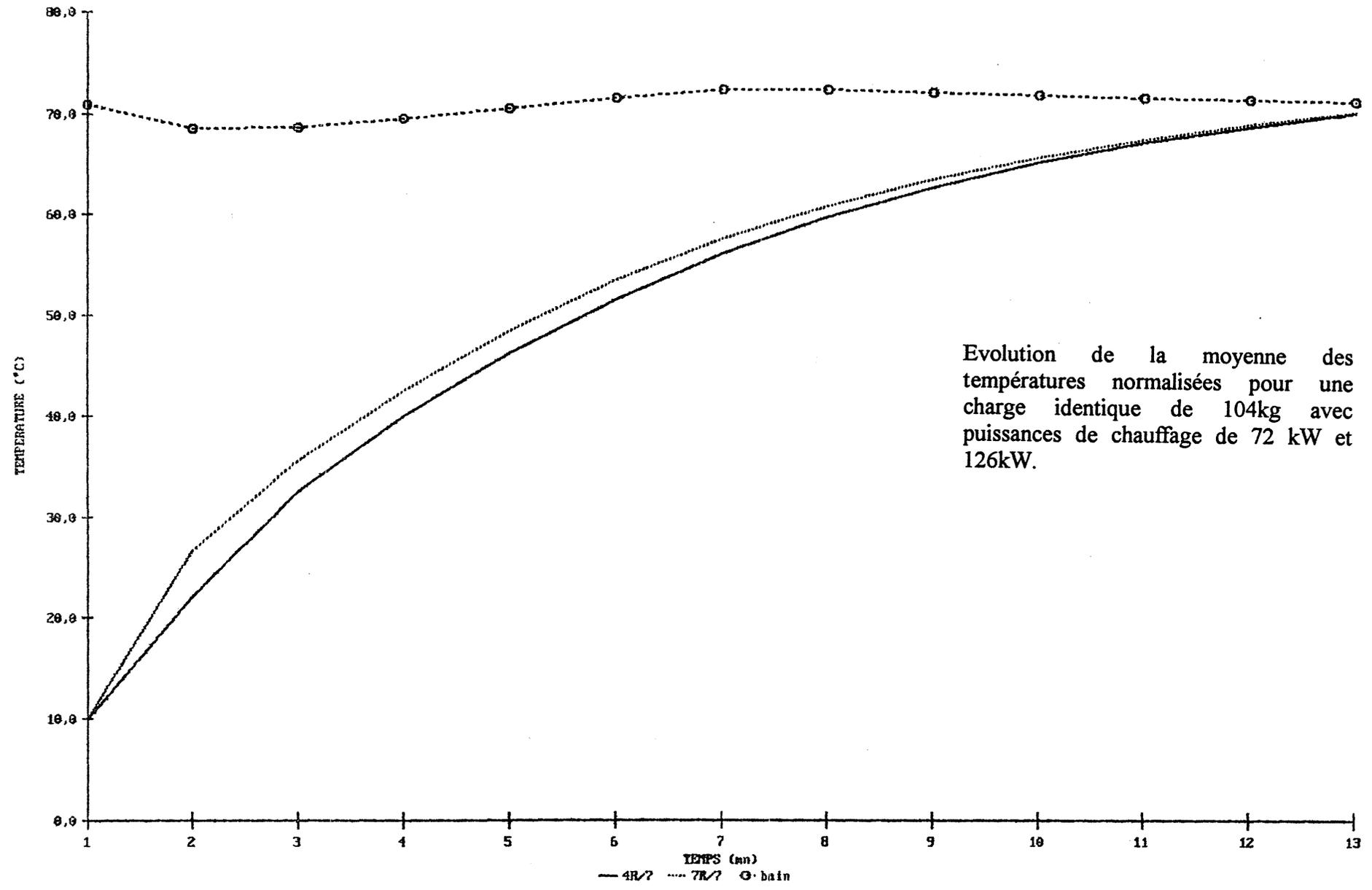
On peut noter que **ni la charge en produit (176, 104 ou 90 kg), ni la température initiale des produits n'affectent les performances de la machine**. Ces deux paramètres constituent des causes de perturbation vis à vis du cuiseur, et les caractéristiques actuelles de celui-ci sont telles qu'il réagit de la même façon quelle que soit l'ampleur de la perturbation.

Il faut également noter que, **si on diminue la puissance de chauffe (126 et 72 kW), ce qui revient à modifier le processus, les performances de la machine demeurent identiques** pour les produits d'épaisseur 2,5 cm avec les charges envisageables.

On peut en déduire que la puissance de chauffe installée est surdimensionnée.

Diagramme 5.2

COMPARAISON PUISSANCES
CHARGES 104KG

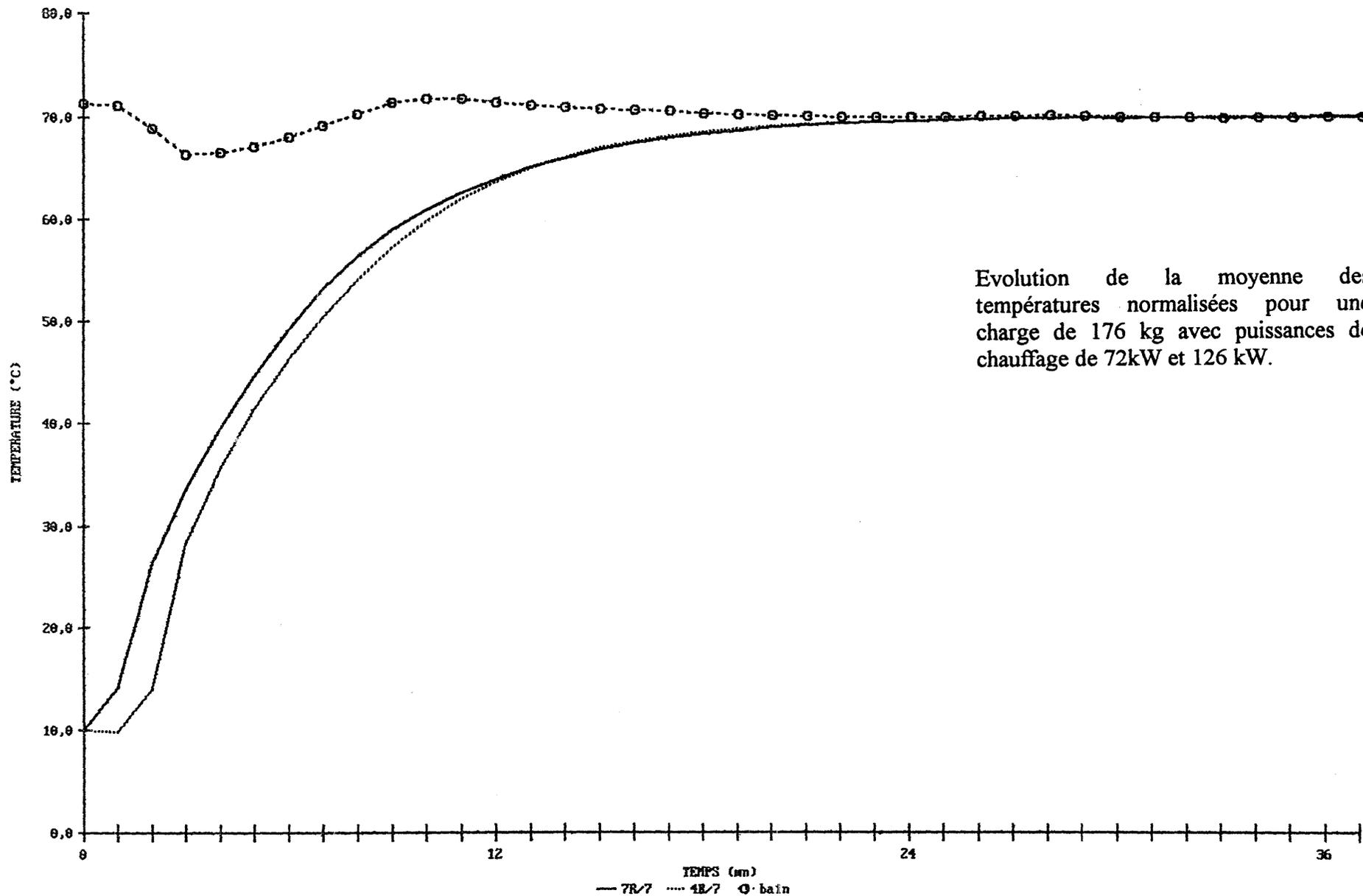


Evolution de la moyenne des températures normalisées pour une charge identique de 104kg avec puissances de chauffage de 72 kW et 126kW.

Diagramme 5.3

COMPARAISON PUISSANCES
CHARGE 176KG

35



Evolution de la moyenne des températures normalisées pour une charge de 176 kg avec puissances de chauffage de 72kW et 126 kW.

Diagramme 5.4

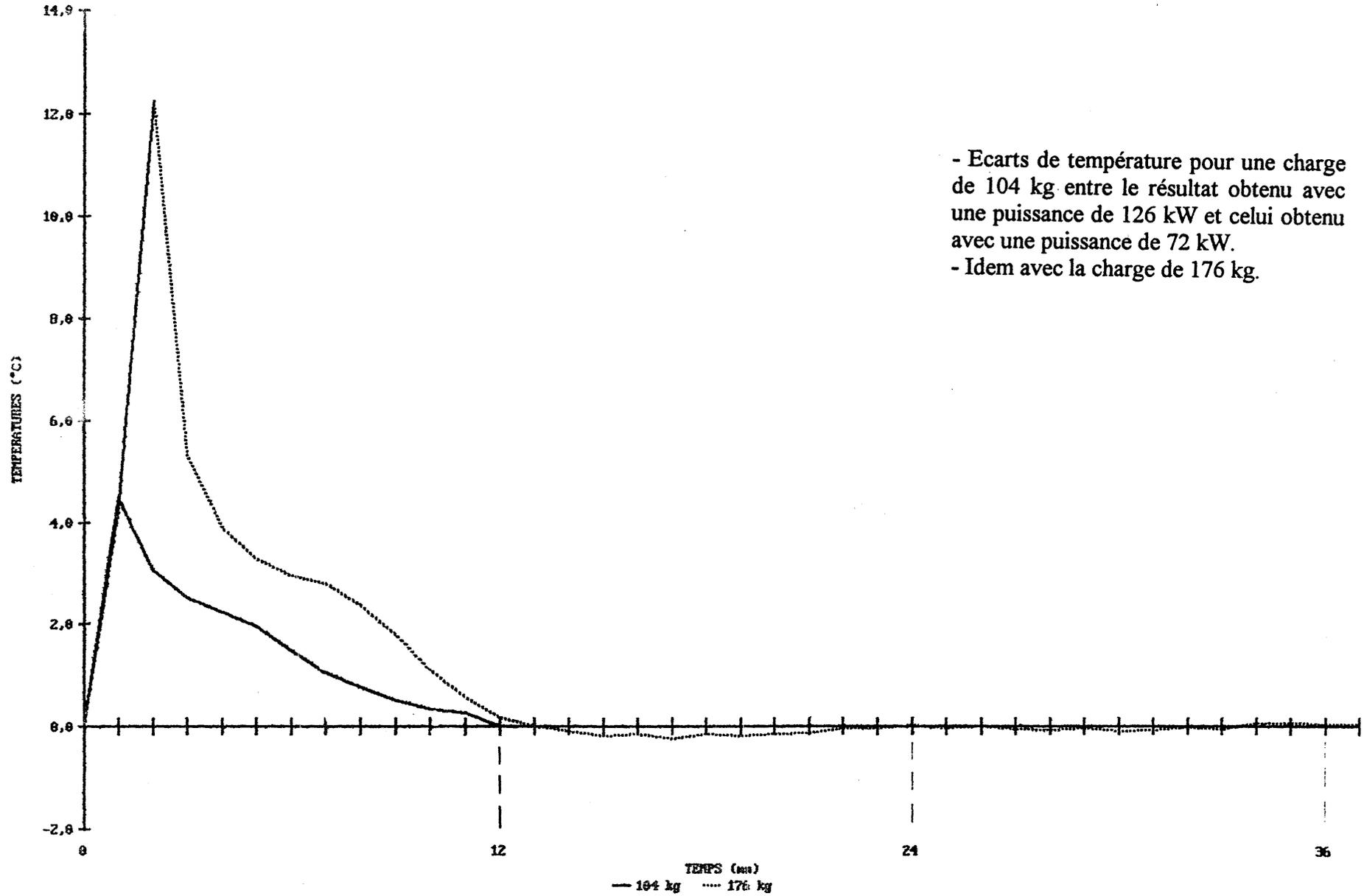
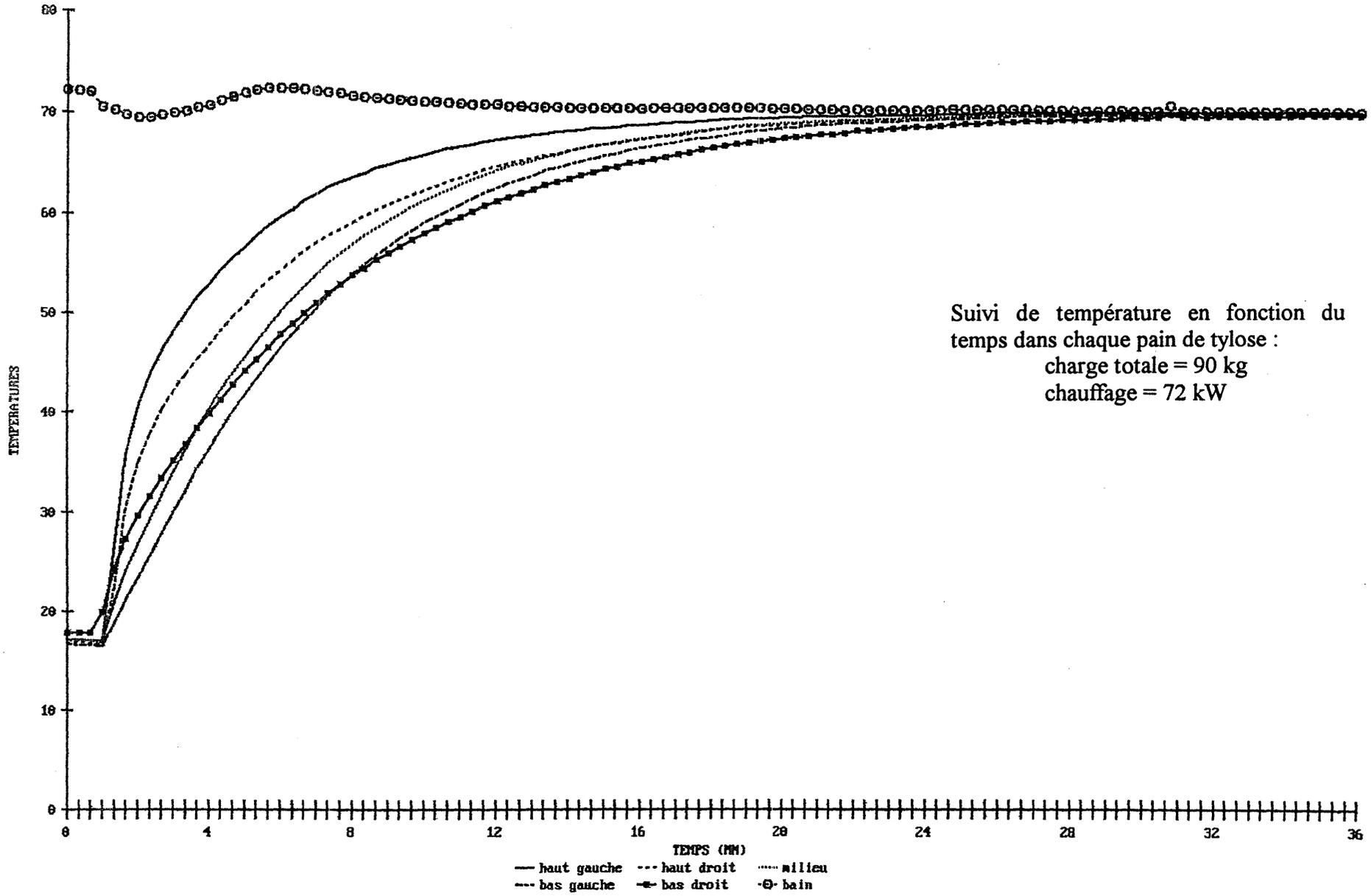


Diagramme 5.5

TEMPERATURES DE PAINS DE TYLOSE
- 4R/7 - CONSIGNE 70°C



Suivi de température en fonction du temps dans chaque pain de tylose :
charge totale = 90 kg
chauffage = 72 kW

