à Noni,

UNIVERSITÉ DES SC. ET TECH. DE LILLE 1
BIBLIOTHÈQUE UNIVERSITAIRE

THESE

présentée à

L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE FLANDRES ARTOIS

pour obtenir le titre de

DOCTEUR D'UNIVERSITÉ,
spécialité sciences de la vie et de la santé

par

Didier CARCANO

TEXTURE DU YAOURT BRASSÉ : CARACTÉRISATION ET INFLUENCE DE PARAMÈTRES BIO-TECHNOLOGIQUES

soutenue le 22 novembre 1988 devant le jury :

M. B. FOURNET	Université de Lille	Président
M. M. DESMAZEAUD	INRA, Jouy en josas	Rapporteur
M. B. LAUNAY	ENSIA, Massy	Rapporteur
M. G. NOVEL	Université de Caen	Examinateur
M. A. LOONES	SODIMA, CRIAG	Examinateur
Mme P. RAMOS	SODIMA, CRIAG	Invitée

AVANT-PROPOS

Les travaux présentés dans ce rapport ont été réalisés dans les laboratoires du Centre International de Recherches André GAILLARD du Groupe SODIMA, à Ivry s/Seine, dirigé par Mr. Alain LOONES.

SODIMA est une union de coopératives laitières commercialisant leurs produits sous les marques YOPLAIT et CANDIA. Elle a de plus, une importante activité de franchise internationale.

L'objet de ces travaux avait été décidé par la direction scientifique du groupe SODIMA dans le cadre d'un contrat de recherches associant le laboratoire de génétique microbienne de l'Université de Caen , dirigé par Mr. Le Professeur NOVEL, et le laboratoire de chimie biologique associé au CNRS, de l'Université de Lille, dirigé par Mrs. FOURNET et MONTREUIL.

Il avait pour but de comprendre, de maitriser et d'optimiser la texture des yaourts brassés fabriqués par les usines du groupe.

Dans le cadre de ce contrat, Mme BELAIDI, chercheur au laboratoire universitaire de Caen a travaillé sur la physiologie de la production d'exopolysaccharides chez des souches industrielles de Streptococcus thermophilus, Mr. DOCO, chercheur au laboratoire de Lille a étudié l'extraction , l'identification et la structure du polysaccharide synthétisé.

Notre travail sur la caractérisation et les effets biotechnologiques des facteurs de fabrication sur la texture du yaourt brassé a été plus appliqué et en confrontation constante avec la pratique industrielle.

Il a permis l'établissement d'une convention CIFRE signée avec l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie.

REMERCIEMENTS

Je voudrais remercier vivement Mr. Alain LOONES, Directeur du C.R.I.A.G, de m'avoir proposé ce travail pour lequel il a bien voulu m'accorder sa confiance.

Mr. FOURNET, Professeur de Biochimie à l'Université de LILLE, a accepté de présider mon jury de soutenance, qu'il trouve ici le témoignage de ma reconnaissance.

Mr. DESMAZEAUD, Directeur du laboratoire de Microbiologie Laitière du C.N.R.Z. de Jouy en Josas, a accepté dès l'origine d'en être le Conseiller Scientifique et Mr. LAUNAY, Professeur responsable de la chaire de Sciences des Aliments à l'E.N.S.I.A., a bien voulu discuter des problèmes rhéologiques au fur et à mesure de l'avancement des travaux ; ils ont aussi accepté de juger ce travail, je tiens à leur adresser tous mes remerciements.

Je voudrais remercier Mr. NOVEL, Professeur, Directeur du Laboratoire de Génétique Microbienne à l'Université de CAEN, d'avoir accepté de participer au Jury de soutenance.

Patricia RAMOS, Responsable de l'équipe Scientifique, m'a encouragé dès mon arrivée au C.R.I.A.G., elle a su m'aider par ses conseils amicaux et toujours justes, je voudrais lui témoigner reconnaissance et sympathie les plus sincères.

Je tiens aussi à remercier tous les membres du C.R.I.A.G. qui ont permis de près ou de loin la réalisation de ce travail, et plus particulièrement les stagiaires, Melle B. MARBOEUF et Mr. P. FALCONNIER pour leurs travaux de rhéologie, Melle N. MOREAU pour la partie évaluation sensorielle.

Messieurs AUDIER et MENU de la C.L.C.P. ont contribué à donner à ces travaux la dimension industrielle indispensable, qu'ils en soient ici remerciés.

Enfin, Marina BRIDDA a su faire preuve de patience et de savoir faire pour éditer et mettre en forme avec la plus grande gentillesse, ce document ; je lui en suis très reconnaissant.

Ce travail s'est nourri des réunions régulières entre les chercheurs de trois laboratoires, de discussions fréquentes avec des techniciens et ingénieurs des usines et des laboratoires de SODIMA, des conseils avisés de personnes travaillant à des disciplines très différentes.

Que tous ceux qui y ont contribué soient assurés de ma reconnaissance la plus sincère.

S O M M A I R E

4 à 12

Liste des abréviations et unités 13

Liste des tableaux 14 à 18

Liste des figures 19 à 23

INTRODUCTION 24 à 25

CHAPITRE I
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE 26 à 82

I.- LE YAOURT BRASSE, LES COMPOSANTS STRUCTURAUX RESPONSABLES DE LA TEXTURE 27

1.- INTRODUCTION : LE YAOURT BRASSE, PRODUIT LAITIER FRAIS 27

2.- LES BACTERIES LACTIQUES THERMOPHILES PRODUCTRICES DE MUCUS 29
2.1 Introduction 29
2.2 Production de mucus par Lactobacillus bulgaricus 30
2.3 Production de mucus par Streptococcus thermophilus 30
2.4 Répartition et structure spatiale des bactéries dans le yaourt 32

3.- LES MICELLES DE CASEINE DANS LE COAGULUM LACTIQUE 33
3.1 Structure des micelles 33
3.2 Charge, hydratation et stabilité des micelles 34
3.3 L'influence de la chaleur 34
3.4 L'acidification, la coagulation lactique 35
3.5 Structure du coagulum lactique à la fin de la fermentation 36

4.- LES AUTRES CONSTITUANTS DU YAOURT BRASSE 37
4.1 Les globules gras 37
4.2 La phase aqueuse 37

5.- CONCLUSION : STRUCTURE DU YAOURT BRASSE 39

II.- LA MESURE DE LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE 40

1.- NOTION DE TEXTURE 40

2.- LES MESURES EMPIRIQUES DE LA TEXTURE 41
2.1 Les mesures imitatives 42
2.2 Les mesures d'étalement 42
2.3 Les mesures de pénétration 43
2.4 Les mesures d'écoulement 44
2.5 Mesure d'une résistance au cisaillement 46
2.6 Conclusion 47

3.- LES PROPRIETES RHEOLOGIQUES DU YAOURT BRASSE 47
3.1 Les propriétés visqueuses 48
3.2 Les propriétés plastiques 49
3.3 Les propriétés élastiques 49
3.4 Les propriétés thixotropes 51
3.5 Conclusion 51

4.- L'EVALUATION SENSORIELLE DE LA TEXTURE 52
4.1 Les descripteurs 53
4.2 Le jury 55
4.3 L'épreuve 56
4.4 Conclusion 58

5.- LES RELATIONS ENTRE MESURES INSTRUMENTALES ET SENSORIELLES DE LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE 58
5.1 Perception non orale 59
5.2 Perception orale 60
5.3 Conclusion 62

III.- REVUE DES PARAMETRES DE FABRICATION QUI AFFECTENT LA STRUCTURE ET LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE 63

1.- INTRODUCTION : LE PROCEDE INDUSTRIEL DE FABRICATION DU YAOURT BRASSE 63

2.- LES MATIERES PREMIERES ET LEURS PREPARATIONS 64

2.1 La qualité du lait et de la base laitière 64

2.2 Mode d'enrichissement en matière sèche 65

2.3 L'homogénéisation 67

2.4 Le traitement thermique 68

2.5 Le refroidissement de la base laitière 69

3.- LA FERMENTATION EN CUVE 69

3.1 Influence du ferment 70

3.1.1 Propriétés texturantes de la souche utilisée 70

3.1.2 Traitements subis par les ferments 72

3.1.3 Conclusion 72

3.2 Influence des conditions de fermentation du levain 72

3.3 Influence de la fermentation du yaourt 73

3.3.1 Le taux d'ensemencement 73

3.3.2 L'aération de la base laitière 73

3.3.3 La température de fermentation 74

3.3.4 L'acidité finale du caillé lactique 75

4.- LES OPERATIONS TECHNOLOGIQUES POST-FERMENTATION 76

4.1 Le brassage du caillé 76

4.2 Le refroidissement du caillé 76

4.3 Les traitements de soutirage et de pompage 79

4.4 Les effets des tuyauteries , vannes et coudes 80

4.5 Les effets de conditionnement 80

4.6 Durée et température de stockage 80

4.7 Transport du yaourt brassé 80

IV.- CONCLUSION 81

CHAPITRE II
CARACTERISTIQUES RHEOLOGIQUES ET SENSORIELLES DE LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE

83 à 128

I.- INTRODUCTION 84

II.- MATERIELS ET METHODES 84

1.- ORIGINE DES YAOURTS BRASSES ANALYSES 84

2.- LE VISCOMETRE BROOKFIELD TYPE RVF 85
2.1 Principe d'utilisation de l'appareil 85
2.2 Répétabilité de la mesure 86

3.- LES MESURES RHEOLOGIQUES : LE RHEOMETRE CARRIMED 87
3.1 Présentation générale de l'appareil 87
3.2 Mise au point du protocole de mesure 88
3.2.1 Les paramètres instrumentaux 89
- plan d'expérience 89
- expérience complémentaire 91
- conclusion 91
3.2.2 Les paramètres produits 91
- étude de l'effet de bord 91
- étude du temps de séjour avant la mesure 92
- étude du mélange préalable du yaourt 92
- étude d'un yaourt à la pulpe de fruit 94

3.3 Le protocole de mesure rhéologique du yaourt brassé 94
3.4 Les grandeurs rhéologiques caractéristiques 94
3.4.1 Les grandeurs fondamentales 95
3.4.2 Le modèle rhéologique, description globale de l'écoulement du yaourt brassé 95
- choix du modele rhéologique 96
- étude détaillée de la courbe montante 96

3.5 La fiche d'identité rhéologique du yaourt brassé 97

3.6 La répétabilité du protocole de mesure 98

4.- L'EVALUATION SENSORIELLE DU YAOURT BRASSE 98

4.1 La fiche d'évaluation sensorielle de la texture 98
4.1.1 Méthodes de mise au point de la fiche 98
4.1.2 Choix des échelles 103
4.1.3 Version retenue de la fiche d'évaluation sensorielle de la texture du yaourt brassé 104

4.2 Le jury : instrument de mesure 104
4.2.1 Méthode d'approche de la répétabilité du jury 104
4.2.2 Apprentissage et Animation du jury 105
4.2.3 Caractérisation du jury 105

4.3 L'épreuve d'évaluation 105

4.4 Traitements statistiques des résultats de l'évaluation sensorielle 106

5.- LES METHODES STATISTICUES 106
5.1 Statistiques de base 106
5.2 L'analyse de variance et de la typologie des moyennes 106
5.3 La régression multiple 107
5.4 Méthodes d'analyse multidimentionnelle 108
5.4.1 L'analyse en composantes principales 109
5.4.2 L'analyse factorielle des correspondances 111

III. RESULTATS ET DISCUSSION 111

1.- CARACTERISATION DE LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE NATURE 111
1.1 Caractéristiques d'un lot de fabrication 111
1.2 Caractéristiques d'un ensemble de fabrication hebdomadaires de yaourt brassé nature 112
1.3 Discussion 112
1.3.1 Caractéristiques du yaourt brassé 112
- les grandeurs rhéologiques fondamentales 112
- modelisation du comportement rhéologique 113
- conclusion 114