Diagramme 5.6

MOYENNE - ECART-TYPE
4R/7 - CONSIGNE 70°C

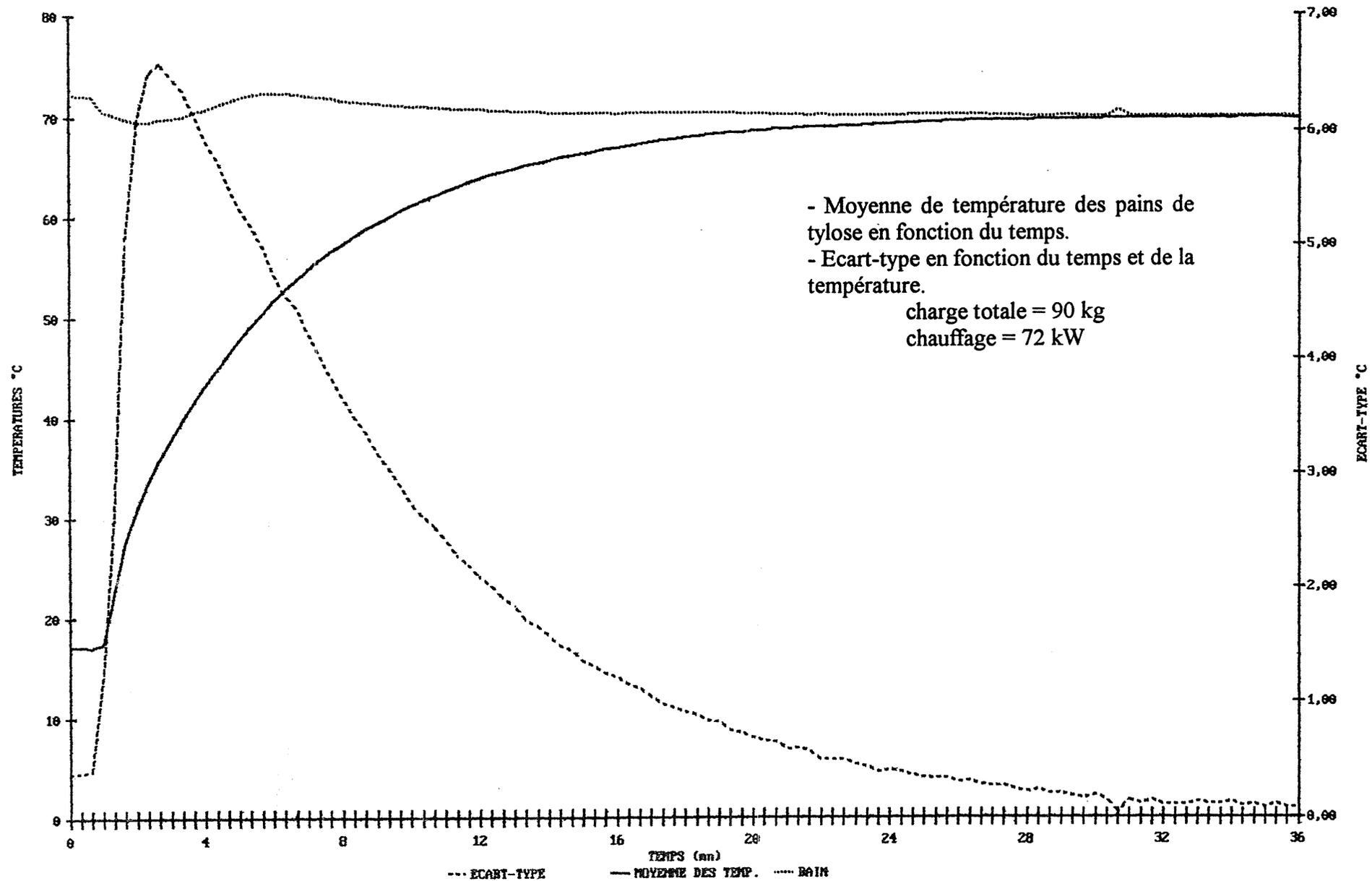
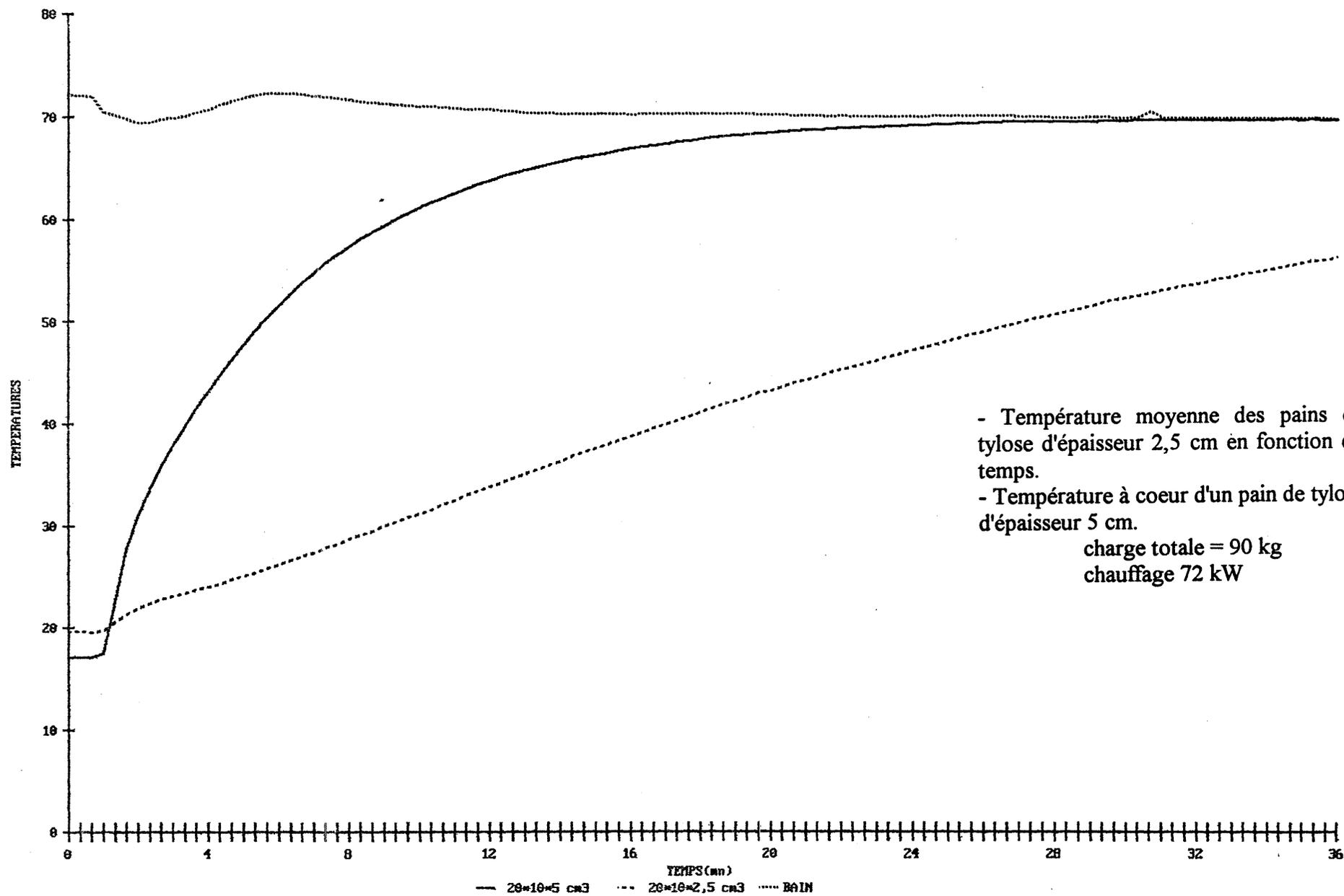


Diagramme 5.7

PAINS DE TYLOSE DE TAILLES DIFFERENTES



- Température moyenne des pains de tylose d'épaisseur 2,5 cm en fonction du temps.

- Température à coeur d'un pain de tylose d'épaisseur 5 cm.

charge totale = 90 kg

chauffage 72 kW

Cette puissance a été calculée en considérant qu'il fallait chauffer les 500 litres d'eau contenus dans la cuve en un temps court, ceci pour que le cuiseur soit opérationnel rapidement en début de journée. Mais le vrai problème n'est peut-être pas là. En effet, une fois l'eau chauffée, la puissance nécessaire n'est plus qu'un très faible pourcentage des 126 kW installés. Ainsi, la puissance totale n'est utile que pour la mise en température, ce qui se révèle être un laps de temps peu important en regard d'une journée de fonctionnement en continu. Il faut donc réduire la puissance installée, le résultat en utilisation industrielle serait le même, mais le coût d'abonnement serait réduit.

5.5) ETUDE DU REFROIDISSEMENT

La législation en vigueur impose un refroidissement jusqu'à 10°C à coeur en moins de deux heures. Cependant, de nombreux industriels considèrent que les produits doivent atteindre une température plus basse, à savoir 2°C à la sortie du cuiseur-refroidisseur, ce qui leur permet de les entreposer directement au froid.

Dans cette optique, plusieurs types de refroidissement ont été étudiés :

- refroidissement à l'eau de ville (12-15°C);
- pré-refroidissement à l'eau de ville jusqu'à 20-25°C, puis ajout de glace en paillettes pour abaisser immédiatement la température du bain à 2°C.
- refroidissement à l'eau réfrigérée (1°C) produite par une machine frigorifique dont la consigne de fonctionnement est fixée à 1°C.

Pour tous ces types de refroidissement, un circuit d'eau a été mis en place: circuit ouvert pour l'eau de ville; circuit fermé pour l'eau réfrigérée. Les débits sont de l'ordre de 22 l/min.

5.5.1) ETUDE DE L'HOMOGENEITE DU BAIN FROID.

L'homogénéité de température dans le bain froid a été réalisée par un bullage du même type que dans la cuve chaude.

Cette étude d'homogénéité n'a été effectuée que pour le refroidissement à l'eau de ville, initialement prévu par le constructeur de la machine.

Par ailleurs, il est à noter que l'installation d'un circuit d'eau réfrigérée n'a été qu'un montage expérimental et n'est pas réellement transposable au stade industriel.

Les conditions de l'expérience étaient les suivantes :

- Les essais ont été effectués pour une charge de 90 kg.
- Les 6 sondes ont été réparties de façon à représenter tous les points de la cuve: haut et bas de cuve, et, pour chacun, arrière, milieu et avant de cuve.

Les résultats sont portés sur le diagramme 5.15.

On observe un faisceau de courbes dont les écarts sont à peine 0,5°C.

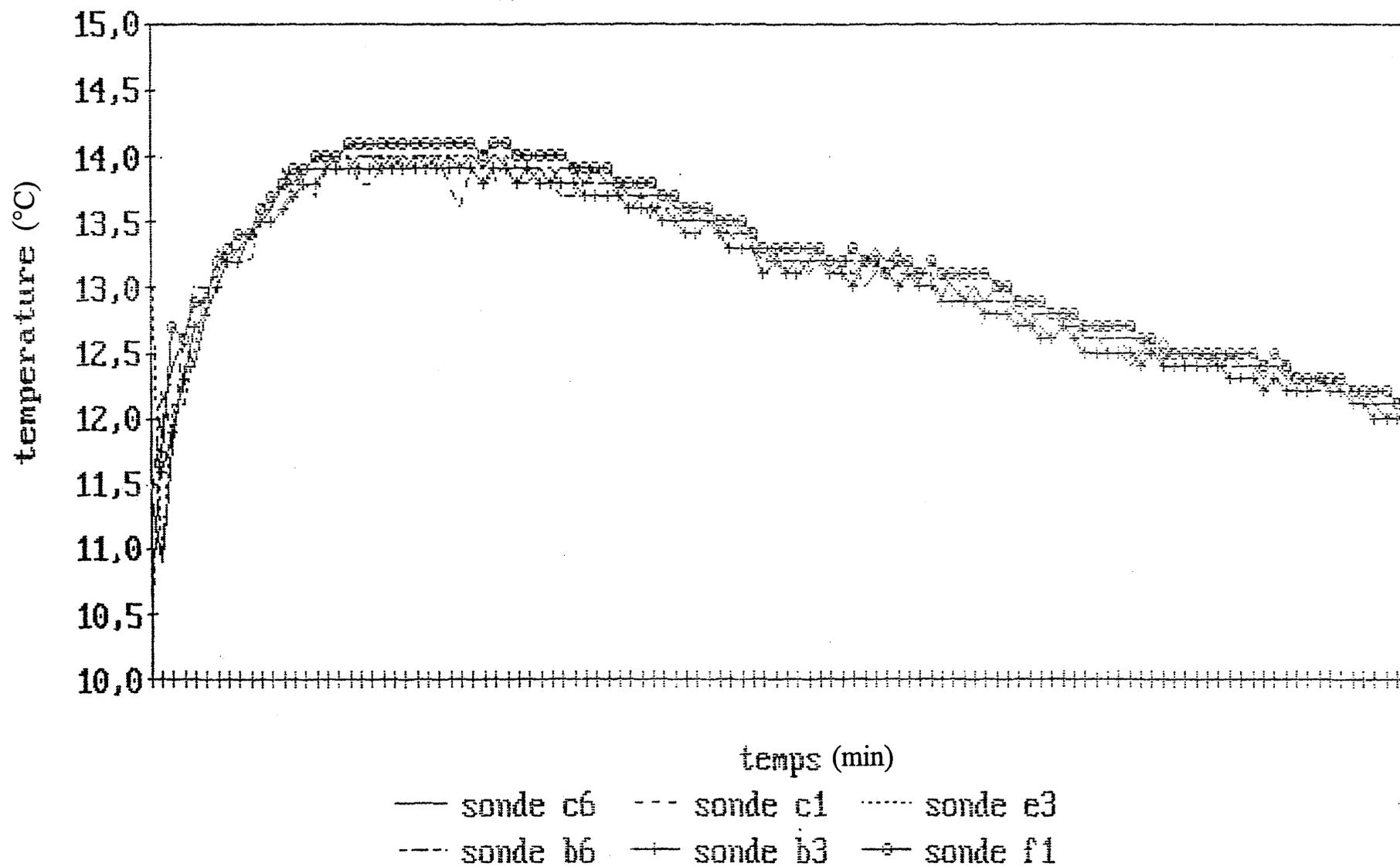
On peut donc considérer que le système de refroidissement par bullage donne une répartition de température parfaitement homogène dans toute la cuve.

Ceci a été vérifié dans toutes les autres expériences, où deux sondes d'indication de température de bain ont été placées en des points opposés, et où aucune différence significative n'a été relevée.

Diagramme 5.15

REFROIDISSEMENT

HOMOGENEITE AVEC DEBIT=22 l/min

In Bain

5.5.2) EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DU PRODUIT LORS DU REFROIDISSEMENT AVEC BULLAGE.

Nous effectuerons d'abord la présentation des résultats pour chaque type de refroidissement

Afin d'éviter toute hétérogénéité liée à la position même des sondes à l'intérieur des pains de tylose, nous nous sommes attachés d'une part à la moyenne de toutes les sondes à coeur, et d'autre part au cas le plus défavorable, c'est à dire à la sonde qui indiquait la chute de température la plus lente. (Ce cas est celui qui correspond à la meilleure position de sonde thermométrique). Les courbes analysées correspondent à une charge de 104 kg.

5.5.2.1) REFROIDISSEMENT EAU DE VILLE (charge de 104 kg).

Les courbes sont consignées sur le diagramme 5.16. (p. 43).

Après une chute très rapide de la température dans les premières minutes, on constate que les derniers degrés demandent une durée de refroidissement très longue, comme l'indique le tableau récapitulatif suivant :

Durée de réfrigération (min)	7	14	21	28
Abaissement de la température moyenne en 7 min.	40,9°C	8,9°C	2,6°C	0,8°C
Abaissement de la température de la sonde 6 en 7 min.	36,9°C	10,2°C	3,5°C	1,4°C

En ce qui concerne l'évolution du bain, on constate qu'au bout de 28 minutes, l'eau de ville n'a pas retrouvé sa température initiale de 10,9°C ; elle est en effet de 12,1°C, après être passée par un maximum de 14°C au temps $t = 4$ minutes 30 secondes (où la température moyenne est égale à 29,12°C) ; la fin de refroidissement est extrêmement lente, c'est pourquoi, nous avons envisagé un refroidissement en deux étapes.

5.5.2.2) PRE-REFROIDISSEMENT A L'EAU DE VILLE + REFROIDISSEMENT L'EAU GLACEE (charge de 104 kg).

Nous avons pratiqué un pré-refroidissement à l'eau de ville jusqu'à ce que la température à coeur des produits ait atteint environ 20°C ($t = 11$ minutes).

80 kg de glace en paillettes ont alors été déversés dans le bain, afin d'abaisser sa température le plus rapidement possible. La température s'est alors stabilisée à environ 2,2°C. L'utilisation de la machine frigorifique permettait le maintien de cette température et le renouvellement continu d'eau. Ce procédé avait l'objectif de simuler un fonctionnement possible avec une centrale de production d'eau glacée.

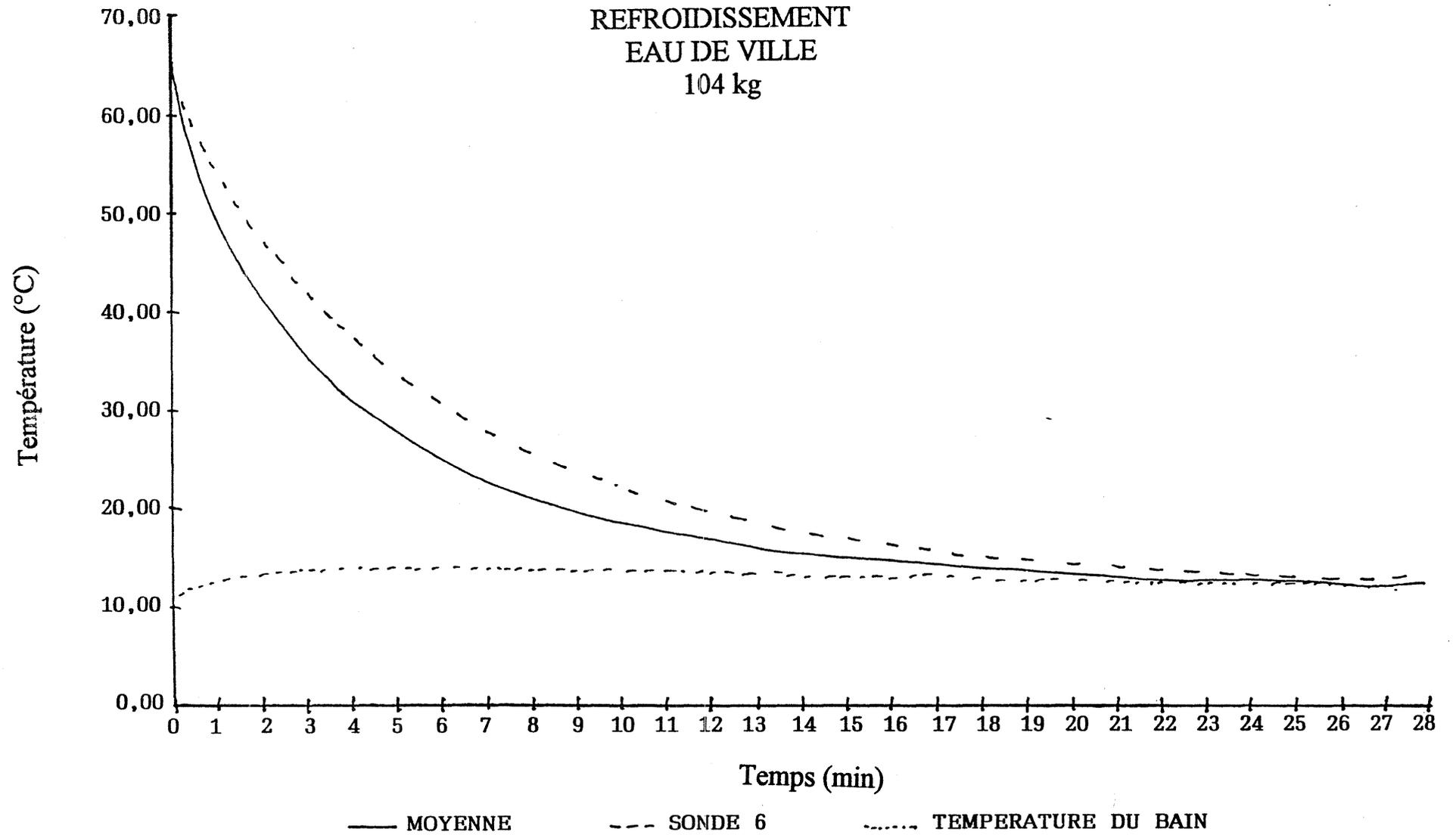
Les courbes obtenues sont consignées sur le diagramme 5.17 (p. 45).

On remarque qu'à partir du moment où on a commencé à ajouter de la glace, il a fallu 16 minutes pour que la moyenne des températures des produits à coeur ait atteint 3°C.

Par ailleurs, à partir du moment où la température du bain s'est stabilisée à 2°C, il a fallu seulement 11 minutes et 40 secondes pour atteindre 3°C.

On peut donc supposer qu'avec un système de réfrigération adéquat pour l'obtention directe d'eau à 2°C, le refroidissement serait beaucoup plus performant et la descente en température plus rapide.

Diagramme 5.16



5.5.2.3) REFROIDISSEMENT A L'EAU REFRIGEREE (charge=104 kg)

Pour ces essais, la température de consigne de la machine frigorifique a été fixée à 3°C. Les courbes sont consignées sur le diagramme 5.18 (voir annexe n° 4).

Comme l'indique le tableau suivant, et par comparaison avec les résultats précédents, on observe une chute de température très rapide au départ, puis, à la fin, on retrouve un refroidissement très lent.

TABLEAU RECAPITULATIF:

Durée de réfrigération (min)	7	14	19
Abaissement de la température moyenne en 7 min.	46,5°C	8,5°C	1,8°C
Abaissement de la température de la sonde 6 en 7 min.	40,9°C	11,5°C	3,1°C

Evolution de la température du bain:

A t = 19 minutes, la température du bain est de 9,6°C.

Cette température a été atteinte au bout de 10 minutes et elle semble être la température de stabilisation du bain.

Cet essai nous a simplement permis d'obtenir une idée de l'évolution de la chute de température des produits avec une eau réfrigérée. Le maintien d'une température de bain à environ 0°C exige l'utilisation d'une machine frigorifique plus puissante et une circulation d'eau par des pompes à débit plus intense.

5.5.3) EXPLOITATION DES RESULTATS :

5.5.3.1) TEMPS DE DEMI-REFROIDISSEMENT.

En admettant l'approximation d'un refroidissement interne homogène des échantillons de tylose, on peut calculer le temps de refroidissement z donné par la relation :

$$Z = \frac{MC}{hS} \ln \left[\frac{(T_1 - T_0)}{(T - T_0)} \right]$$

où: $\frac{MC}{hS} = A = \text{cte}$ (M = masse de l'échantillon kg

C = chaleur massique de l'échantillon : J/kg.K

h = coef. de transfert de chaleur : W/m².K

S = surface d'échange : m²)

T₁ = température initiale chaude

T₀ = température du bain froid

Le temps de demi-refroidissement t(1/2) correspond au moment où:

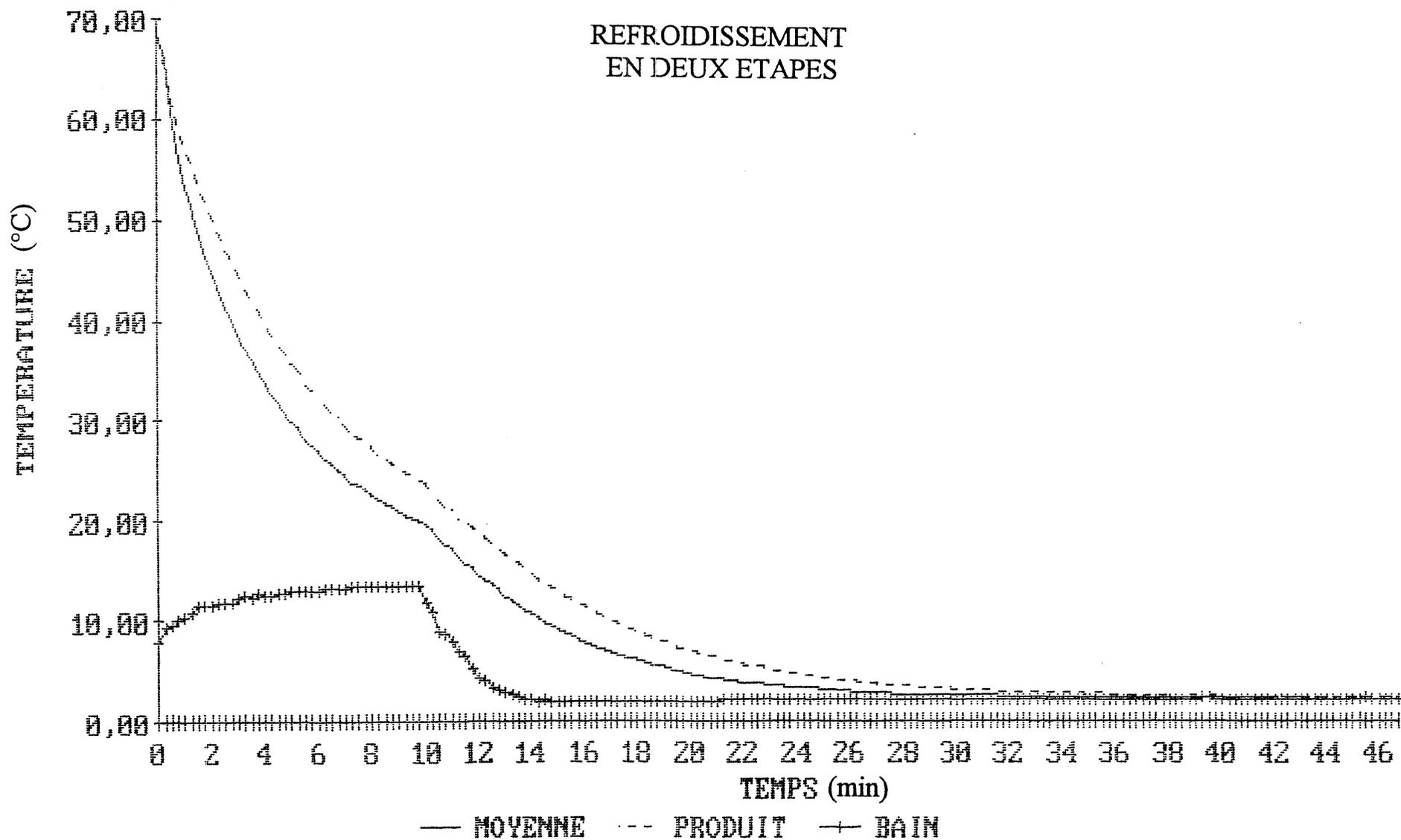
$$T - T_0 = \frac{1}{2} (T_1 - T_0), \text{ d'où } t(1/2) = A \ln 2$$

En raisonnant sur la moyenne des températures obtenues, a pu déterminer expérimentalement le temps de demi-refroidissement, et donc en déduire la constante A.

Les calculs de t(1/2) figurent en annexe n° 4, leurs valeurs sont de l'ordre de 4 minutes, les faibles valeurs obtenues montrent l'efficacité du refroidissement par immersion.

Diagramme 5.17

TEMPERATURE EN FCT DU TEMPS
COMP. MOY, BAIN ET 1 PDT



Le temps de demi-refroidissement est une caractéristique à la fois du procédé de refroidissement et du produit refroidi considéré, il permet :

- d'une part, de connaître l'évolution de la courbe de refroidissement du produit à une température initiale quelconque et à une température de bain quelconque.
- d'autre part, d'appréhender l'allure de la courbe de refroidissement pour un produit de même nature, mais de format différent.

5.5.3.2) INFLUENCE DE LA CHARGE

Pour étudier l'influence de la charge sur la vitesse de refroidissement, les expériences ont été effectuées avec de l'eau de ville (débit 22 l/min.).

Les courbes obtenues sont consignées sur les diagrammes 5.19 et 5.20 figurant en annexe n° 4.

Evolution du bain.

	Température du bain	
	T initiale	T finale
Pour 176 kg, on a :	13,9°C ;	19°C
Pour 104 kg, on a :	10,9°C ;	13,5°C
	Différence = 3°C ;	Différence = 5,5°C

Par conséquent, une augmentation de charge à une température initiale des produits d'environ 70°C entraîne une élévation de température du bain plus importante, et donc une durée plus longue de refroidissement. Cet allongement pourrait être évité en augmentant le débit d'eau froide, ce qui naturellement abaisserait sa température.

En effet, pour atteindre 30°C à coeur du produit, il faut 6 minutes et 30 secondes pour une charge de 176 kg, alors qu'il ne faut que 4 minutes et 15 secondes pour une charge de 104 kg. Il est à noter que ces comparaisons sont valables dans la mesure où, en début de refroidissement, une légère différence de température du bain froid n'a que très peu d'effet sur la rapidité de l'abaissement de température du produit.

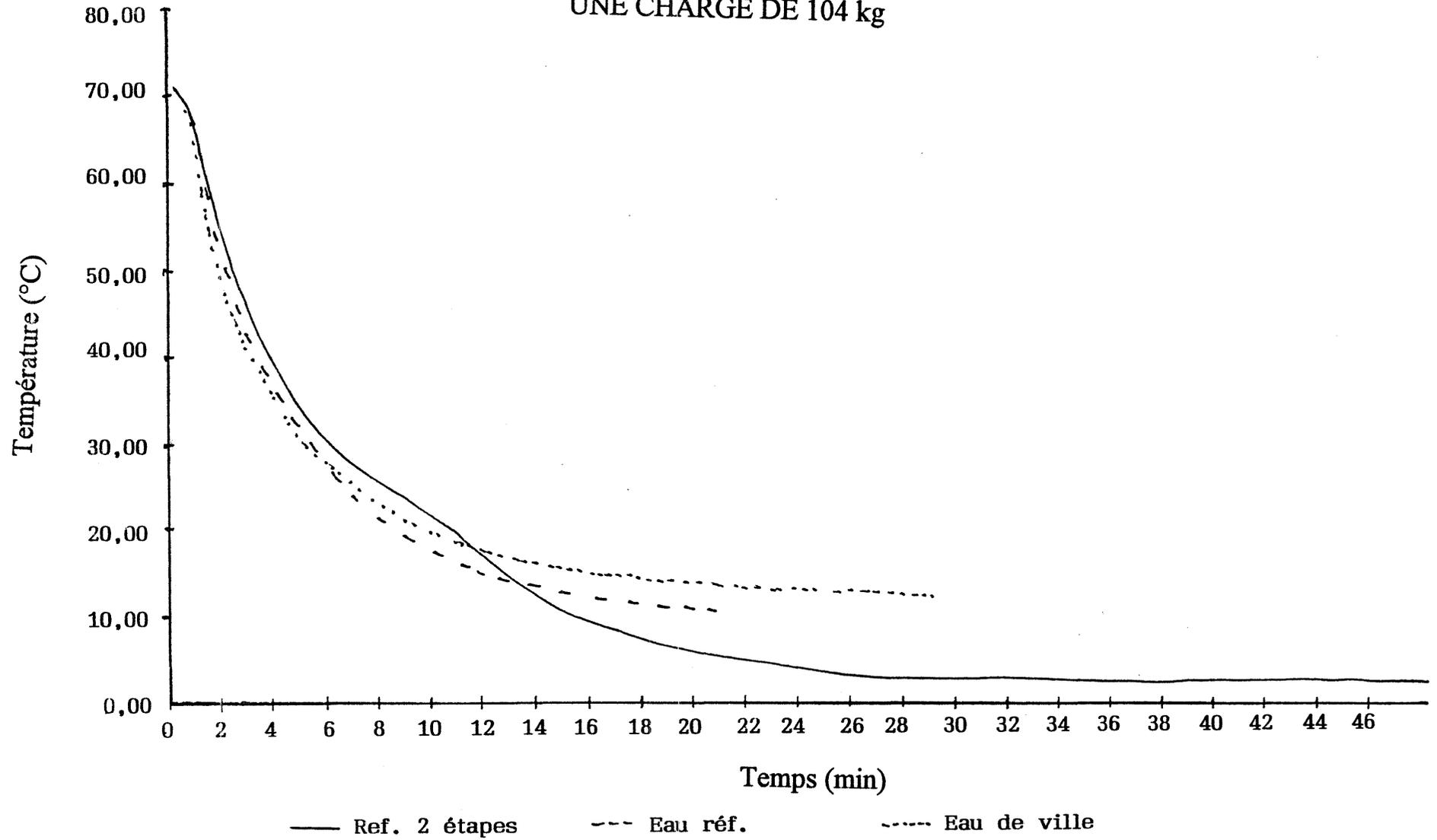
5.5.3.3) INFLUENCE DU TYPE DE REFROIDISSEMENT, CONFIGURATION D'UNE MACHINE INDUSTRIELLE

Les courbes qui figurent sur le diagramme 5.21 permettent de comparer l'efficacité des trois types de refroidissement. Le système utilisant l'eau de ville ne peut pas à lui seul permettre d'atteindre la température de 2°C, mais il se révèle aussi intéressant que le système à eau réfrigérée pendant les 8 premières minutes.

Notre système utilisant l'eau réfrigérée, en raison de sa trop faible puissance frigorifique et de son débit insuffisant, ne satisfait pas non plus au besoin. Mais on peut déterminer par le calcul (en utilisant le temps de demi-refroidissement) qu'en employant une eau maintenue à 0°C, le passage de la température à coeur de 70°C à 3°C demande environ 20 minutes.

Donc la solution technique qui consiste à utiliser une seule cuve à eau réfrigérée couplée avec une cuve chaude impose pour la synchronisation des 2 opérations une durée de cuisson au moins égale à 20 minutes, pour toute cuisson de durée inférieure deux cuves seront nécessaires. Mais on doit noter que l'utilisation d'eau réfrigérée est une solution coûteuse aussi bien en investissement qu'en fonctionnement.

Diagramme 5.21
COMPARAISON DES
MOYENNES DE REFR. POUR
UNE CHARGE DE 104 kg



Le système utilisant de l'eau de ville puis de l'eau réfrigérée, tel qu'il a été utilisé, suggère des améliorations dans sa mise en oeuvre. Pour utiliser au mieux la rapide descente de température obtenue avec l'eau de ville, il conviendrait de limiter son utilisation pour le refroidissement de 70°C à 30°C (durée 5 minutes), la descente de température de 30°C à 3°C pourrait alors s'effectuer dans une autre cuve alimentée en eau réfrigérée à 0°C ; la durée calculée de cette étape est de 18 minutes.

On voit ainsi s'esquisser **la solution à adopter pour des cuissons courtes** de durée inférieure à 20 minutes ; elle consisterait à doter la machine **d'une cuve alimentée à l'eau de ville** (eau rejetée après usage ou recyclée grâce à l'utilisation d'une tour de refroidissement), **couplée à une cuve d'eau glacée** équipée de sa centrale de production frigorifique.

5.5.4) VALEURS PASTEURISATRICES LORS DU REFROIDISSEMENT

Pour ce calcul de VP, nous n'avons pas pris en compte le temps de transport du panier de la cuve chaude à la cuve froide, et ceci pour des raisons purement pratiques : en effet, la machine ne fonctionnant pas encore en automatique, il est impossible de déterminer le temps réel de transport durant un cycle industriel. On doit remarquer que, pendant ce transfert, la température à coeur ne varie quasiment pas, son calcul sera donc simple.

Le calcul a été fait pour un essai de refroidissement à l'eau de ville, ce qui représente le cas où la VP de refroidissement est la plus élevée.

Or, on arrive à une VP totale de refroidissement de 0,33, ce qui est réellement négligeable dans le cas où le produit est initialement à une température de 70°C. Cette valeur augmente avec la valeur de la température de consigne mais la rapidité de la chute de température jusqu'à 50°C limite cette augmentation.

On peut donc considérer que le refroidissement n'a aucune influence sur la VP totale des produits cuits dans notre cas en raison d'une température de consigne faible et d'un refroidissement très rapide de 70°C à 50°C.

5.5.5) CONCLUSION

Ces divers essais nous ont permis de montrer que le système de bullage était parfaitement adapté au refroidissement, **le bain étant parfaitement homogène.**

Par ailleurs, la prise en compte d'un **refroidissement en deux étapes, l'une à l'eau de ville, l'autre à l'eau glacée**, s'avère nécessaire si on veut passer au-dessous de la valeur limite de 8°C dans des temps acceptables.

Ceci suppose un remaniement indispensable au niveau de la machine AFREM, à savoir l'élaboration d'une troisième cuve destinée à contenir de l'eau glacée.

Outre le coût que va engendrer cette troisième cuve, il ne faut pas oublier le coût non négligeable de production d'eau glacée (équipement, fonctionnement). Mais ces dépenses peuvent se révéler indispensables, si l'on veut une machine qui assure une descente à des températures voisines de 0°C.

Mais on doit noter que quelle que soit la solution adoptée, il y a une circulation d'eau froide, cette dernière pourrait s'avérer suffisante pour homogénéiser la température du bain. De plus, cette solution permettrait d'éviter les apports de chaleur dus au bullage.

CHAPITRE 6

TESTS DE LA MACHINE AFREM AVEC CHAUFFAGE AU GAZ

6.1) INTRODUCTION

La régulation d'un brûleur à gaz est très étroitement liée à sa conception ; pour des raisons de sécurité de fonctionnement et de responsabilité du fournisseur, nous ne sommes pas intervenus sur son réglage. Le tube immergé compact (TIC) est disposé en fond de cuve à la place des résistances électriques utilisées précédemment (Schéma p.50). Le dispositif de bullage est placé de manière à faire passer les bulles dans l'espace situé entre les circonvolutions du tube. La génération de chaleur en fond de cuve est très différente de ce qui existait précédemment d'où la nécessité de reprendre complètement l'étude des performances de la cuve chaude.

6.2) FONCTIONNEMENT DU TUBE IMMERGE COMPACT. PUISSANCE FOURNIE.

Il s'agit d'un brûleur dit de type avec mélange et allumage en nez, dont les spécifications techniques figurent dans l'annexe n° 5.

L'air arrive directement dans la chambre de combustion, propulsé par un ventilateur non réglable. L'air nécessaire à la combustion arrive toujours à la même vitesse indépendamment du régime d'arrivée du gaz qui, lui, est réglé. La mise à feu est assurée par une bougie électrique.

Le choix de ce brûleur a été déterminé essentiellement par :

- la faible puissance disponible 50 kW (annoncée par le fabricant) correspondant à notre besoin et à la place disponible en fond de cuve.
- l'assurance donnée par le constructeur quant à la possibilité de réguler la puissance disponible de 10 à 100 %.