1.3.2 Profil sensoriel du yaourt brassé 114
1.3.3 Variabilité de la texture du yaourt brassé 114

2.- RELATIONS ENTRE LES NOTES SENSORIELLES ET LES CARACTERISTIQUES INTRUMENTALES 115
2.1 Description du tableau de données utilisées 115
2.2 Résultats de l'analyse en correspondance principale 117
2.2.1 Description des axes 117
2.2.2 Relations entre variables 117
2.2.3 Variables isolées 118
2.2.4 Vérification 118
2.3 Résultats des régressions multiples 118
2.3.1 Observations préalables tirées de la matrice de corrélations 118
2.3.2 Etude de l'aspect épais 119
2.3.3 Etude de l'aspect filant 121
2.3.4 Etude de l'aspect lisse 122
2.3.5 Etude de l'aspect onctueux 122
2.4 Cas de la viscosité Brookfield 123
2.4.1 Relations avec les grandeurs rhéologiques 123
2.4.2 Relations avec les variables sensorielles 124

2.5 Conclusions 124

IV.- CONCLUSION : GRANDEURS RETENUES POUR CARACTERISER LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE 126

CHAPITRE III
ETUDE DE FACTEURS BIO-TECHNOLOGIQUES QUI INFLUENCENT LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE 129 à 178

I.- INTRODUCTION 130

II.- MATERIELS ET METHODES 131

1.- FERMENTS ET SOUCHES UTILISES 131
1.1 Définitions préalables 131
1.2 Ferments utilisés 132
1.3 Souches et clones utilisés 132

2.- METHODES GENERALES DE CULTURE DES SOUCHES ET DE FABRICATION DU YAOURT BRASSE 132
2.1 Cultures au stade laboratoire 132
2.2 Fabrication de yaourt à l'échelle laboratoire 133
2.3 Fabrication de yaourt à l'échelle pilote 134

3.- METHODES GENERALES DE CONTROLE MISES EN OEUVRE 135
3.1 Numération et contrôles microbiologiques 135
3.2 Contrôles physico-chimiques 135
3.3 Mesures rhéologiques 136
3.4 Evaluation sensorielle 136
3.5 Méthodes statistiques d'expérimentation et de traitement des résultats 136

III.- RESULTATS ET DISCUSSION 137

1.- QUANTIFICATION PRELIMINAIRE DE 7 FACTEURS VARIANT DE FACON SIMULTANEE ET INDEPENDANTE 137

2.- INFLUENCE DES MATIERES PREMIERES ET DE LEUR PREPARATION 140
2.1 Effet de l'extrait sec dégraissé 140
2.2 Effet du taux de saccharose 141
2.3 Effet du taux de matière grasse 142
2.4 Conclusion 143

3.- INFLUENCE DES CONDITIONS DE FERMENTATION 144

3.1 Mise en évidence de l'effet propre au ferment utilisé 144

3.2 Effet de la température 145

3.2.1 Variation de 39 à 43°C 146

3.2.2 Comparaison de fermentations à 30°C et 43°C 148

3.3 Effet de l'acidité au moment du décaillage 150

3.3.1 Observations industrielles préalables 150

3.3.2 Etude au laboratoire de l'influence de l'acidité de fin de fermentation 151

3.3.3 Discussion 153

3.4 Conclusion 153

4.- INFLUENCE DES OPERATIONS TECHNOLOGIQUES POST-FERMENTATION 155

4.1 Observation industrielle de la diminution de texture 155

4.2 Effet de la température en sortie du refroidisseur 156

4.3 Effet d'un stockage intermédiaire du yaourt brassé entre le refroidisseur et la machine de conditionnement 159

4.4 Evolution de la texture pendant le refroidissement et le stockage du yaourt brassé en conditions industrielles 162

4.5 Effet de la cinétique de refroidissement du yaourt brassé conditionné 164

4.6 Conclusion 166

5.- POUVOIR TEXTURANT DE STREPTOCOCCUS THERMOPHILUS CULTIVE SUR LAIT 167

5.1 Variations du pouvoir texturant selon les souches de Streptococcus thermophilus 167

5.2 Variabilité clonale de production du polysaccharide Streptococcus thermophilus et de son pouvoir texturant 168

5.3 Nature du pouvoir texturant, propriétés du polysaccharide synthétisé 170

5.4 Discussion 173

IV.- CONCLUSIONS 175

CHAPITRE IV
APPLICATION INDUSTRIELLE D'UN PROCEDE MODIFIE DE FABRICATION DE YAOURT BRASSE A TAUX DE MATIERE SECHE REDUIT 179 à 187