Les tests de fonctionnement du brûleur (annexe n° 5) font apparaître les résultats suivants :

A plein régime, le brûleur fonctionne normalement, sa puissance est de 56,7 kW avec un rendement de 75 à 79 % sur PCS ou 85 % sur PCI.

A bas régime, le rendement tombe à 60 % sur PCS ou 76 % sur PCI.

- . La puissance maximum est supérieure d'environ 11% à la valeur nominale annoncée (50 kW) par le constructeur.
- . Le rendement, par contre, est inférieur à ce qu'on est en droit d'attendre d'un TIC.
- . La puissance minimum (20,8 kW) est supérieure (double) à la puissance basse nominale (10 kW) de l'appareil, et, le rendement, dans ce cas, devient très mauvais environ 60 % sur PCS.

C'est la conception même du brûleur qui est en cause, on ne peut pas moduler le fonctionnement de ce type de brûleur (dit à mélange au nez) dans de bonnes conditions. De plus, les taux de CO obtenus (jusqu'à 1000 ppm) sont très supérieurs aux normes.

Un brûleur avec prémélange avant allumage devrait donner de meilleurs résultats. Toutefois, des informations recoupées chez plusieurs fabricants de TIC semblent indiquer qu'on ne règle bien et à coût acceptable la puissance d'un brûleur gaz qu'entre 30 et 100 % de sa puissance.

Ce résultat a des conséquences importantes pour notre machine. Dans le fonctionnement normal d'une unité de production, la demande de la puissance maximale de chauffe n'existe qu'au moment du lancement de la production, c'est, en durée, une période très limitée de fonctionnement ; pendant les phases de cuisson, la demande est beaucoup plus faible, elle sert au réchauffage des produits et à compenser les pertes de chaleur par bullage. Nous avons pu vérifier que, pendant ces périodes, quand la demande de chaleur est inférieure à la puissance minimale du brûleur, la régulation est inopérante. Dans les faits, la température de l'eau de la cuve continue à augmenter, ce qui est absolument inacceptable pour notre machine.

Sauf à trouver un TIC à puissance minimum réglable inférieure à 3 kW (pour une cuve de notre dimension), on doit rejeter ce type de chauffage pendant les phases de cuisson, mais on peut penser le garder pour les mises en température de cuve.

6.3) UNE CUISSON TYPE : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DANS LES PAINS DE TYLOSE.

6.3.1) CONDITIONS EXPERIMENTALES

- . Cuve équipée de bullage maximum, débit d'air de 0,0035 m³/s.
- . Charge de produit à cuire de 56 kg. Volume d'eau et du produit 500 l.
- . Température initiale du produit : 20°C
- . Température finale à coeur du produit : 86°C.
- . Régulation de température est fixée à 86°C.
- . Cuve est initialement à une température de 27°C, sa température finale est de 86°C.
- . Cuve froide initialement à 3°C.
- . Température suivie dans deux pains de tylose (d'épaisseur 2,5 cm) situés au milieu de la charge.

6.3.2) RESULTATS ET ANALYSE.

Une courbe typique de suivi de température figure sur le diagramme 6.2 (p. 52).

- . On note :
 - temps de mise à température de la cuve : 56 minutes.
 - temps nécessaire pour obtenir 86°C à coeur du produit : 40 minutes.
 - temps nécessaire pour obtenir une température inférieure ou égale à 10°C : 40 minutes.
 - On atteint 7,5°C en 60 minutes.

- . Les relevés de consommation de gaz indiquent une consommation
 - de 4,43 m³ pour le chauffage de la cuve
 - de 1,11 m³ pour la cuisson du produit
 - en prenant le prix du m³ de gaz à 1,97 F.

Le coût de chauffage de cuve est de 8,71 F (il est à prendre en compte uniquement une fois par jour, et pourra être intégré dans les frais fixes d'utilisation de la machine).

Le coût de cuisson de 56 kg de produit est de 2,18 F, il sera intégré dans les frais variables à raison de 0,039 F/kg.

- . Les suivis des valeurs pasteurisatrices et cuisatrices figurent dans le diagramme 6.3.

DIAGRAMME 6.2 - CUISSON AVEC BULLAGE

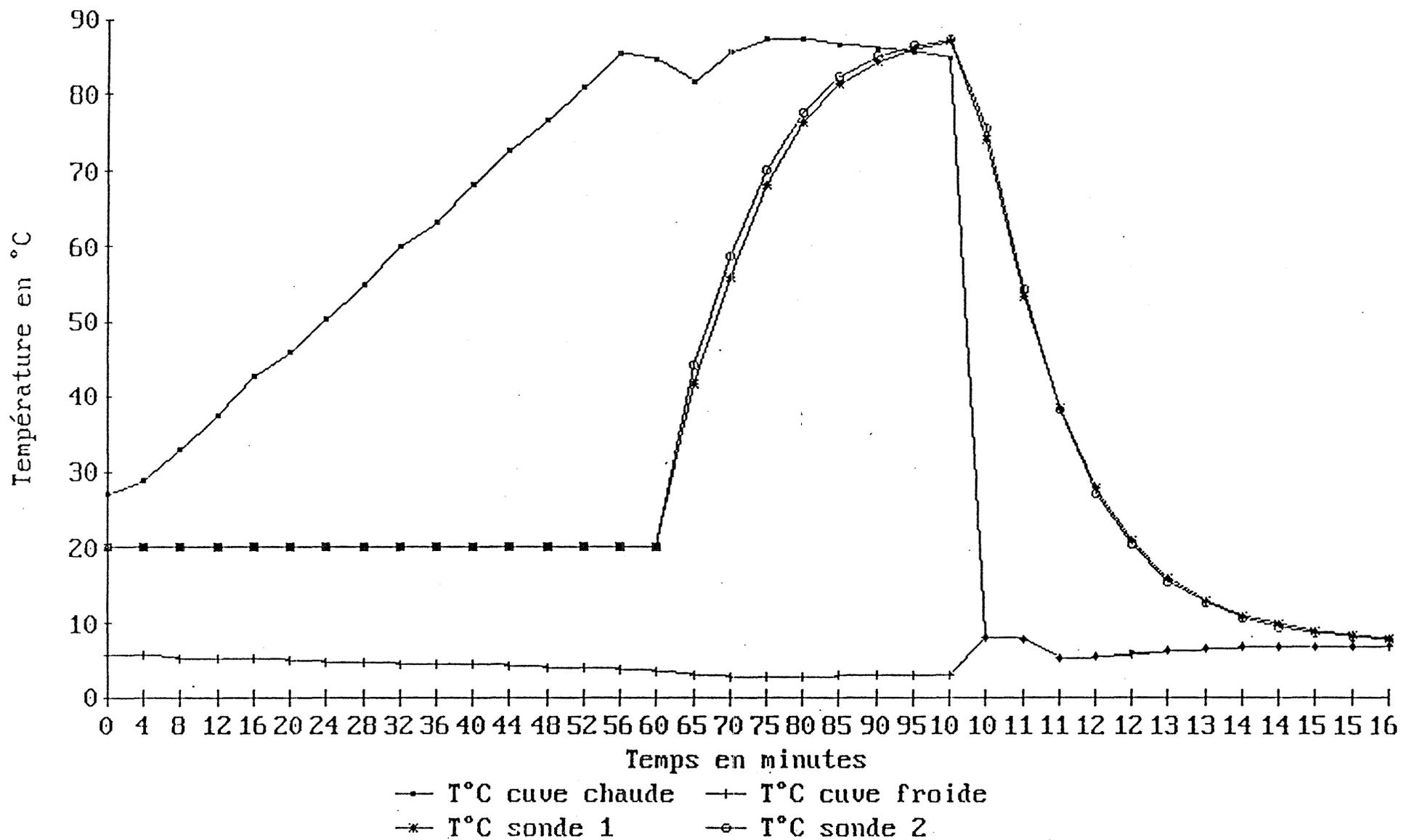
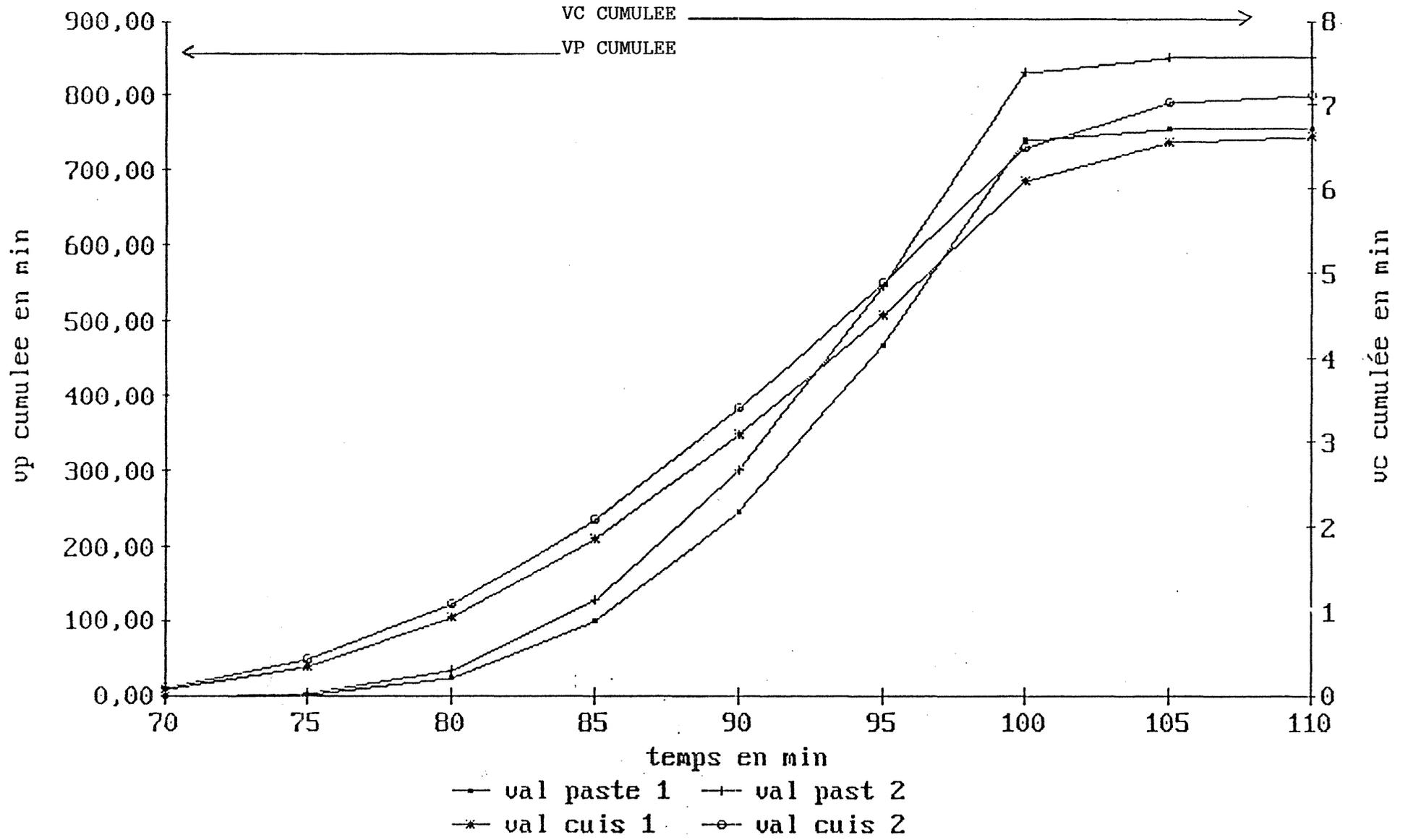


DIAGRAMME 6.3



On doit remarquer que ces valeurs résultent de la montée et de la descente de température. Ces valeurs sont des valeurs élevées pour les valeurs pasteurisatrices par rapport aux valeurs pratiquées pour obtenir un assainissement des produits.

Quant aux valeurs cuisatrices, celles-ci dépendent du type de produit à cuire. A titre de référence, une viande blanche, pour être cuite, doit avoir reçu une valeur cuisatrice de l'ordre de 5.

Remarques :

Une amélioration du rendement du brûleur (voir paragraphe 6.2) pourrait modifier les coûts énergétiques de cuisson, les valeurs annoncées ici devraient pouvoir être abaissées sans qu'on puisse indiquer ici dans quel pourcentage. Une modification dans ce sens serait sans effet sur l'évolution des températures et des valeurs cuisatrices et pasteurisatrices.

6.4) PERTES DE CHALEUR DANS LA CUVE DE CUISSON

- Pendant la phase de montée en température de la cuve : de 15°C à 85°C
- Cuve pleine d'eau : 500 l
- Temps de chauffage : 1 h
- Bullage au maximum

Les pertes :

- 1°) par les parois, les fumées et la face supérieure fermée
- 2°) par la face supérieure ouverte
- 3°) par le bullage

correspondent à quatre façons de fonctionner (A, B, C, D) ; les résultats des mesures figurent dans le tableau ci-dessous :

	A	B	C	D
Bullage	Présent	Présent	Absent	Absent
Couvercle	Ouvert	Fermé	Ouvert	Fermé
Pertes en kW	4,97	3,73	1,47	0,8

- . Dans le cas D, sans bullage et couvercle fermé, les pertes sont minimum et correspondent au 1^{er} type de pertes, on pourra abaisser sa valeur par une isolation plus régulière sur toutes les faces, en particulier sur la face en regard de la cuve froide.
- . Dans le cas C, aux pertes précédentes s'ajoutent les pertes en raison de l'ouverture du couvercle soit $1,47 - 0,8 = 0,67$ kW. On a donc intérêt à fonctionner cuve fermée et couvercle bien appliqué, la mise en place d'un joint souple entre le couvercle et la cuve s'impose.
- . Dans le cas B, aux pertes du cas D s'ajoutent les pertes dues au bullage, soit $3,73 - 0,8 = 2,93$ kW. Ce poste est très important, on doit en tenir compte pour le fonctionnement industriel de la machine.
 - pendant la mise en température de cuve, il n'est pas nécessaire d'utiliser le bullage, car, pendant cette période, l'homogénéisation des températures se fait quasiment naturellement.

- on doit, pendant la cuisson, limiter le bullage à un minimum pour homogénéiser et optimiser les transferts de chaleur.
- . Dans le cas A, on trouve un résultat cohérent avec les deux cas précédents. La somme de toutes les pertes cumulées, évaluées précédemment, s'élève à 4,40 kW alors qu'on a mesuré 4,97 kW. On peut penser que les pertes par la face supérieure sont augmentées par l'effet de bouillonnement dû au bullage, au contact direct avec l'atmosphère ambiante.

Il est à remarquer que la puissance minimum du brûleur est supérieure à la puissance des pertes thermiques, ce qui est générateur de dysfonctionnement.

- soit le brûleur se met en position ralentie quand la température de consigne est atteinte dans la cuve, mais la puissance fournie étant supérieure aux pertes, la température du bain continue à augmenter.
- soit le brûleur est complètement éteint, mais il faut alors attendre plus de 60 secondes à partir du moment où le seuil d'abaissement de température est atteint avant que le brûleur ne se remette à fonctionner.

Dans l'un comme dans l'autre cas, les variations de température résultant des dysfonctionnements ne sont pas acceptables notamment pour des cuissons courtes.

6.5) OPTIMISATION DU BULLAGE

L'agitation par bullage est une caractéristique du procédé. On a vu qu'il est consommateur d'énergie, donc il convient de l'optimiser pour minimiser les pertes tout en assurant l'homogénéité de température et en vérifiant qu'on ne diminue pas l'efficacité de la cuisson.

6.5.1) EFFET DU BULLAGE SUR L'HOMOGENEITE DE TEMPERATURE DU BAIN :

Les expériences ont été effectuées en faisant varier la vitesse d'air donc le débit de bullage.

- . La charge mise en cuisson est répartie sur 24 grilles verticales chargées de succédané de produit alimentaire, ce qui représente 70 kg de produit (voir schéma 6.4). La cuve est initialement chauffée à une température prédéterminée : 85°C, l'homogénéité de température est vérifiée en tout point de l'eau du bain, une charge de produit est plongée dans le bain, les températures sont relevées toutes les 3 minutes pendant 60 minutes.
- . Les relevés de température sont effectués par des thermocouples dont l'étalonnage donne des mesures se situant dans une fourchette de 0,5°C, soit une précision de l'ordre de 0,25°C.
- . Nous ne donnerons ici que les résultats les plus significatifs, ils concernent des mesures effectuées sur deux catégories de sondes.
 - les sondes situées sur le pourtour 1' ; 2' ; 3' ; 4' ; 5' ; 6' ; 7' ; 8' appelées extérieures
 - les sondes situées à l'intérieur du chargement 1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7 ; 8
 (voir schéma 6.5)

Pour chaque débit d'air déterminé, et pour chaque catégorie de sonde, on calcule la moyenne des écarts de température et l'écart-type de la moyenne.

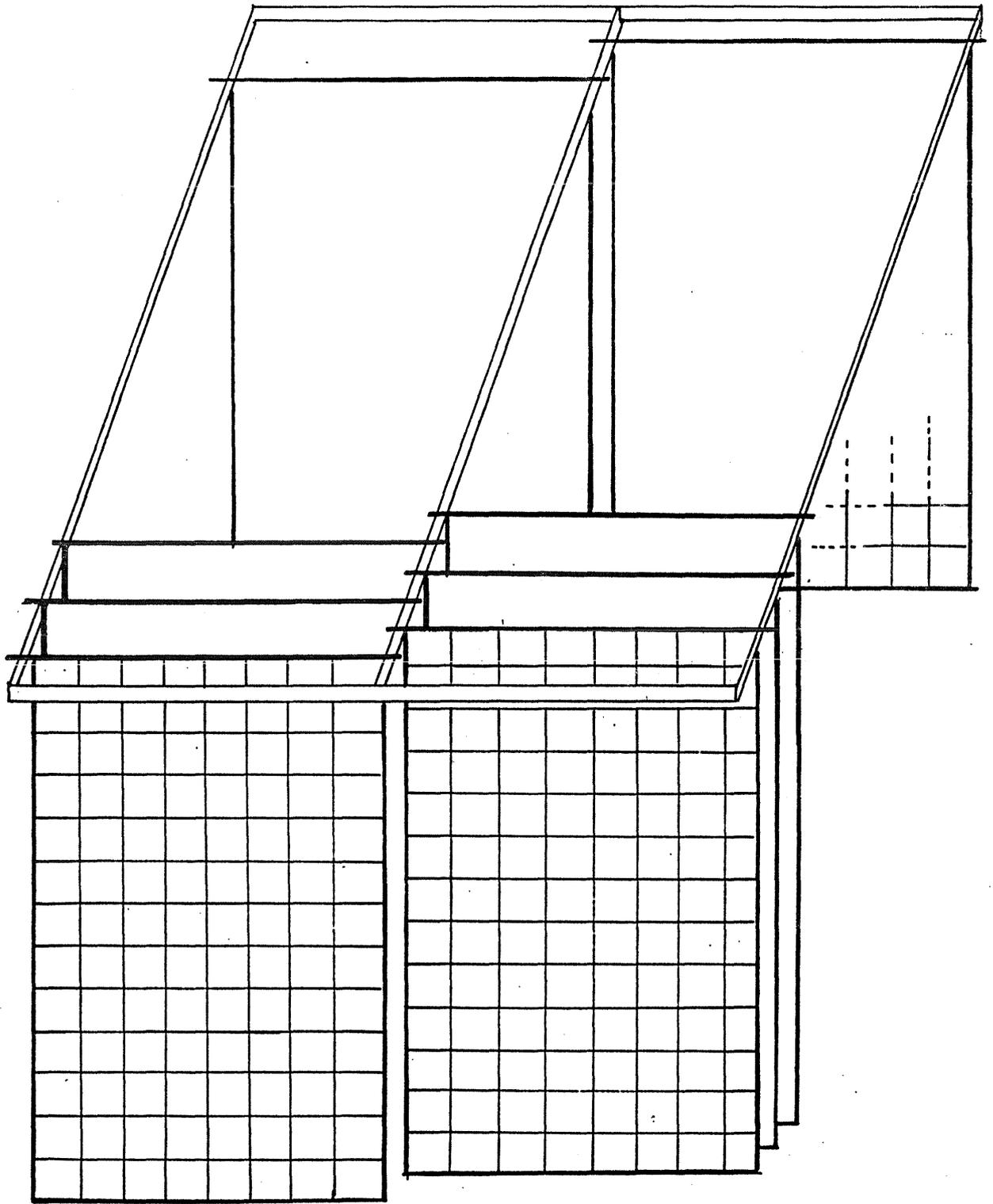


Schéma 6.4

DISPOSITION DES GRILLES

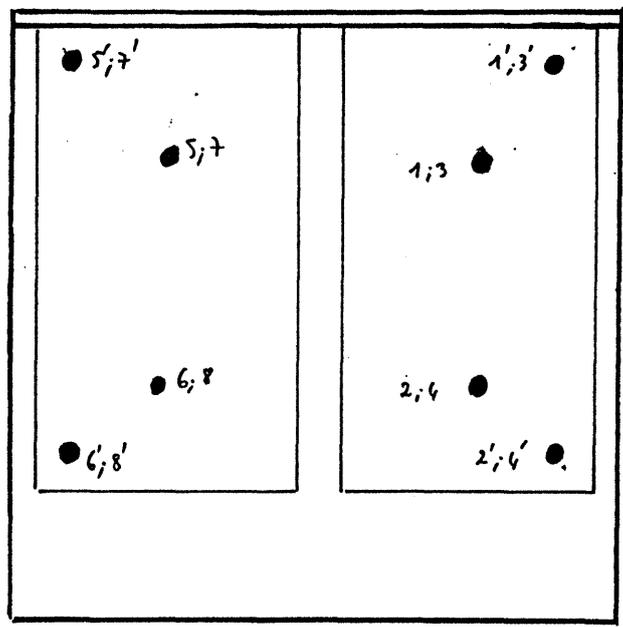
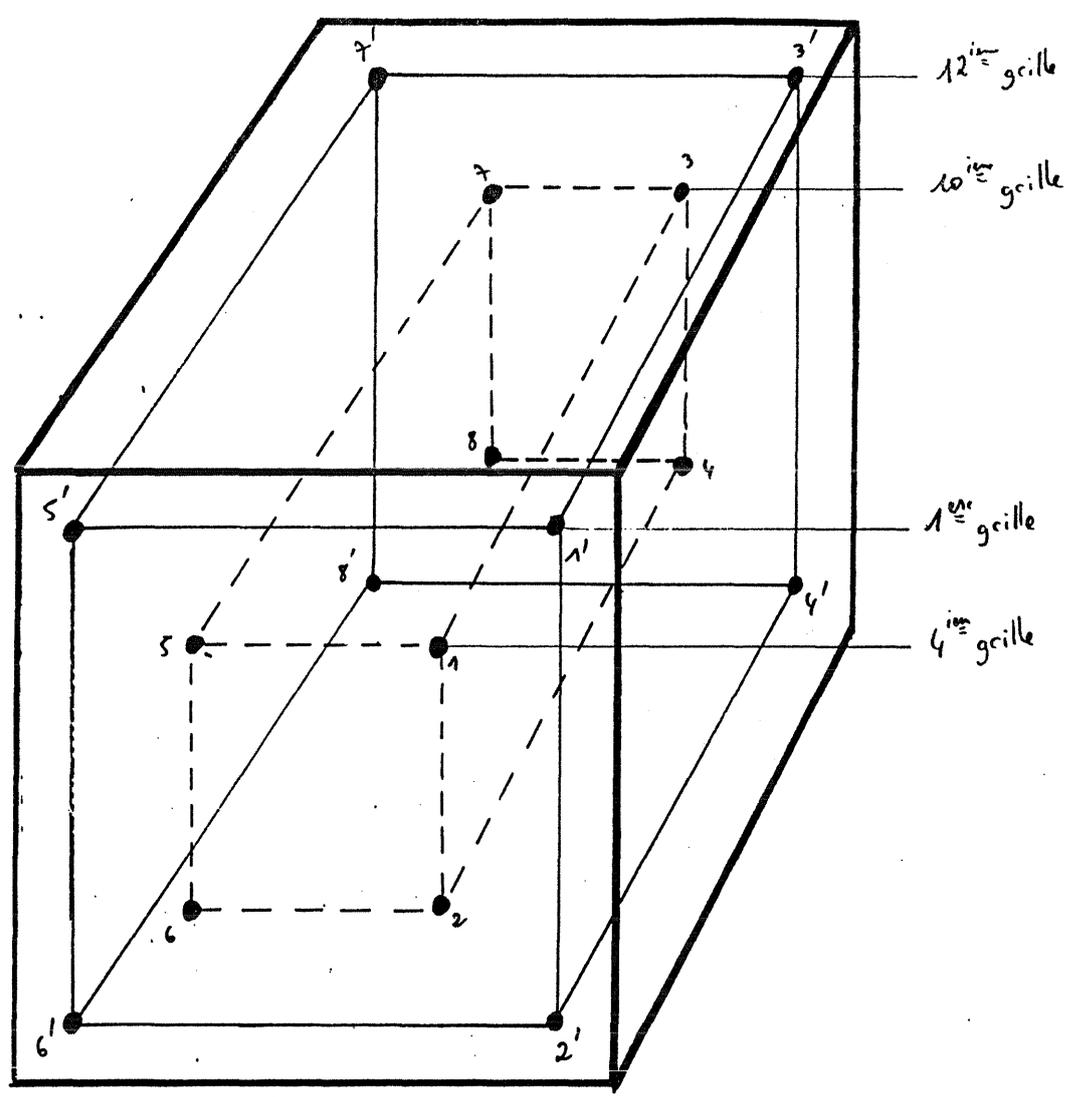


Schéma 6.5

EMPLACEMENT DES SONDES

Exemple de résultats :

débit d'air Vitesse d'air	Catégorie de sondes	Moyenne Ecart de température	Ecart-type
0	sondes intérieures	0,81 °C	0,21
	sondes extérieures	1 °C	0,16
maximum 0,7 m/s	sondes intérieures	0,51 °C	0,09
	sondes extérieures	0,53 °C	0,11

Ces résultats typiques et reproductibles indiquent :

- que le bullage diminue les écarts de température. Sans bullage, les écarts dépassent le degré de précision du système de mesure ; avec bullage, les écarts de températures enregistrées sont divisés par deux (avec des écarts-type faibles) ; ils sont donc de l'ordre de grandeur du degré de précision du système de mesure.
- que les sondes extérieures sont celles pour lesquelles les écarts de température sont les plus importants, une étude plus fine indique que les températures en 1' et 2' (sur la verticale à l'extrémité de la chambre de combustion) sont toujours supérieures aux températures relevées en 7' et 8', soit sur la verticale diagonalement opposée et située dans la zone la plus éloignée du TIC (voir diagramme 6.6). Il conviendra donc d'éviter de mettre des capteurs de régulation de température dans la zone située à la verticale de la chambre de combustion.

On doit toutefois remarquer que, même sans aucun bullage, les écarts de température dépassent à peine 1°C. Ceci est dû à la bonne circulation naturelle de la chaleur entre les grilles verticales.

Des séries de mesure ont été effectuées, avec pour seul paramètre variable la vitesse d'air, pour déterminer son minimum, afin d'assurer l'homogénéité. Sur le diagramme 6.7, on a reporté les moyennes des écarts de température et les écarts-type constatés.

Les résultats indiquent qu'à partir d'une certaine vitesse située entre 0,18 et 0,24 m/s suivant les expériences, l'augmentation du bullage n'apporte pas de diminution des écarts de température, donc n'ajoute rien à l'homogénéité qui est alors caractérisée par des moyennes des écarts inférieurs à 0,9°C avec des écarts-type inférieurs à 0,2°C.

Il conviendra donc pour notre cuve de limiter la vitesse d'air à 0,2m/s et ainsi le bullage à un débit de $10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. Ce bullage correspond à une surface de base de cuve de $0,92 \times 0,92 = 0,85 \text{ m}^2$ et à une hauteur d'eau à traverser de 0,88 m.

DIAGRAMME 6.6
Temp. des sondes ext. (bullage maxi)

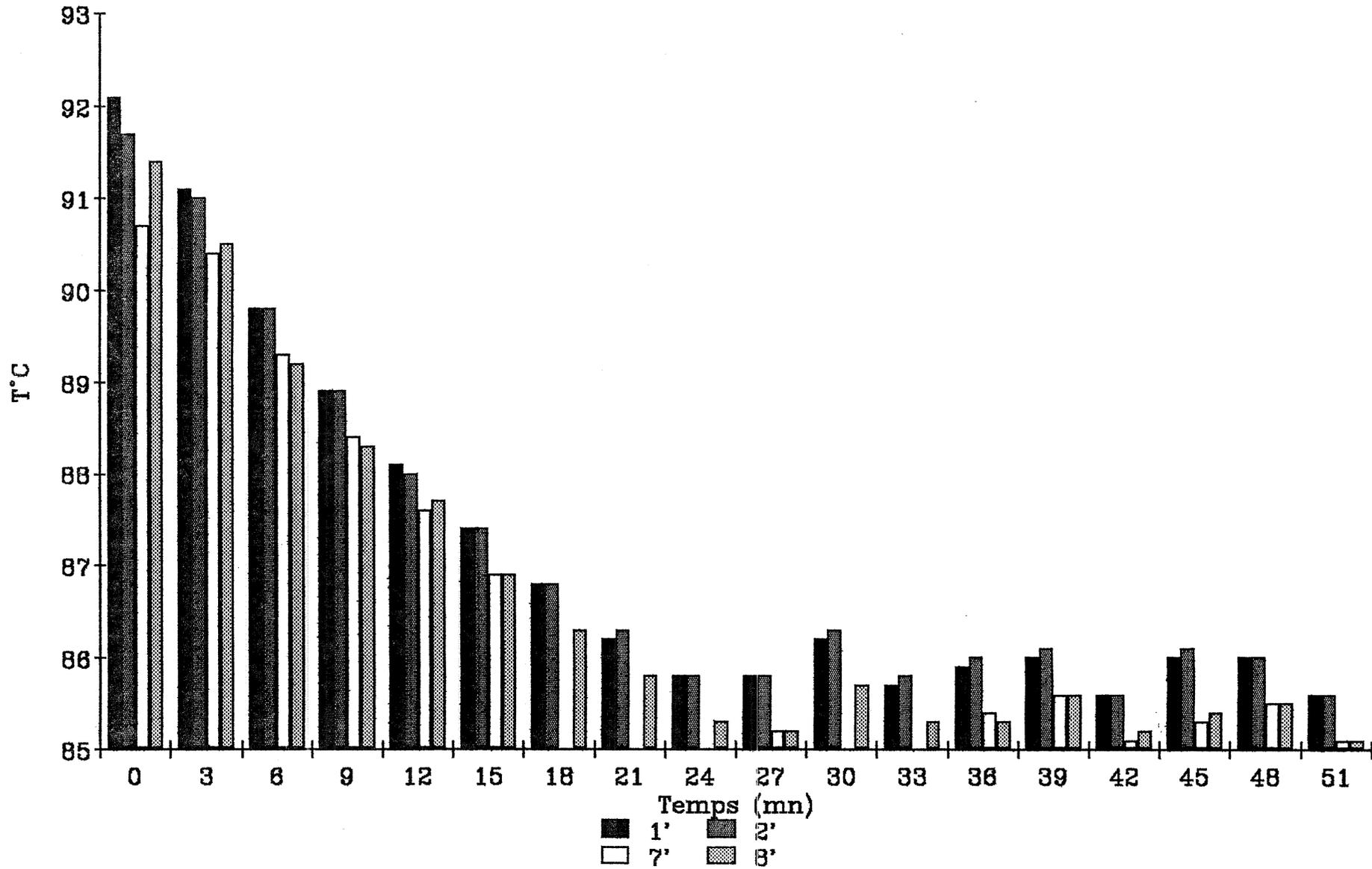
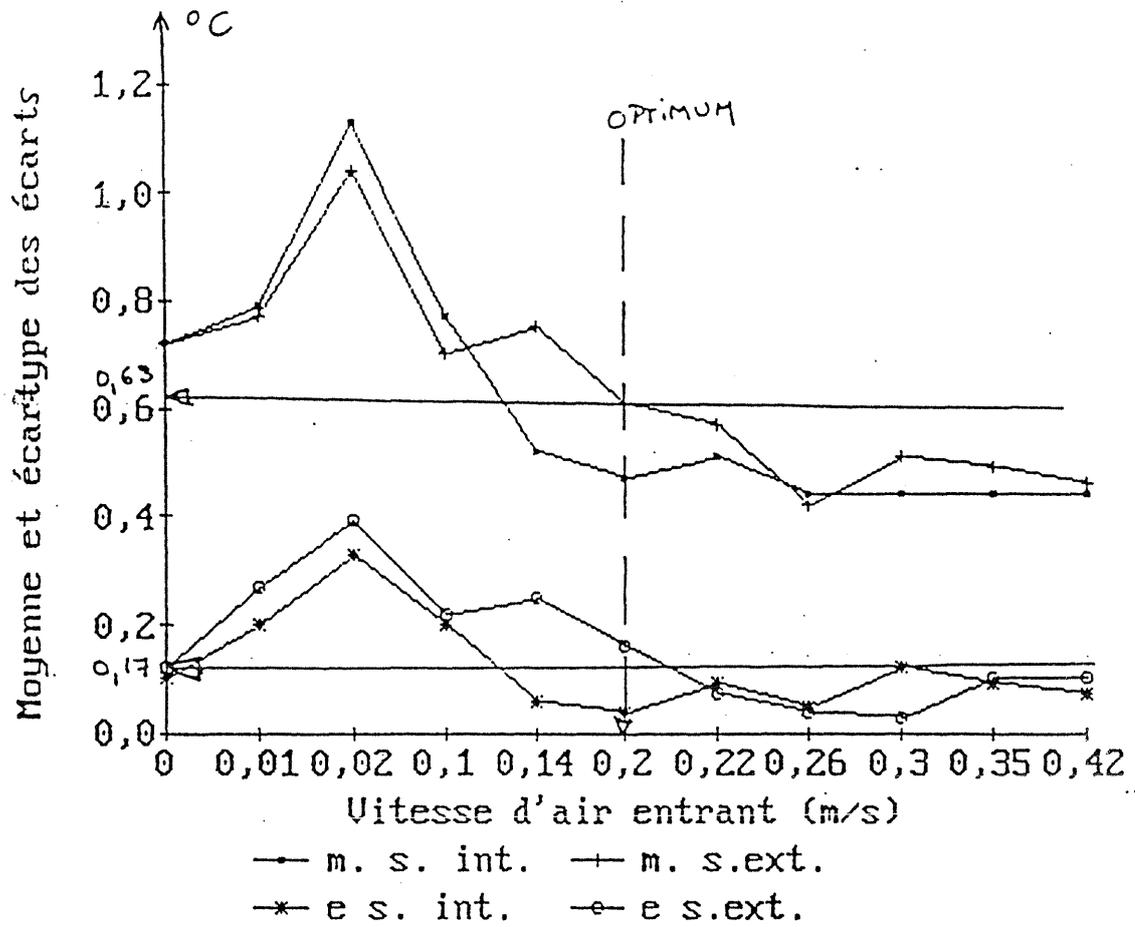


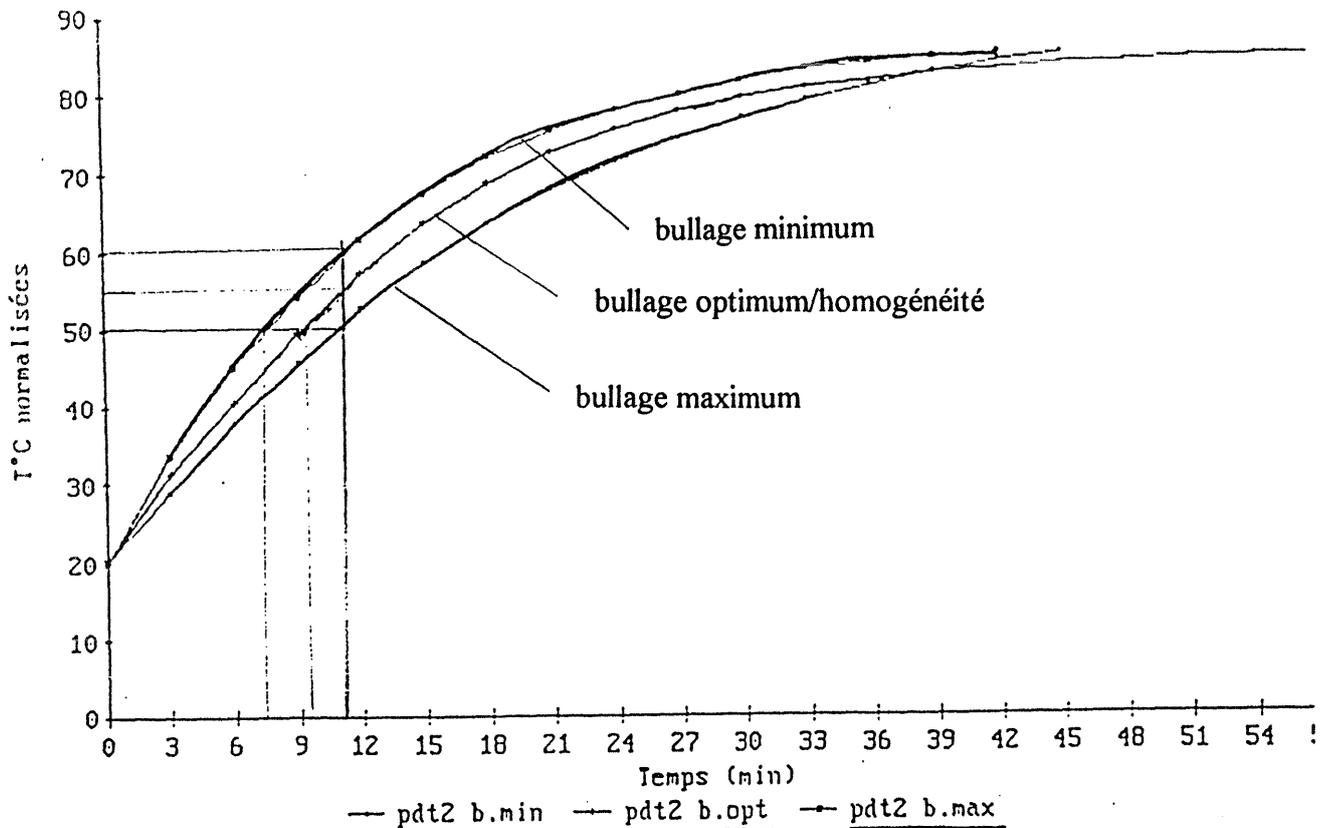
DIAGRAMME 6.7
MOYENNES ET ECARTS-TYPE DES ECARTS DE TEMPERATURE DU BAIN



6.5.2) INFLUENCE DU BULLAGE SUR LA CUISSON

Le diagramme 6.8 des températures normalisées indique clairement l'effet du bullage sur les montées en température du produit (pain de tylose d'épaisseur 2,5 cm) et donc sur la cuisson résultante.