I.- INTRODUCTION 180

II.- MATERIELS ET METHODES 181

1.- MATIERES PREMIERES 181
2.- PROCEDE DE FABRICATION 181
3.- CONTROLES DES YAOURTS OBTENUS 182

III.- RESULTATS ET DISCUSSION 182

1.- ESSAIS AU STADE PILOTE 182
2.- ESSAIS INDUSTRIELS, COMPARAISON DU PROCEDE TEMOIN AVEC LE PROCEDE MODIFIE 184

IV.- CONCLUSION 187

CONCLUSION GENERALE 188 à 198

BIBLIOGRAPHIE 199 à 211

ANNEXES

LISTE DES ABREVIATIONS ET UNITES

A.C.P.	: Analyse en Composantes Principales.
A.F.C.	: Analyse Factorielle des Correspondances.
C	: Couple de rotation (N.m).
C.V.	: Coefficient de Variation.
cpoB	: "Centipoise Brookfield".
cm	: Centimètre.
°C	: Degré Celsius.
C.N.R.Z.	: Centre National de Recherches Zootechniques.
C.L.C.P.	: Coopérative Laitière Centrale de Paris.
COL	: Collant (texture collante perçue en bouche).
C.R.I.A.G.	: Centre de Recherche International André GAILLARD;
ddl	: Degré de liberté.
DLC	: Date limite de consommation.
E	: Module d'Young d'élasticité.
E.S.T.	: Extrait Sec Total (g/kg).
E.S.D.	: Extrait Sec Dégraissé (g/kg).
e.t.	: Ecart-type.
E.P.	: Equation en Puissance.
FIL	: Filante (texture filante perçue en pot).
g	: Gramme.
$\dot{\gamma}$	: Vitesse de cisaillement.
$\dot{\gamma}$ max	: Vitesse ma ximum de déformation.
η a	: Viscosité apparente.
η pl.	: Viscosité plastique.
H.B.	: HERSCHEL-BULKLEY (modèle d').
J + x	: Xième jour après la fabrication du jour J.
Jo	: Elasticité idéale.
K	: Coefficient de consistance.
Kg	: Kilogramme.
LIS	: Lisse (texture lisse perçue en pot).
M.G.	: Matière grasse.
ml	: Millitre.
mV	: Millivolt.
μ	: Micron.
mn	: Minute.
n	: Indice d'écoulement du yaourt brassé.
N.m	: Newton x mètre.
CU	: Vitesse angulaire de rotation.
%	: pourcentage.
Pa	: Pascal = 10^{-5} kg/cm^2.
rad. sec^{-1}	: Radian. seconde^{-1}.
s.	: Seconde.
s	: Ecart-type.
s*	: Ecart-type fusionné.
sm	: Ecart-type de mesure.
sp	: Ecart-type de procédé et de mesure (s total).
so	: Ecart-type de répétition au centre du domaine expérimental.
S.T	: Surface de thixotropie.
sr	: Ecart-type résiduel.
SEU	: Seuil d'écoulement.
τ	: Contrainte de cisaillement.
τ_o	: Seuil d'écoulement.
T°	: température.
T.E.B.	: Texture épaisse perçue en bouche.
T.E.P.	: Texture épaisse perçue en pot.
	: moyenne.

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : **PRESENTATION DE QUELQUES YAOURTS ET LAITS FERMENTES CONSOMMES DANS LE MONDE** 27 - 1
(d'après TAMIME et ROBINSON, 1984)

TABLEAU 2 : **NORMES EN VIGUEUR DANS DIFFERENTS PAYS CONCERNANT LES YAOURTS** 28 - 1
(d'après BALLONGUE, 1987)

TABLEAU 3 : **PRINCIPALES PROPRIETES DE S. THERMOPHILUS ET DE L. BULGARICUS** 29 - 1

TABLEAU 4 : **INFLUENCE DE LA TEMPERATURE DE CROISSANCE ET DE LA TEMPERATURE DE PHASE STATIONNAIRE SUR LA PRODUCTION DE POLYSACCAHRIDE PAR S. THERMOPHILUS SUR MILIEU SYNTHETIQUE** 31 - 1
(GANCEL, 1988)

TABLEAU 5 : **DISTRIBUTION DES PRINCIPALES MATIERES AZOTEES DU LAIT DE VACHE** 33 - 1
(ALAIS, 1984)

TABLEAU 6 : **PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES CASEINES** 33 - 1
(d'après LENOIR, 1985)

TABLEAU 7 : **ELEMENTS STRUCTURAUX PRESENTS DANS 1 ML DE YAOURT BRASSE** 39 - 1
(compilation des sources citées ci-dessus)

TABLEAU 8 : **COMPORTEMENTS RHEOLOGIQUES DU YAOURT BRASSE ET DE QUELQUES PRODUITS ALIMENTAIRES** 51 - 1

TABLEAU 9 : **CLASSIFICATION DES DIFFERENTES METHODES D'EVALUATION SENSORIELLE** 56 - 1
(SAUVAGEOT, 1982)

TABLEAU 10 : **LISTE DES FACTEURS DU PROCEDE DE FABRICATION POUVANT AFFECTER LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE** 63 - 2

TABLEAU 11 : **QUALITE DU LAIT ET CONSISTANCE DU YAOURT** 64 - 1
(d'après RASIC et KURMANN 1978, p.142)

TABLEAU 12 : **INFLUENCE DE LA TENEUR EN MATIERES GRASSES DU LAIT SUR LA CONSISTANCE ET LE GOUT DU YOGHOURT BRASSE** 64 - 1

TABLEAU 13 : **PRODUCTION DE POLYSACCHARIDE ET VISCOSITE DANS LE LAIT ECREME FERMENTE PAR DES SOUCHES FILANTES ET NON FILANTES DE LACTOBACILLUS BULGARICUS** 71 - 1
(d'après CERNING, 1986)

TABLEAU 14 : **PRODUCTION DE POLYSACCHARIDE ET VISCOSITE DANS LE LAIT ECREME FERMENTE PAR DES SOUCHES, "FILANTES ET NON FILANTES", DE SOUCHES DE S. THERMOPHILUS** 71 - 1
(d'après CERNING, 1988)

TABLEAU 15 : INFLUENCE DE LA TEMPERATURE D'INCUBATION SUR LA CONSISTANCE ET LE GOUT DU YAOURT BRASSE — 74 - 1

TABLEAU 16 : RESULTATS OBSERVES SUR DIFFERENTS LOTS DE YAOURT BRASSE EN FONCTION DE LA DIMINUTION DE LA TEMPERATURE DE FERMENTATION — 75 - 1

TABLEAU 17 : INFLUENCE DE LA VITESSE DE REFROIDISSEMENT SUR LA CONSISTANCE ET LE GOUT DU YOGHOURT BRASSE — 78 - 1

TABLEAU 18 : REDUCTION DE LA VISCOSITE DU YAOURT (%) AFFECTE PAR LA VITESSE DE ROTATION ET LA CONTRE PRESSION LORS DU POMPAGE (d'après STEENBERGEN 1971, a) — 79 - 1

TABLEAU 19 : DETERMINATION DE L'ERREUR DE MESURE DE VISCOSITE PAR LE VISCOSIMETRE BROOKFIELD — 86 - 1

TABLEAU 20 : DOMAINE DE VARIATION DES 5 FACTEURS INSTRUMENTAUX CHOISIS PREALABLEMENT A LA DETERMINATION DU PROTOCOLE DE MESURE EN ECOULEMENT DU YAOURT BRASSE — 89 - 1

TABLEAU 21 : INFLUENCE DU TEMPS DE SEJOUR A TEMPERATURE AMBIANTE (19°C) DU YAOURT BRASSE SUR LES TROIS GRANDEURS RHEOLOGIQUES FONDAMENTALES — 92 - 1

TABLEAU 22 : AJUSTEMENT COMPARE DU RHEOGRAMME DU YAOURT BRASSE PAR LES MODELES "HERSCHEL-BULKLEY" ET "CASSON" — 96 - 1

TABLEAU 23 : AJUSTEMENTS COMPARES PAR H.B. ET E.P. DE LA COURBE MONTANTE ALLER PARTIELLE DU RHEOGRAMME DU YAOURT BRASSE — 96 - 1

TABLEAU 24 : REPETABILITE DES GRANDEURS RHEOLOGIQUES DU YAOURT BRASSE MESUREES PAR LE RHEOMETRE CARRIMED — 98 - 1

TABLEAU 25 : CARACTERISATION DU JURY DU C.R.I. D'EVALUATION SENSORIELLE DE LA TEXTURE — 105 - 3

TABLEAU 26 : FICHE D'IDENTITE DE TEXTURE D'UNE FABRICATION INDUSTRIELLE DE YAOURT BRASSE — 111 - 1

TABLEAU 27 : FICHE D'IDENTITE DE TEXTURE DE 13 FABRICATIONS INDUSTRIELLES DE YAOURT BRASSE — 112 - 1

TABLEAU 28 : VARIABILITE INDUSTRIELLE DE LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE — 115 - 1

TABLEAU 29 : RAPPEL DES VARIABLES RETENUES POUR LES ETUDES DE CORRELATIONS — 116 - 1

TABLEAU 30 : REFERENCE DES YAOURTS ANALYSES POUR L'ETUDE DES CORRELATIONS — 116 - 1

TABLEAU 31 : MATRICE DES CORRELATIONS SIMPLES ENTRE VARIABLES INSTRUMENTALES ET VARIABLES RHEOLOGIQUES (avec r crit = 0.7) — 118 - 1

TABLEAU 32 :	RELATIONS ENTRE LES VARIABLES RHEOLOGIQUES DE VISCOSITE ET LES VARIABLES SENSORIELLES D'EPAISSEUR	119 - 1
TABLEAU 33 :	VARIABLES RHEOLOGIQUES EXPLICATIVES DE LA PERCEPTION DE L'ASPECT EPAIS EN POT	119 - 1
TABLEAU 34 :	VISCOSITE BROOKFIELD (cpoB) EN FONCTION DE L'INDICE D'ECOULEMENT (n) ET DE LA VISCOSITE PLASTIQUE DU (VPL) YAOURT BRASSE	123 - 1
TABLEAU 35 :	RELEVE MENSUEL (avril 1987 à mai 1988) DES MOYENNES ET DES ECARTS-TYPES DE "VISCOSITE BROOKFIELD" DES YAOURTS BRASSES NATURES FABRIQUES A LA C.L.P.	131 - 1
TABLEAU 36 :	QUANTIFICATION PRELIMINAIRE DE L'EFFET DE 7 FACTEURS DE VARIATIONS : DOMAINE EXPERIMENTAL	137 - 1
TABLEAU 37 :	QUANTIFICATION PRELIMINAIRE DE L'EFFET DES 7 FACTEURS DE VARIATION SUR L'ACIDITE DORNIC ET LA "VISCOSITE BROOKFIELD" DES YAOURTS OBTENUS (J + 15) MATRICE D'EXPERIENCES ET RESULTATS	138 - 1
TABLEAU 38 :	TEMPS DE FERMENTATION DU YAOURT BRASSE EN FONCTION DU TAUX DE SUCRE AJOUTE A LA BASE LAITIERE	141 - 1
TABLEAU 39 :	INFLUENCE DU TAUX DE SACCHAROSE SUR LES CARACTERISTIQUES DU YAOURT BRASSE MESUREES A J + 8	141 - 1
TABLEAU 40 :	ANALYSE DES EFFETS DU TAUX DE MATIERE GRASSE SUR LES CARACTERISTIQUES RHEOLOGIQUES DU YAOURT BRASSE	142
TABLEAU 41 :	SYSTEME D'EQUIVALENCE SIMPLIFIE ETABLI A PARTIR DES RESULTATS DES EFFETS DES MATIERES PREMIERES SUR LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE	143 - 1
TABLEAU 42 :	INFLUENCE DU FERMENT UTILISE SUR LA VISCOSITE BROOKFIELD (cpoB) LA TEXTURE EPAISSE, FILANTE ET L'ACIDITE DU YAOURT BRASSE NATURE APRES 15 JOURS DE FABRICATION EN CONDITIONS INDUSTRIELLES	145 - 1
TABLEAU 43 :	INFLUENCE DU FERMENT UTILISE SUR LA PERCEPTION EPAISSE ET FILANTE DE LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE	145 - 1
TABLEAU 44 :	EFFET DES TEMPERATURES DE FERMENTATION, STRUCTURE DES ESSAIS REALISES ET RESULTATS OBTENUS	146 - 1
TABLEAU 45 :	COMPARAISON DES CARACTERISTIQUES DE DEUX YAOURTS BRASSES (J + 7) FERMENTES A 2 TEMPERATURES DIFFERENTES	148 - 1
TABLEAU 46 :	ESTIMATION DE LA VISCOSITE BROOKFIELD AVANT ET APRES LISSAGE DE 2 YAOURTS FERMENTES A TEMPERATURE DIFFERENTE	149 - 1