DIAGRAMME 6.8
INFLUENCE DU BULLAGE SUR LES MONTEES EN TEMPERATURE



sans bullage	pour atteindre 50°C	il faut 11 minutes
avec bullage optimum	pour atteindre 50°C	il faut 9,5 minutes
avec bullage maximum	pour atteindre 50°C	il faut 7,4 minutes

Il y a une avance au début théorique de cuisson à cœur de 1,5 minute quand il y a bullage.

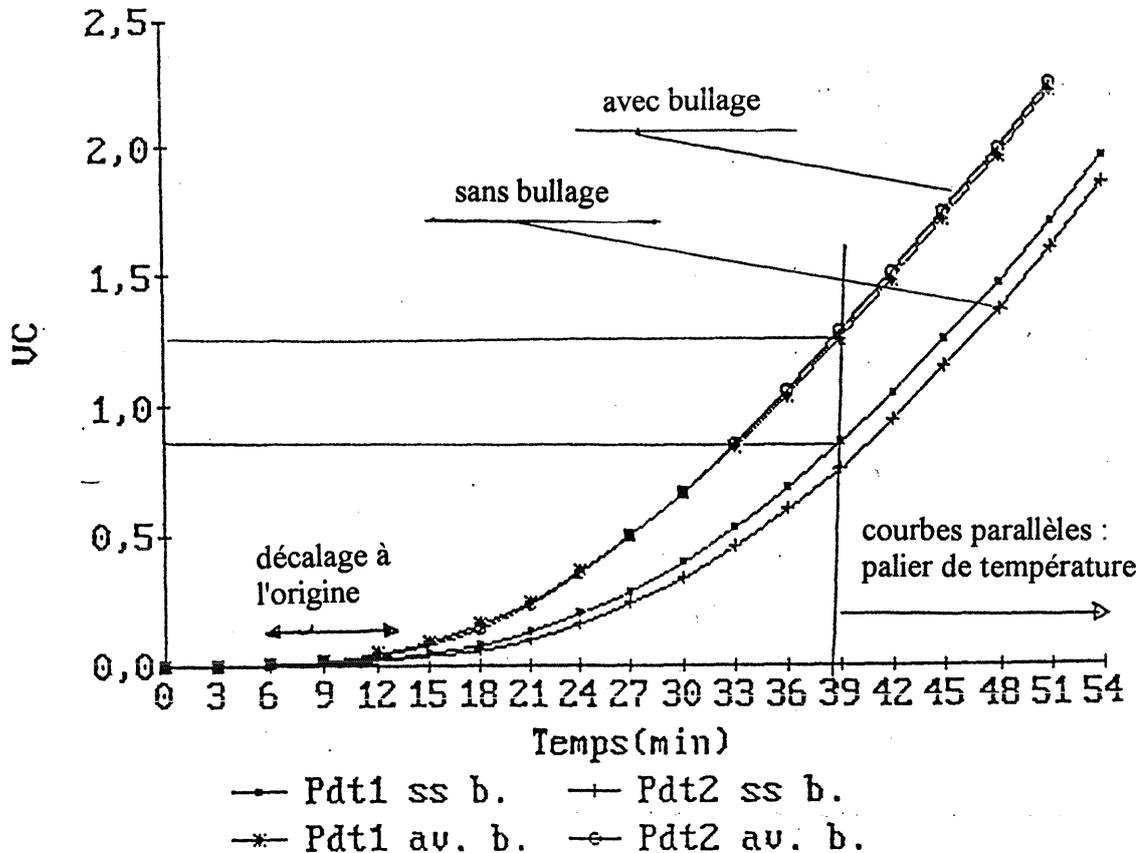
Ce résultat peut aussi s'exprimer par le fait qu'au bout d'un même temps de chauffage les températures atteintes sont plus élevées dans le produit traité avec bullage.

Ainsi, au bout de 11 minutes, la température du produit chauffé est :

sans bullage	50°C
avec bullage optimum	55°C
avec bullage maximum	60°C

Ces différentes températures enregistrées se traduisent par des différences de cuisson. Le diagramme 6.9, sur lequel sont reportées les valeurs cuisatrices obtenues avec et sans bullage, confirme les résultats précédents.

DIAGRAMME 6.9
EFFET DU BULLAGE SUR LES VALEURS CUISATRICES



Une analyse des phénomènes de transfert de chaleur nous conduit à déterminer que :

$$\frac{\text{Résistance de conduction (interne au produit)}}{\text{Résistance de convection (en surface)}} \simeq 7$$

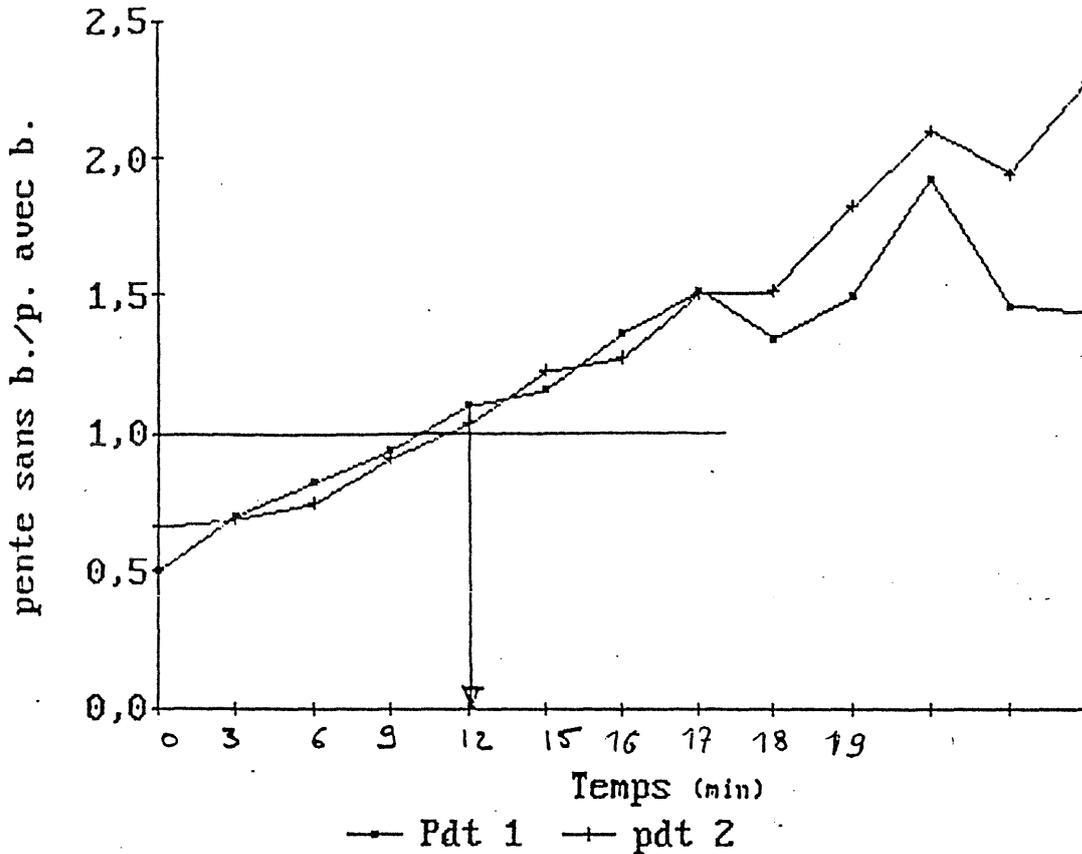
Le phénomène limitant est donc la conduction sur laquelle le bullage n'a aucun effet, ce phénomène sera d'autant plus important que l'épaisseur du produit sera importante. Le bullage aura d'autant moins d'effet que l'épaisseur du produit est importante.

On détermine d'autre part (moyennant quelques simplifications) que localement :

$$\frac{h \text{ sans bullage}}{h \text{ avec bullage}} = \frac{\text{pente locale sans bullage}}{\text{pente locale avec bullage}} \quad (\text{des courbes } VC = f(t) \text{ précédentes})$$

Les résultats figurant sur le diagramme 6.10 indiquent que, pendant les 12 premières minutes, le fait de mettre le bullage augmente considérablement le coefficient de transfert de chaleur en surface (de l'ordre de 30%). Ce qui confirme son efficacité. Mais, nous n'avons pas cherché à déterminer, par rapport à la rapidité de montée en température, d'optimum de bullage, car augmenter le débit de pompe à air au-delà du débit monté sur la machine conduirait à des aberrations techniques et économiques.

DIAGRAMME 6.10
EVOLUTION DES RAPPORTS DE PENTES CUISSON SANS OU AVEC BULLAGE



6.6) CONCLUSION

Comme espéré, le bullage associé à la disposition verticale des produits a bien un effet positif pour l'homogénéisation de la température en tout point du chargement. Les écarts de températures les plus importants constatés sur la verticale du brûleur ne dépassent guère le demi-degré.

Afin de limiter les pertes de chaleur dues au bullage, il conviendrait dans une machine industrielle d'utiliser le débit qui correspond à l'optimum pour l'homogénéité pour une hauteur d'eau de l'ordre de 1 mètre, ce débit est de $4,25 \text{ m}^3/\text{h}$ par m^2 de surface de base de la cuve.

L'optimum du bullage a été établi dans le cas du chauffage au gaz qui est celui qui présente le plus de facteurs de non-homogénéité, on peut donc penser très raisonnablement étendre ce résultat au cas du chauffage par résistances électriques. En effet, les résistances électriques étant disposées de façon régulière en fond de cuve, il y a beaucoup moins de risque de non-homogénéité.

Mais par contre, on retiendra qu'un chauffage au gaz, qui présente l'avantage d'être moins coûteux en fonctionnement qu'un chauffage électrique, n'en possède pas la souplesse de mise en oeuvre. Pour des cuissons courtes en particulier, les TIC classiques actuels sont très mal adaptés.

CHAPITRE 7

TESTS DE LA MACHINE AFREM AVEC LES PRODUITS EN POSITION HORIZONTALE

7.1) INTRODUCTION

Pendant toutes les manipulations avec les produits expérimentaux ou avec des produits alimentaires conditionnés en barquette, nous avons éprouvé des difficultés dans le chargement et le déchargement des produits.

- difficultés de clippage des grilles maintenant les produits.
- difficultés à charger les grilles verticalement.

De plus, les essais réalisés avec des produits fragiles tels que les filets de poisson ou les mousses de légumes ont révélé que les grilles de maintien marquent les produits, ce qui diminue la qualité d'aspect de ceux-ci.

Ces problèmes rendent la machine peu pratique et pénible d'emploi en site industriel.

L'avantage de la verticalité des grilles quant au bon transfert de chaleur et à l'homogénéité devient un motif de refus d'utilisation. Nous avons essayé de contourner le problème en envisageant d'abandonner la disposition verticale au profit d'un arrangement horizontal.

Cette disposition est de nature à s'opposer à la libre circulation de l'eau et des bulles d'air et donc pose le problème de l'homogénéité de température.

La libre circulation de l'eau et des bulles entre les produits est également affectée par l'encombrement donc la quantité des produits disposés dans la cuve.

Ceci explique l'étude de l'influence du bullage, de la position des plats cuisinés, du taux de remplissage de la cuve, sur la cinétique de cuisson de plats cuisinés

7.2) METHODE ET CONDITIONS EXPERIMENTALES.

7.2.1) METHODES

Dans les expérimentations précédentes, nous avons utilisé une démarche classique pour étudier le fonctionnement de la machine. Cette méthode classique nous a amené à établir les lois d'évolution paramètre par paramètre, ce qui présente deux inconvénients :

- de très nombreux essais sont nécessaires.
- on ne peut pas mettre en évidence d'interaction entre plusieurs paramètres.

Dans cette partie d'étude, nous avons utilisé la méthode des plans d'expériences*, c'est une méthode statistique d'étude de données ; elle a notamment l'avantage de diminuer les inconvénients cités ci-dessus.

* SADO G, SADO M.C, 1988. - *Les plans d'expérience*. Ed. Dunod

7.2.2) DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le matériel expérimental de base est constitué par la cuve AFREM équipée du chauffage par tube immergé compact et du système de bullage. Dans cette cuve, un cadre support a été aménagé pour permettre l'immersion des grilles chargées de produit dans une position proche de l'horizontale. Afin de favoriser la circulation de l'eau et des bulles entre les rangées de produit, on a disposé en quinconce deux rangées de grilles qui sont inclinées d'un angle de 3 à 5° par rapport à l'horizontale. (schéma 1).

Les conditions de travail sont les suivantes :

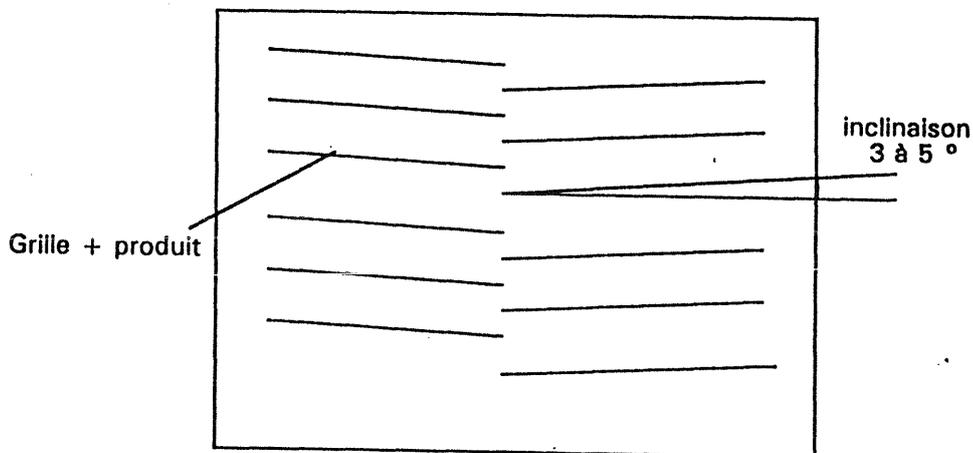
Volume de la cuve : $V_{\text{cuve}} = 0,677 \text{ m}^3$

Volume mort occupé par le dispositif de chauffage : $V_{\text{mort}} = 0,154 \text{ m}^3$

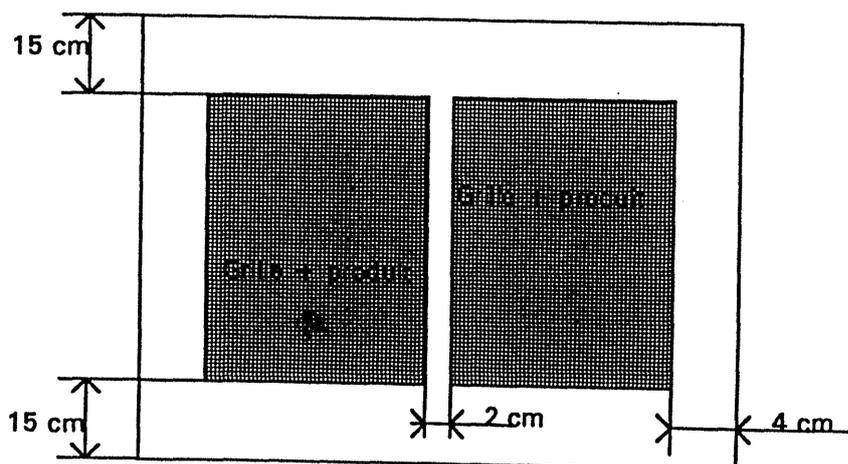
Volume utile de la cuve : $V_{\text{utile}} = V_{\text{cuve}} - V_{\text{mort}} = 0,523 \text{ m}^3$

Volume expérimental occupé par les grilles chargées = $0,319 \text{ m}^3$ (soit 61% du V_{utile})

Schéma 1



**REPLISSAGE EN POSITION HORIZONTALE
VUE DE COTE**



**REPLISSAGE EN POSITION HORIZONTALE
VUE DE DESSUS**

Deux types de grilles munies de produits ont été mises en place :