TABLEAU 47 :	VISCOSITE BROOKFIELD ET ACIDITE DORNIC APRES 7 JOURS DE STOCKAGE DE YAOURTS BRASSES ARRETES A DIFFERENTES ACIDITES FINALES, LISSES ET CONDITIONNES A CHAUD	151 - 1
TABLEAU 48 :	EFFETS DU pH FINAL ET DE LA TEMPERATURE AU MOMENT DU LISSAGE SUR LA VISCOSITE BROOKFIELD DU YAOURT BRASSE	152 - 1
TABLEAU 49 :	EFFET DE CERTAINES CONDITIONS DE FERMENTATION SUR LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE	154 - 1
TABLEAU 50 :	NIVEAU DE PRELEVEMENT SUR L'INSTALLATION INDUSTRIELLE ET EVOLUTION DE LA VISCOSITE BROOKFIELD DU FAIT DES TRAITEMENTS TECHNOLOGIQUES POST-FERMENTATION	155 - 1
TABLEAU 51 :	EXPRESSION DES PERTES DE TEXTURE EN FONCTION DES TRAITEMENTS TECHNOLOGIQUES SUBIS PAR LE CAILLE LACTIQUE	156 - 1
TABLEAU 52 :	INFLUENCE DES TEMPERATURES EN SORTIE DU REFROIDISSEUR	157 - 1
TABLEAU 53 :	INFLUENCE DE LA TEMPERATURE DE SORTIE DU REFROIDISSEUR SUR LES CARACTERISTIQUES RHEOLOGIQUES ET L'ACIDITE DU YAOURT BRASSE NATURE	158 - 1
TABLEAU 54 :	EVALUATION SENSORIELLE DE 4 LOTS DE YAOURTS BRASSES OBTENUS SELON DIFFERENTES TEMPERATURES DE PASSAGE AU TRAVERS D'UN REFROIDISSEUR A PLAQUES	158 - 1
TABLEAU 55 :	EVOLUTION DU YAOURT BRASSE STOCKE A 20°C	160 - 1
TABLEAU 56 :	CARACTERISTIQUES COMPAREES DES 2 LOTS DE YAOURTS BRASSES	160 - 1
TABLEAU 57 :	EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES RHEOLOGIQUES DU YAOURT BRASSE APRES 5 H DE STOCKAGE A 20°C ET CONTROLE DU YAOURT 15 JOURS APRES LISSAGE	161 - 1
TABLEAU 58 :	COMPARAISON DE L'EVOLUTION DES DIFFERENTES GRANDEURS RHEOLOGIQUES PENDANT LE REFROIDISSEMENT ET LE STOCKAGE	162 - 1
TABLEAU 59 :	CARACTERISATION DE LA TEXTURE DE YAOURTS OBTENUS, APRES DIFFERENTES CINETIQUES DE REFROIDISSEMENT	165 - 1
TABLEAU 60 :	EFFETS DE CERTAINES OPERATIONS TECHNOLOGIQUES SUR LES CARACTERISTIQUES DE TEXTURE DU YAOURT BRASSE	166 - 1
TABLEAU 61 :	POUVOIR TEXTURANT COMPARE DE DIFFERENTES SOUCHES DE STREPTOCOCCUS THERMOPHILUS	168 - 1

TABLEAU 61 bis :	CARACTERISTIQUES DES CULTURES FERMENTES A L'AIDE DES CLONES S. THERMOPHILUS 14 ET 17, EN ASSOCIATION OU NON AVEC L. BULGARICUS P	170 - 1
TABLEAU 62 :	VISCOSITE SPECIFIQUE DU POLYSACCHARIDE ISOLE DE LAIT FERMENTE PAR UN S. THERMOPHILUS S3	172 - 1
TABLEAU 63 :	COMPARAISON RELATIVE DES VARIATIONS DE "VISCOSITE BROOKFIELD" SELON LA MODIFICATION APPORTEE AU PROCEDE DE FABRICATION DU YAOURT BRASSE	175 - 1
TABLEAU 64 :	SCHEMATISATION DES EFFETS DE L'AUGMENTATION DES TAUX DE MATIERES PREMIERES, DES PARAMETRES DE FERMENTATION ET DE TRAITEMENTS TECHNOLOGIQUES SUR CHACUNE DES COMPOSANTES DE LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE	177 - 1
TABLEAU 65 :	PRESENTATION SCHEMATIQUE DES VARIATIONS DE VISCOSITE BROOKFIELD ATTENDUES PAR LA MODIFICATION DES FACTEURS DE FABRICATION	181 - 1
TABLEAU 66 :	CARACTERISTIQUES DES YAOURTS BRASSES NATURES FABRIQUES A L'ECHELLE PILOTE SELON LE PROCEDE MODIFIE A TAUX DE POUDRE REDUIT (moyenne 2 essais) ET SELON LE PROCEDE TEMOIN A TAUX DE POUDRE STANDARD (moyenne de 2 essais)	182 - 1
TABLEAU 67 :	CARACTERISTIQUES DES YAOURTS BRASSES NATURES FABRIQUES A L'ECHELLE PILOTE SELON LE PROCEDE MODIFIE A TAUX DE POUDRE REDUIT ET SELON LE PROCEDE TEMOIN A MEME TAUX DE POUDRE	183 - 1
TABLEAU 68 :	CARACTERISTIQUES A J + 15 DES YAOURTS BRASSES A LA PULPE DE FRAISE FABRIQUES A LA C.L.C.P. SELON LE PROCEDE MODIFIE A 4 % DE POUDRE EN COMPARAISON AVEC LE PROCEDE TEMOIN A 5 % DE POUDRE	185 - 1
TABLEAU 69 :	CARACTERISTIQUES MOYENNES DES LOTS DE YAOURT BRASSE NATURE - "MARQUE YOPLAIT" ANALYSES	193 - 1
TABLEAU 70 :	CLASSEMENT DES FACTEURS DU PROCEDE DE FABRICATION DU YAOURT BRASSE D'APRES LEUR EFFET SUR LE COEFFICIENT DE CONSISTANCE D'UNE PART, ET SUR L'INDICE D'ECOULEMENT D'AUTRE PART	194 - 1

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : **SCHEMA DE L'EDIFICATION DES MICELLES** (d'après ALAIS, 1984) 33 - 1

FIGURE 2 : **MODELE DE SUBMICELLES (A) ET DE MICELLES (B) DE CASEINE**
Selon SCHMIDT (1982) 34 - 1

FIGURE 3 : **SCHEMA DE PONTAGE DE DEUX SUBMICELLES PAR LE PHOSPHATE DE CALCIUM**
(d'après SCHMIDT, 1982) 34 - 1

FIGURE 4 : **MODELE D'UNE MICELLE DE CASEINE AVEC "CHEVELU EXTERNE"**
(d'après WALSTRA et TENNESS, 1984) 34 - 1

FIGURE 5 : **EFFET DU pH SUR LE RAPPORT CALCIUM/CASEINE ET LE CONTENU EN PHOSPHATE DE CALCIUM COLLOIDAL DU LAIT** 35 - 1

FIGURE 6 : **REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA FORMATION DE LA STRUCTURE DANS UN GEL LACTIQUE ACIDE**
(d'après HEETJE et coll., 1985) 35 - 1