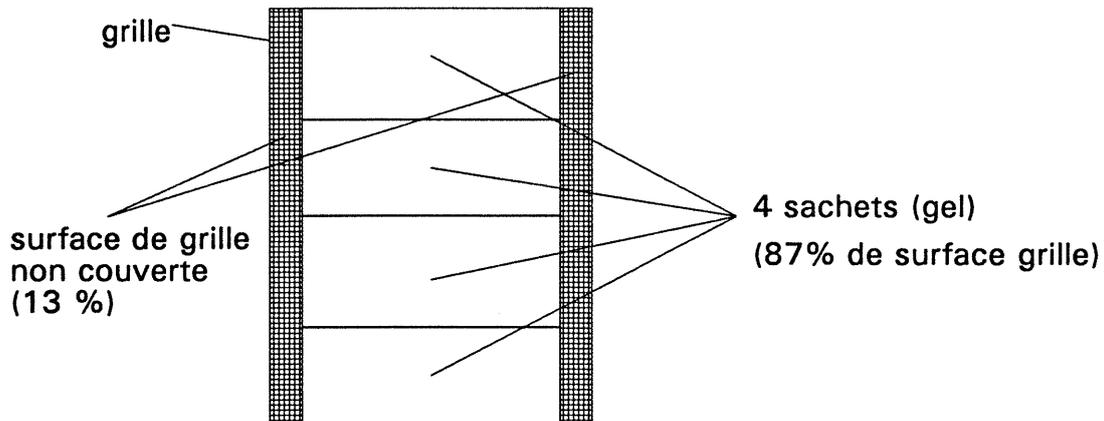
- * des grilles munies de sachets de gel liquide (succédané)
- * des grilles munies de pains de tylose (succédané de viande)

Caractéristique des grilles seules :

- * masse unitaire moyenne : 1,35 kg (acier inoxydable)
- * volume unitaire moyen : 0,171 ($\rho = 7950 \text{ kg/m}^3$)

Grilles équipées de sachets de gel :

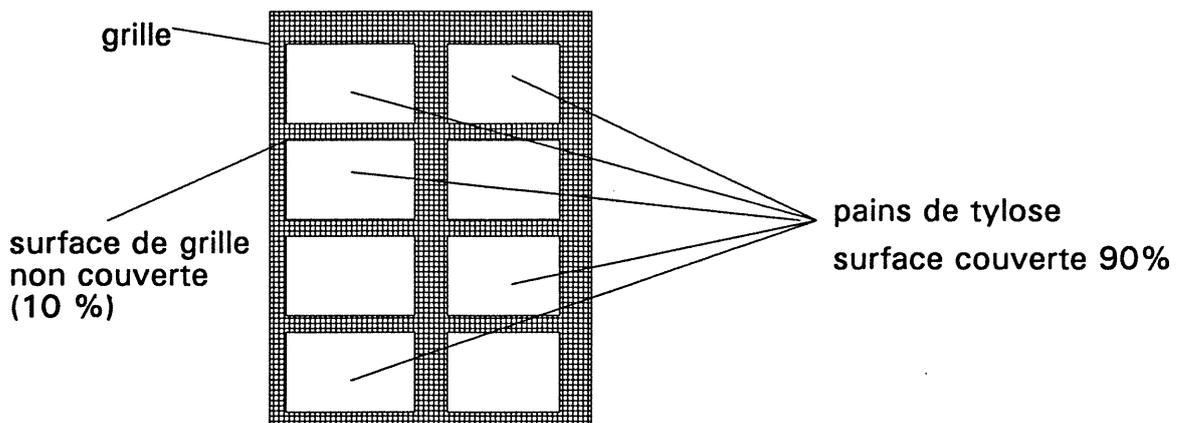
- * 4 sachets (masse moyenne des 4 sachets = 2,6 kg)
- * Taux d'occupation de la surface des grilles : 87 % environ = surface produits/surface grille
(cf schéma ci-après)



Grilles équipées de pains de tylose :

Trois grilles de ce type ont été utilisées pour chaque essai. Chacune d'entre elles comporte 8 pains de tylose. Un des pains (placé au centre de la grille) est instrumenté (thermocouple de type K placé au centre thermique du pain). Par ailleurs, la température du bain est relevée de part et d'autre de chaque pain instrumenté (à 2 cm environ du produit).

- * dimension moyenne d'un pain de tylose : $(10 \times 20 \times 2,5) \text{ cm}^3$
- * masse moyenne de 8 pains : 4,4 kg
- * taux d'occupation de la surface des grilles : 90 % = surface produits/surface grille
(cf schéma ci-après)



Les paramètres étudiés sont définis ci-dessous : à chaque valeur du paramètre est attaché une valeur appelée modalité ; c'est cette modalité qui est utilisée dans le traitement statistique des données.

Le paramètre de remplissage

$$Pr = \frac{\text{Masse de produit}}{\text{Masse d'eau utile dans la cuve}} \cdot 100 (\%)$$

La masse d'eau utile dans la cuve : 523 kg (ρ eau = 1000 kg/m³)

Paramètre de remplissage minimum (modalité -1) :

12 grilles de produit, soit au total 36,6 kg de produit
 masse de produit : masse tylose = 13,2 kg
 masse de gel = 23,4 kg

$$Pr \text{ mini} = \frac{36,6}{523} \cdot 100 = 7 \%$$

Paramètre de remplissage moyen (modalité 0) :

16 grilles de produit, soit 47 kg
 masse tylose = 3 x 4,4 kg = 13,2 kg
 masse de gel = 13 x 2,6 kg = 33,8 kg

$$Pr \text{ moyen} = \frac{47}{523} \cdot 100 = 9 \%$$

Paramètre de remplissage maximum (modalité +1) :

Le rapprochement des grilles est limité par la présence des poignées de manutention.

22 grilles de produit, soit 62,6 kg
 masse de produit : masse tylose = 3 x 4,4 kg = 13,2 kg
 masse de gel = 19 x 2,6 kg = 49,4 kg

$$Pr \text{ maxi} = \frac{62,6}{523} \cdot 100 = 12 \%$$

Le Paramètre de remplissage ainsi défini rend compte de manière objective du taux d'occupation de la zone utile de la cuve. En raisonnant en volume (hypothèse : tylose, gel et eau ont même masse volumique), on remarque que seulement 7 à 12 % du volume utile dans la cuve est occupé par les produits. Un tel ratio permet d'avoir autour des produits un stock d'eau chaude garantissant une bonne homogénéité de température de bain; mais une telle configuration nous écarte d'une utilisation industrielle où un taux de remplissage maximum est recherché.

L'intensité du bullage

débit volumique d'air : 5,03.10⁻³ m³ A.H/s modalité + 1
 débit volumique d'air : 2,5.10⁻³ m³ A.H/s modalité 0
 débit volumique d'air : 0.10⁻³ m³ A.H/ modalité -1 (pas de bullage)

N.B. : AH = Air Humide

La position des produits dans la cuve

Ce paramètre ne peut prendre que deux valeurs discrètes :

[horizontal] et [vertical]
 [vertical] : modalité + 1
 [horizontal] : modalité - 1
 impossible : modalité 0

7.2.3) MATERIEL DE MESURE ET METHODE D'EXPLOITATION

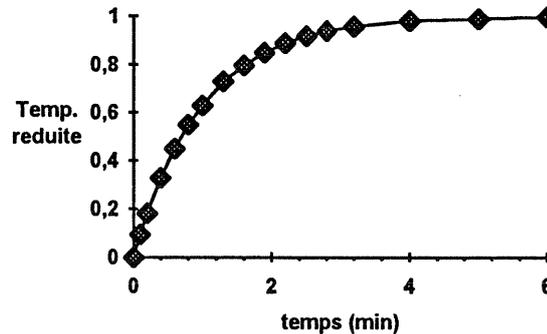
Afin de suivre les évolutions de température au cours de la cuisson, 10 thermocouples chromel-alumel ont été répartis de la manière suivante au sein de la cuve :

- 3 thermocouples sont installés au coeur de 3 pains de tylose répartis le plus judicieusement possible dans le volume expérimental (un au centre, un en bas et un en haut)
- 6 autres thermocouples mesurent la température de l'eau de part et d'autre de chaque pain instrumenté
- 1 thermocouple mesure la température dans le bain.

Les mesures obtenues permettent de visualiser l'évolution de la température au coeur des produits en traçant les courbes température = $f(\text{temps})$ et de quantifier la rapidité de montée en température.

Les enregistrements des températures normalisées sont ensuite consignés sur un graphe. Les thermogrammes ont une forme classique d'exponentielle amortie.

$$T(t) = T_0 + [T_1 - T_0] \cdot [1 - e^{-t/\tau}] \quad (\tau = \text{constante de temps du phénomène})$$



Pour chaque essai, nous retenons comme réponse au plan d'expérience le temps $t = \tau$ qui représente 63 % de l'écart $[T_1 - T_0]$ (en effet, $[1 - e^{-1}] = 0,63$); on notera cette réponse :

"temps de réponse à 63%"

Cette réponse est une valeur représentative de la cinétique de mise en température du produit. De plus, elle est mesurée sur une partie "discriminante" du thermogramme; en effet, relever le temps au bout duquel on atteint la température du bain serait beaucoup moins précis.

7.3) RESULTATS EXPERIMENTAUX ET ANALYSE STATISTIQUE

7.3.1) RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les modalités des expériences sont dictées par le plan d'expériences que nous avons choisi. Il s'agit d'un "plan factoriel linéaire complet" qui fait appel à un modèle linéaire. Ce plan dépend de 3 facteurs (bullage, position et taux de remplissage). Les différents essais qui devront être réalisés figurent dans la matrice ci-dessous :

facteur	modalité		
	-1	+1	0
bullage	sans	avec (maxi)	moyen
position	horizontale	verticale	/
Pr (paramètre de remplissage)	minimum	maximum	valeur moyenne

Les résultats figurent dans le tableau ci-dessous :

n°exp.	Paramètre d'entrée			Temps de réponse à 63 %(s)			
	Bullage	Position	Rempliss.	rép. n°1	rép.n°2	rép.n°3	temps de réponse moyen
1	-1	-1	-1	480	(810)	600	540
2	+1	-1	-1	430	(690)	480	455
3	-1	+1	-1	410	(490)	480	445
4	+1	+1	-1	400	(560)	440	420
5	-1	-1	+1	550	520	470	513
6	+1	-1	+1	410	465	(350)	437
7	-1	+1	+1	540	520	450	503
8	+1	+1	+1	480	480	450	470
9	0	-1	0	390	460	(340)	425
10	0	-1	0	420	490	(360)	455
11	0	+1	0	420	490	(390)	455
12	0	+1	0	410	480	(400)	445

N.B : Les valeurs entre parenthèses n'ont pas été utilisées pour le calcul de la réponse moyenne, elles résultent du mauvais positionnement des thermocouples et devaient donc être éliminées (voir annexe 6).

7.3.2) ANALYSE STATISTIQUE DES RESULTATS

Effets des différents paramètres

L'analyse des résultats est réalisée à l'aide du logiciel STATGRAPHICS (version 5.2). Elle donne les résultats suivants :

Facteur	Effet moyen du facteur
temps de réponse moyen	463,6 s
A : bullage	-54,7 s
B : position	-14,5 s
C : remplissage	15,7 s
AB	25,7 s
AC	0,25 s
BC	38,2 s

En première analyse, on voit que l'interaction bullage-position (A-C) a un effet limité sur le temps de réponse (en passant d'un remplissage minimum à maximal, le temps de réponse à 63% diminue de 0,25 s). Par contre, le bullage et l'interaction position remplissage (B-C) ont des effets assez forts. Le bullage réduit le temps de réponse (effet négatif de A); cela s'accroît en position horizontale (effet positif de AB : l'horizontalité ayant une modalité négative, un effet positif de l'interaction A-B correspond en fait à une réduction de la réponse de 25,7 s lorsque le bullage passe de la modalité -1/bullage nul à la modalité +1/bullage maximum).

Pour confirmer la validité de ces effets, nous avons besoin de savoir s'ils sont réellement significatifs. La technique statistique de l'analyse de la variance va nous permettre de discerner les effets et les interactions significatifs compte tenu des variations expérimentales observées sur les points centraux. Le logiciel édite pour cela la table d'analyse de la variance ou table d'ANOVA :

Table d'ANOVA :

Source	SCE	DDL	CME	Valeur de P
A : bullage	5995	1	5995	0,039
B : position	631	1	631	0,25
C : remplissage	496	1	496	0,29
AB	1326	1	1326	0,148
AC	0,12	1	0,12	0,98
BC	2926	1	2926	0,076
manque d'ajustement	3008	3	1002	0,21
Erreur pure	500	2	250	

Total	14883	11
-------	-------	----

$$R^2 = 0,76$$

Remarque :

SCE = somme des écarts quadratiques

DDL = nombre de degrés de liberté

CME = carré moyen de l'écart = SCE/DDL

Valeur de P = cf. ci-dessous

La dernière colonne de ce tableau représente le résultat de la **statistique de Fischer (valeur de P)**. Elle renseigne sur la significativité des effets des différents facteurs. On n'accepte que les effets pour lesquels la valeur de P est inférieure à la valeur de rejet que l'on s'est fixée (5%, 10% voire 15%).

On se fixe ici une significativité des effets de 15%, ce qui entraîne le rejet de B, C et AC. Ainsi, seuls les paramètres et les interactions suivants sont reconnus comme ayant un effet significatif sur le temps de réponse :

A : bullage

AB : interaction bullage-position,

BC : interaction position-remplissage

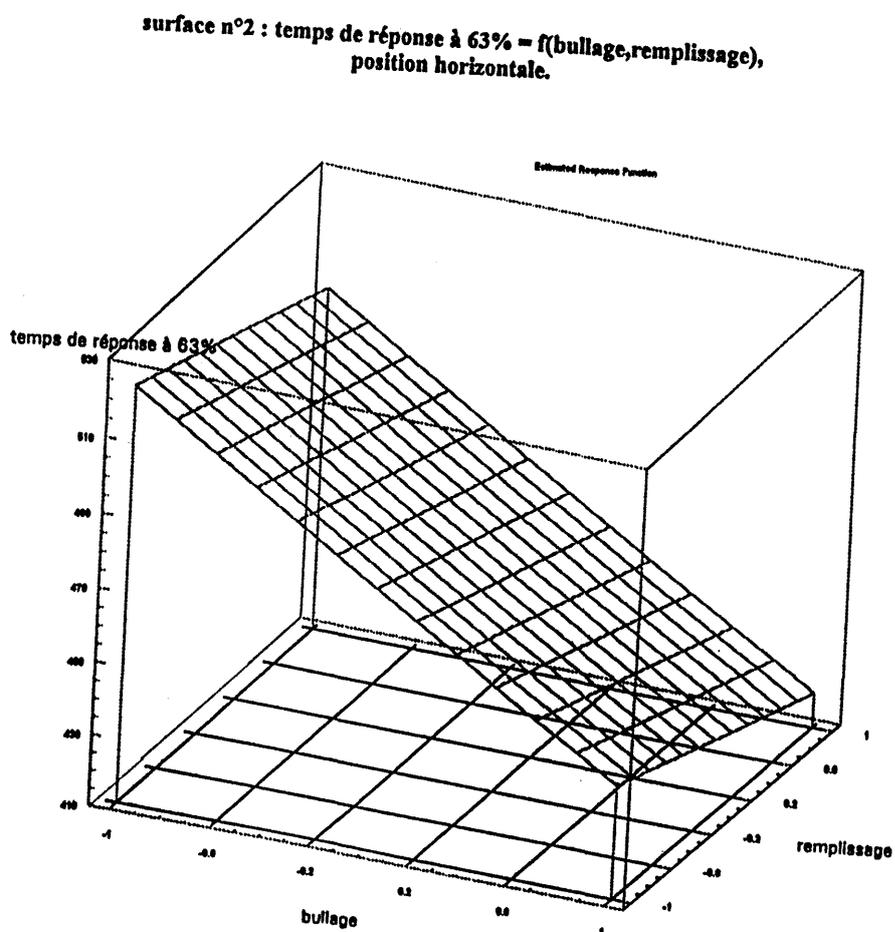
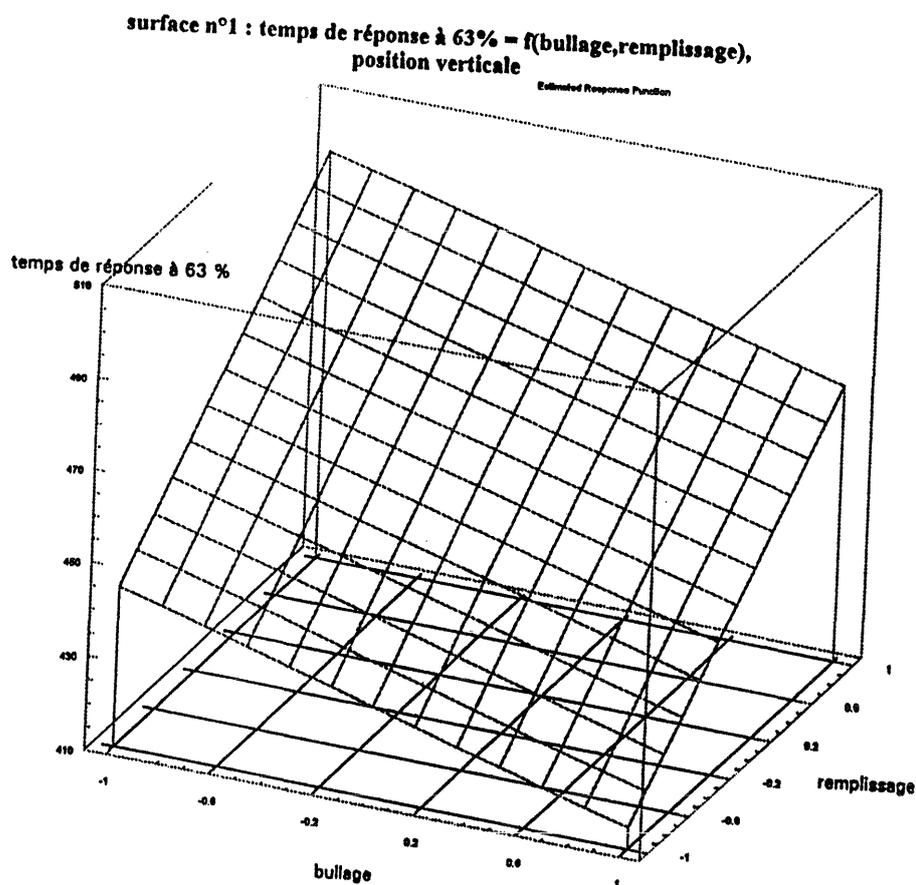
Les résultats figurant dans le tableau α permettent d'obtenir une représentation graphique.

Puisque l'une de nos variables (la position) est non continue et possède seulement deux modalités (verticale, +1, et horizontale, -1), nous obtenons deux surfaces de réponse (cf. pages suivantes). Ces surfaces de réponse ne sont pas très facilement interprétables en termes chiffrés. Par contre, elles renseignent sur l'allure de la réponse. Nous constatons que pour les deux surfaces, lorsque le bullage augmente, le temps de réponse diminue, ce qui était prévisible. Par contre, l'effet du paramètre de remplissage Pr est opposé entre la position verticale et horizontale (rappelons que l'on cherche à minimiser la réponse du plan d'expérience qui est le temps de réponse à 63%) :

- à la verticale, le temps de réponse augmente lorsque le remplissage augmente quel que soit le bullage.
- à l'horizontale, le temps de réponse diminue lorsque le remplissage augmente, ce, quel que soit le bullage.