FIGURE 7 : **STRUCTURE EN MICROSCOPIE ELECTRONIQUE DE YAOURT MONTRANT LES AGREGATS DE CASEINES (CA) ET LES PARTICULES DE CASEINE (CP)** 36 - 1

FIGURE 8 : **STRUCTURE D'UN GLOBULE GRAS, COMPOSITION ET REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE L'EFFET DE L'HOMOGENEISATION SUR LA TAILLE**
(d'après WALSTRA et JENESS, 1984) 37 - 1

FIGURE 9 : **LA DISTRIBUTION DU PHOSPHORE ET DU CALCIUM DANS LE LAIT DE VACHE** 38 - 1

FIGURE 10 : **SCHEMA DE L'APPAREIL D'ETALEMENT** (CENCO) 42 - 1

FIGURE 11 : **UN EXEMPLE DE PENETROMETRE UTILISE POUR MESURER LA TEXTURE DU YAOURT** 42 - 1

FIGURE 12 : **PRESENTATION ET DIMENSIONS DE L'ENTONNOIR DE POSTHUMUS** 44 - 1

FIGURE 13 : **NOUVEL APPAREIL DE HELLINGA et coll. (1984) PERMETTANT D'APPROCHER LES CONTRAINTES SUBIES PAR LE YAOURT LORS DE SA CONSOMMATION** 45 - 1

FIGURE 14 : **VISCOSITE APPARENTE EN FONCTION DE LA CONTRAINTE DE TROIS YOGHURTS BRASSES A, B, C** (d'après HELLINGA, 1986) 48 - 1

FIGURE 15 : **SCHEMA DE PRODUCTION DU YAOURT BRASSE** modifié par TAMIME et ROBINSON, 1984. 63 - 1

FIGURE 16 : **RELATIONS ENTRE LE TAUX DE PROTEINES ET LA CONSISTANCE DU YAOURT PENDANT L'ANNEE** (d'après GENNIP, 1973, 1981 a, b) 64 - 1

FIGURE 17 : **VISCOSITE DE YAOURTS BRASSES FABRIQUES A PARTIR DE LAIT CONCENTRE OU ENRICHI SELON DIFFERENTES METHODES** (d'après ABRAHAMSEN et HOLMEN, 1980) 66 - 1

FIGURE 18 : **CONSISTANCE JUGEE PAR EVALUATION SENSORIELLE DE YAOURTS BRASSES OBTENUS SELON DIFFERENTES METHODES** (d'après ABRAHAMSEN et HOLMEN, 1980) 66 - 1

FIGURE 19 : **EFFET DE L'HOMOGENEISATION ET DU TRAITEMENT THERMIQUE SUR LA CONSISTANCE ET LA VISCOSITE DU YAOURT** (d'après GALESCOOT, 1978) 67 - 1

FIGURE 20 : **EFFET DE LA PRESSION D'HOMOGENEISATION SUR LA VISCOSITE DU LAIT FERMENTE** (d'après STORGARDS, 1964 et TAMIME et ROBINSON, 1984) 67 - 1

FIGURE 21 : **CONSISTANCE DU YAOURT EN FONCTION DES TEMPERATURES DE PASTEURISATION, TEMPS EGAL A 30 MINUTES** (d'après STORGARDS, 1964) 68 - 1

FIGURE 22 : **INFLUENCE DE DIFFERENTES TEMPERATURES D'INCUBATION SUR LA PRODUCTION D'ACIDE DANS LE YAOURT** (INOCULUM 3 % - TEMPERATURE OF INCUBATION 25°C ; 30°C ; 35°C ; 43°C) (d'après KURMANN, 1972, 1972 a) 74 - 1

FIGURE 23 : **SUCCESSION DES OPERATIONS TECHNOLOGIQUES DE LA TROISIEME PHASE DE FABRICATION DU YAOURT BRASSE** 76 - 1

FIGURE 24 : **CUVE DE YAOURT BRASSE PERMETTANT LE REFROIDISSEMENT EN CUVE, SIMULTANEMENT AU BRASSAGE ASSURE PAR DE LARGES PALES A VITESSE DE ROTATION CALCULEES POUR MINIMISER LE CISAILLEMENT DU CAILLE** (d'après FULLER, 1979) 77 - 1

FIGURE 25 : **PASSAGE DU YAOURT BRASSE A TRAVERS DEUX TYPES D'ECHANGEUR-REFROIDISSEUR : TUBULAIRE (TUBULAR COOLER) ET A PLAQUES (PLATE COOLER)** (d'après TAMIME et GREIG, 1979) 77 - 1

FIGURE 26 : **DIFFERENTES PHASES DE REFROIDISSEMENT DU YAOURT APRES INCUBATION** (d'après KURMANN, 1967) 78 - 1

FIGURE 26 bis : **REDUCTION DE LA VISCOSITE DU YOGHURT SOUS L'EFFET DU POMPAGE** (d'après STEENBERGEN, 1971) 79 - 1

FIGURE 27 : **REDUCTION DE VISCOSITE DU YAOURT RESULTANT DU TRANSPORT A TRAVERS LES TUYAUTERIES** (d'après STEENBERGEN, 1971) 80 - 1

FIGURE 28 : **VISCOSIMETRE BROOKFIELD** Type RVT 86 - 1

FIGURE 29 : **PRESENTATION GENERALE DU RHEOMETRE CARRIMED ASSERVI AU MICROORDINATEUR** 87 - 1

FIGURE 29 bis : **GEOMETRIE DE MESURE DU RHEOMETRE CARRIMED CS 50** 87 - 1

FIGURE 30 : **SCHEMATISATION DES DIFFERENTES SITUATIONS DE MISE EN PLACE DU YAOURT ENTRE LE CONE ET LE PLATEAU** 91 - 1

FIGURE 31 : **HETEROGENEITE EN POT ET EFFET DU MELANGE PRECONISE SUR DIFFERENTES CARACTERISTIQUES DU YAOURT BRASSE NATURE** 93 - 1