Il est important de préciser que ces tendances ont été observées sur un intervalle réduit du paramètre de remplissage. On peut penser qu'en augmentant ou en réduisant le paramètre de remplissage, le sens des évolutions observé s'inverse.

En position verticale par exemple, une augmentation de Pr devrait vraisemblablement amener le temps de réponse à passer par un maximum puis décroître ; cela serait expliqué par un effet supérieur de l'agitation des bulles lorsque l'on rapproche les produits. Mais aucun élément ne nous permet de valider cette hypothèse.



7.4) CONCLUSION

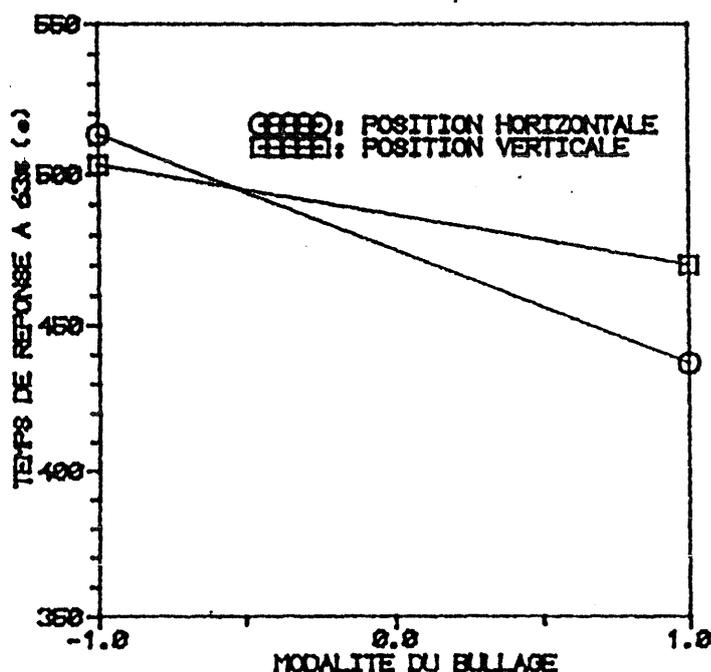
Les conclusions que nous pouvons tirer de ces expériences sont assez surprenantes, car elles obligent à revenir sur le principe même du système de fixation des produits. Elles sont les suivantes :

Le choix de la position horizontale associée à un bullage maximum permet de gagner 9 % (42 s.) en moyenne sur le temps de réponse à 63% par rapport à la position verticale (voir tableau p. 69). Ceci remet donc en cause le choix de disposition des grilles à la verticale, disposition qui a, de plus, de lourdes contraintes en matière de chargement des produits et de présentation finale.

Pour essayer de comprendre l'effet du bullage, on trace les courbes suivantes :

Temps de réponse à 63% = f(bullage)

Remplissage maximal (Pr = 1)



Cette courbe montre que :

- le bullage améliore les transferts thermiques lorsque les grilles sont disposées horizontalement dans la cuve,
- mais le bullage n'a quasiment aucun effet sur le temps de réponse en position verticale.

Lorsque les produits sont verticaux, ils ne sont pas suffisamment serrés, les bulles passent entre les produits sans diminuer la couche limite. Par contre, lorsque les produits sont horizontaux, les bulles ont un effet supérieur. Toutefois, cet effet n'agit que sur la face inférieure des produits.

On peut penser alors que l'effet des bulles en chargement vertical apparaîtrait si on pouvait accroître le paramètre de remplissage de la cuve. Le bullage devrait donc être efficace en position verticale à condition de rapprocher davantage les produits entre eux; l'intérêt de cette position serait que l'amélioration des transferts concernerait les deux faces du produit.

En position horizontale, un certain espace doit être laissé entre les produits pour la circulation des bulles et de l'eau de chauffage. Par ailleurs, une légère inclinaison ainsi qu'une disposition en quinconce (comme cela était le cas lors des essais) favorise l'homogénéité de la circulation des bulles et par là même l'effet recherché.

Pour conclure, on peut dire que le mode de chargement le plus avantageux est le chargement des grilles à l'horizontale (dans nos conditions de travail et dans la limite des paramètres de remplissage que nous avons exploré). Ceci remet en cause la conception initiale du système de chargement de la machine AFREM, mais est, somme toute, plutôt positif, puisque le dispositif de chargement vertical pose des problèmes d'utilisation pratique.

D'autre part, et dans la limite de validité de notre modèle et de nos conditions expérimentales (cf. 7.2.2), il semble que, quel que soit le degré de remplissage choisi, le bullage le plus intéressant soit le bullage maximal. Mais on doit rappeler que le bullage maximal a un coût énergétique en fonctionnement non négligeable.

On doit noter que l'homogénéité de la température du bain a été contrôlée lors des essais à l'aide des 6 thermocouples placés à proximité des produits. Les écarts n'excèdent pas +/- 2,5°C avec un bullage nul et +/- 1°C avec le bullage maximum.

<p>CHAPITRE 8</p> <p>CONSTITUTION ET FONCTIONNEMENT DE L'ENSEMBLE DE LA MACHINE</p>

8.1) CONSTITUTION DE LA MACHINE

Nous nous proposons ici de ne signaler que les points essentiels à retenir pour la construction d'une machine à notre sens idéale. Le dossier complet figure en annexe n° 7.

- Pour éviter la corrosion et pour répondre aux règles sanitaires, l'ensemble de la machine doit être réalisé en **acier inoxydable**. Les **cuves** devront être **isolées** sur toutes les faces et munies d'un couvercle avec joint d'étanchéité.

- La dimension des cuves et des dispositifs de chargement doit permettre d'utiliser les bacs, de **dimension** figurant dans les **gastronomes** utilisés dans les cuisines centrales. On peut retenir les deux dimensions de base :

(530 mm x 650 mm) et (325 mm x 530 mm)

- La machine, conçue avec une **disposition verticale** des grilles (bacs) de maintien des produits, doit permettre le **chargement en position horizontale**. Dans ce but, le chariot de chargement doit permettre une rotation de 90° de la charge avant sa saisie par le transbordeur. Cet aménagement vise à diminuer la pénibilité d'utilisation.

- La disposition des produits en position verticale doit ménager un espace suffisant entre chaque produit, minimum 2 cm, pour permettre une agitation correcte de l'eau.

Il est possible d'envisager un fonctionnement avec une disposition en **position horizontale**. Mais dans ce cas, on devra disposer les bacs et les produits afin d'éviter que chaque couche forme une barrière à la circulation de l'eau et des bulles d'air ; toute disposition trop compacte empêcherait l'obtention de l'homogénéité des températures. On devra utiliser des bacs à fond ajourés, placés en quinconce, légèrement inclinés ou toute autre disposition (fonction de la forme des produits) favorisant la circulation et l'agitation de l'eau. La mise en oeuvre d'une telle disposition devra s'accompagner de **contrôles préliminaires d'homogénéité des températures** obtenues.

- Pour obtenir un fonctionnement aisé et une homogénéité de température dans la cuve, le **taux de remplissage** ($\frac{\text{volume du produit}}{\text{volume de cuve}}$) à utiliser est de l'ordre de **15 %**.

Les dispositifs de chauffage à utiliser sont les suivants :

- **Chauffage Electrique** : dans ce cas, on aura soin de répartir les résistances de façon régulière en fond de cuve. La puissance à installer intervient surtout sur la durée de mise en température de la cuve, c'est cette considération qui peut en dicter le choix. Sinon on peut retenir qu'une puissance de 60 kW suffit à chauffer une cuve de 600 l.

- **Chauffage au gaz**

Son utilisation est envisageable si le tube immergé compact est capable de fonctionner à très bas régime en ne fournissant qu'une puissance très réduite, inférieure aux pertes ; soit environ 3 kW pour une cuve de 600 l.

- Chauffage mixte : gaz et TIC

Dans ce cas, le TIC est utilisé pour la mise en température de la cuve, sa puissance est essentiellement déterminée par la durée de cette mise en température. Une résistance électrique de 10 kW, répartie régulièrement en fond de cuve assure la régulation du chauffage au moment de l'immersion des produits.

- L'agitation de l'eau est assurée **par bullage**, celui-ci est obtenu par un râteau de distribution en tube d'acier inoxydable situé en fond de cuve. L'alimentation en air comprimé est assurée par un circuit propre à chaque cuve. Le débit optimum peut être calculé pour une cuve par rapport à sa surface de base d'une cuve en prenant $4,3 \text{ m}^3/\text{h}$ par m^2 de surface.

- Le suivi des températures des cuves chaudes et froides est assuré par une sonde de température dans chaque cuve. Ces sondes sont reliées à un enregistreur. De plus, la législation impose le contrôle du cycle de cuisson de chaque charge, on devra donc utiliser dans chaque charge un enregistreur électronique mobile.

8.2) FONCTIONNEMENT DE LA MACHINE

Tout comme pour la "Constitution de la machine" (§ 8.1), nous nous proposons de mentionner ici les points essentiels concernant le fonctionnement de la machine. Les informations complémentaires se trouvent en annexe n° 7 (Cahier des charges du cuiseur-refroidisseur, Automatisation de la machine cuisson sous vide AFREM).

L'automatisme de la machine assure les fonctions essentielles suivantes :

- gestion du convoyage des plats cuisinés (saisie, transfert aux différents postes).
- gestion du mode de marche.
- gestion des temps de cuisson et de refroidissement des plats cuisinés.

- Convoyage des plats cuisinés.

La manutention des cadres de plats cuisinés est assurée par un chariot transbordeur, situé sur un rail, au-dessus des cuves de cuisson et de refroidissement. Des moteurs électriques assurent les mouvements horizontaux et verticaux, la saisie des cadres est réalisée par un ensemble électropneumatique. Un ensemble de capteurs assure la détection des différentes positions du chariot transbordeur.

- Mode de marche.

Un fonctionnement totalement manuel de la machine est indispensable (mise en position initiale, suite d'arrêt d'urgence). L'ensemble des commandes sont rapportées sur un pupitre de commande. On veillera également à la prise en compte des sécurités de fonctionnement.

Le mode cycle par cycle réalise un seul cycle de chargement, de cuisson, de refroidissement et de déchargement du cadre de plats cuisinés en tenant compte des temps de cuisson et de refroidissement.

Le mode de fonctionnement continu permet d'effectuer les cycles chargement, cuisson, refroidissement et déchargement tant que l'utilisateur présente un chariot porte cadre des plats cuisinés à l'entrée de la machine.

Ce mode de fonctionnement serait intéressant pour l'intégration de la machine à une chaîne de fabrication.

- Temps de cuisson et de refroidissement des plats cuisinés.

Une autre fonction importante de l'automatisme est la gestion des temps de cuisson et de refroidissement des plats cuisinés. Il faut notamment prendre en compte les temps de transfert (déplacement du chariot transbordeur) durant lesquels la cuisson ou le refroidissement se poursuit.

CHAPITRE 9

ETUDE DE CUISSONS SOUS VIDE EN CYCLE COURT

Ce sont les restaurateurs qui ont inventé et utilisé la cuisson sous vide ; l'image "gastronomie et qualité" étant l'un des avantages procuré par cette technique.

Sa mise en oeuvre par les restaurateurs s'appuie sur un savoir-faire affirmé et des conditions d'utilisation très spécifiques (matières premières de très bonne qualité, délais de consommation courts). Dans ce cas, on cherche avant tout à obtenir les meilleures qualités gustatives et on préconise des cuissons à basse température, la notion de sécurité microbiologique passant au second plan.

Pour les industriels, la réalité est très différente :

- Ils maîtrisent mal la qualité de leur matière première, mais doivent fabriquer des produits qui possèdent à la fois les qualités organoleptiques et sanitaires permettant de satisfaire les consommateurs tout en assurant la rentabilisation des matériels. Il y a alors un compromis à trouver entre les qualités organoleptiques et microbiologiques.

Les essais menés en laboratoire ou avec notre machine expérimentale ont montré que les produits du type poisson sont quasiment les seuls susceptibles de s'accommoder d'une cuisson courte. A titre d'exemple, une pomme de terre nécessitera une durée de maintien à 90°C supérieure à une heure (cette durée augmente de façon considérable avec l'abaissement de la température) pour pouvoir être considérée comme cuite.

D'où les travaux effectués par le laboratoire de génie alimentaire d'IFREMER portant sur l'étude de la cuisson sous vide du poisson et dont l'extrait le plus significatif figure en annexe n° 8.

Les conclusions en sont les suivantes :

Les produits fabriqués par les industries alimentaires sont en majorité destinés à une consommation "grand public", ce qui implique des délais de conservation longs, en général supérieurs à 6 jours, et pouvant aller jusqu'à 42 jours sur dérogation ministérielle.

Actuellement cet aspect est primordial pour les transformateurs de poissons. En effet ceux-ci disposent généralement d'une matière première de qualité très inégale, pour des raisons tenant à la fois de la diversité biologique présentée par les poissons, et de la qualité du traitement du poisson après la capture.

Les industriels doivent donc pasteuriser leurs produits, pour en garantir la salubrité (absence de pathogénicité), et assurer à leur production un maintien satisfaisant de la qualité durant le délai de conservation choisi (absence d'altération).

Il est possible d'envisager l'optimisation des traitements thermiques industriels. Mais nos essais tendent à montrer une instabilité des filets de poissons cuits sous vide à basse température (+ 65°C), au cours du stockage au froid. Cela signifie que la baisse des températures de cuisson n'est pas encore possible. Celle-ci passe par une maîtrise de la qualité de la matière première, et par l'étude approfondie des facteurs d'instabilité des produits stockés au froid, à savoir :

- La thermorésistance des micro-organismes dans le produit, qui est pour le moment très mal connue.
- Les processus d'altération du produit, tant sur le plan microbien que sur le plan enzymatique.

- Le comportement des constituants du produit vis-à-vis du traitement thermique choisi.

Dans ce vaste champ d'exploration, la cuisson sous vide n'est qu'un "outil" parmi d'autres. Ce procédé a contribué à prouver que la notion d'optimisation des cuissons était concevable, mais elle n'en constitue pas la solution.

Cette étude est une approche du vaste problème que représente la cuisson, on peut "mettre en équation" et étudier objectivement un certain nombre de paramètres mais dans l'état actuel de nos connaissances cela ne remplace pas totalement le savoir-faire du cuisinier.

Conclusion

En matière de conclusion, on peut citer les résultats les plus significatifs concernant le fonctionnement de la machine et leurs conséquences pour la conception d'un cuiseur industriel.

La charge, dans une cuve de 750 l, constituée de sachets de succédané de produits alimentaires et de sachets de pains de tylose d'épaisseur 2,5 cm simulant la présence de barquettes de produits à cuire, peut atteindre au maximum 176 kg. Les essais effectués avec cette masse et notre dispositif de rangement et de transbordement ont posé des problèmes mécaniques de transfert. Les essais ont donc été réalisés pour des charges d'environ 100 kg.

Avec une telle charge, la disposition verticale des produits, associée au bullage, permet d'obtenir l'homogénéité de température du bain à $\pm 0,5$ °C.

Lors de l'immersion, les écarts de température du bain de 3°C entre le pourtour et le milieu de la charge disparaissent au bout de 4 minutes ; ils sont inexistantes avec une charge de 56 kg. Ces résultats obtenus avec un chauffage électrique de 126 kW sont reproduits avec le chauffage électrique de 72 kW et avec le chauffage au gaz de 56,7 kW.

De même que le bain, la température des produits est homogène lors de la cuisson.

La diminution de la puissance de chauffage jusqu'à 72 kW n'entraîne pas une modification sensible de la vitesse de montée en température des produits au moment de l'immersion d'une charge. Ce résultat est à prendre en compte pour la détermination de la puissance à installer dans une machine industrielle.

Le bullage se révèle un excellent moyen d'agitation mais consomme de l'énergie ; il peut engendrer une puissance de perte de 5 kW au cours d'une mise en température de cuve entre 15 et 85°C ; en conséquence on doit limiter le débit d'air utilisé à l'optimum permettant d'obtenir l'homogénéité, cet optimum est d'environ 4,25 m³/h par m² de surface de base de cuve.

Le chauffage électrique se révèle particulièrement souple d'emploi, par contre son utilisation en tant qu'énergie unique de chauffage peut se révéler très coûteuse. A l'inverse, le chauffage au gaz avec TIC est intrinsèquement beaucoup plus difficile à réguler ; avec les caractéristiques de notre appareillage, il ne peut être valablement utilisé que pour la mise en température de la cuve chaude. Ces considérations nous amènent à proposer, pour une machine industrielle, un système mixte constitué d'un chauffage au gaz couplé à un chauffage électrique de faible puissance assurant essentiellement l'apport de chaleur nécessaire à la régulation de température pendant la cuisson.

Le refroidissement à l'eau du réseau ne permet pas d'atteindre une température de 8°C à coeur des produits. De plus les durées nécessaires sont incompatibles avec un fonctionnement en cycle court. En conséquence les expérimentations ont montré qu'il faut utiliser un refroidissement à l'eau glacée, éventuellement précédé d'un refroidissement à l'eau de ville, pour limiter le traitement à 20 minutes. La circulation d'eau, obligatoire dans ce cas, suffit avec nos charges à homogénéiser la température du bain.

Etant donné que les utilisateurs potentiels du matériel utilisant des bacs et ustensiles de dimensions standard "gastronorme", la taille des cuves devra être revue pour pouvoir recevoir des bacs à ces dimensions.

Le chargement du cadre support directement en vertical est difficile. Pour le rendre plus pratique et alléger sa pénibilité, le chargement pourrait être réalisé en position horizontale, puis un basculement à 90° serait effectué avant la saisie et le transport par le transbordeur en position verticale.

Dans des conditions particulières (faible taux de remplissage, plateaux en quinconce, passages libres entre les produits), il est possible d'obtenir une bonne homogénéité de température dans une charge de produits, disposée en position horizontale.

Toutefois ce résultat ne doit pas faire l'objet d'une généralisation abusive, on ne doit pas oublier que c'est la circulation des bulles et de l'eau entre les produits qui assure l'homogénéité des températures.

Dans les limites exprimées ci-dessus, la machine AFREM 1C-1R 120 GIE possède les caractéristiques qui en font une machine nouvelle susceptible de répondre aux exigences de la cuisson sous vide.

Toutefois, les résultats exprimés ci-dessus ne peuvent suffire à la construction d'une machine opérationnelle. Pour ce faire on devra recourir aux données figurant dans le cahier des charges (annexe n° 7).