FIGURE 32 : **EXEMPLE DE RHEOGRAMME OBTENU SUR UN YAOURT BRASSE NATURE**
(fabrication SODIMA -CLCP) 94 - 1

FIGURE 33 : **FICHE D'IDENTITE RHEOLOGIQUE DU YAOURT BRASSE** 97 - 1

FIGURE 34 : **LISTE DES TERMES SUSCEPTIBLES DE DECRIRE LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE ET EPREUVE PROPOSEE** 99 - 1

FIGURE 35 : **REPRESENTATION PAR AFC DE LA PROXIMITE DES DESCRIPTEURS DE LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE** 101 - 1

FIGURE 36 : **DIVERSES DEFINITIONS DE L'ONCTUEUX PROPOSEES PAR LES DEGUSTATEURS** 103 - 1

FIGURE 37 (A)et(B) : **FICHE D'EVALUATION SENSORIELLE DE LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE** 105 - 1
105 - 2

FIGURE 38 : **LOCAL D'EVALUATION SENSORIELLE DU YAOURT BRASSE** 105 - 3

FIGURE 39 : **NOTION DE THIXOTROPIE DU YAOURT BRASSE NATURE** 113 - 1

FIGURE 40 : **ETUDE DE RELATION ENTRE VARIABLES SENSORIELLES ET INSTRUMENTALES DESCRIPTIVES DE LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE**
Représentation par l'ACP. 117 - 1

FIGURE 41 : **RELATION ENTRE L'ASPECT EPAIS EN POT ET LE COEFFICIENT K** 120 - 1

FIGURE 42 : **RELATION ENTRE L'ASPECT FILANT EN POT ET L'INDICE n** 121 - 1

FIGURE 43 : **EXPLICATION SCHEMATIQUE DES EVOLUTIONS SIMULTANEES CONSTATEES DE K ET n SUR LES YAOURTS BRASSES ANALYSES** 122 - 1

FIGURE 44 : **RELEVE MENSUEL (avril 1987 à mai 1988) DES MOYENNES ET DES ECARTS-TYPES DE "VISCOSITE BROOKFIELD" DES YAOURTS BRASSES NATURES FABRIQUES A LA C.L.C.P.** 131 - 1

FIGURE 45 : PROPRIETES FERMENTAIRES DES FERMENTS SODIMA 3C, 12M, KA68 132 - 1

FIGURE 46 : FERMENTEUR SETRIC 134 - 1

FIGURE 47 : VARIATIONS LINAIRES DE "VISCOSITE BROOKFIELD", DU SEUIL D'ECOULEMENT, DU COEFFICIENT K ET DE L'INDICE n DU YAOURT BRASSE EN FONCTION DU TAUX D'E.S.D. OBTENU PAR AJOUT DE POUDRE DE LAIT ECREME 140 - 1

FIGURE 48 : INFLUENCE DU TAUX DE SACCHAROSE SUR LE SEUIL D'ECOULEMENT, LA SURFACE DE THIXOTROPIE, LA TEXTURE EPAISSE PERCUE EN POT ET EN BOUCHE DU YAOURT BRASSE 141 - 3

FIGURE 49 : COMPARAISON DE DEUX RHEOGRAMMES DE YAOURT BRASSE DONT LES TAUX DE SUCRE VALENT RESPECTIVEMENT 4,5 % (S501) ET 8,2 % (S100) 141 - 2

FIGURE 50 : PROCEDE MIS EN OEUVRE DANS L'ATELIER MOLIERE DE LA C.L.C.P AFIN D'ETABLIR L'EFFET DU FERMENT SUR LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE 144 - 1

FIGURE 51 : RHEOGRAMMES COMPARES DE 2 YAOURTS DONT LA TEMPERATURE DE CULTURE VAUT RESPECTIVEMENT 39°C (YE11) ET 43°C (YE21). 147 - 1

FIGURE 52 : RHEOGRAMMES COMPARES D'UN YAOURT FERMENTE A 30°C (30L) ET D'UN YAOURT FERMENTE A 43°C (431L et 432L) 149 - 1

FIGURE 53 : RELATION ENTRE LA "VISCOSITE BROOKFIELD" ET L'ACIDITE DORNIC DE YAOURTS BRASSES NATURE FABRIQUES A LA C.L.C.P. EN JANVIER ET FEVRIER 1987 150 - 1

FIGURE 54 : RELATION ENTRE "VISCOSITE BROOKFIELD" ET pH DE DECAILLAGE (pHF) DE YAOURTS BRASSES LISSES A CHAUD 151 - 1

FIGURE 55 : REPRESENTATION DE LA PERTE DE "VISCOSITE BROOKFIELD" DU FAIT DES TRAITEMENTS INDUSTRIELS DE SOUTIRAGE D'UNE CUVE DE CAILLE LACTIQUE POUR YAOURT BRASSE NATURE 155 - 1

FIGURE 56 : RHEOGRAMMES OBTENUS SUR LES ECHANTILLONS CORRESPONDANT AUX PRELEVEMENTS AVANT REFROIDISSEUR (AR1) ET APRES REFROIDISSEUR (PR2) 156 - 1

FIGURE 57 : VITESSE DE REFROIDISSEMENT DES 6 LOTS DE YAOURTS SORTIS A DIFFERENTES TEMPERATURES DU REFROIDISSEUR 157 - 1

FIGURE 58 : INFLUENCE DE LA TEMPERATURE EN SORTIE DU REFROIDISSEUR SUR LA "VISCOSITE BROOKFIELD" DU YAOURT BRASSE 158 - 1

FIGURE 59 : INFLUENCE DE LA VITESSE DE REFROIDISSEMENT SUR LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE : DIFFERENTES CINETIQUES ETUDIEES 164 - 1

FIGURE 60 : VARIATION DE LA VISCOSITE PLASTIQUE EN FONCTION DE LA VITESSE DE REFROIDISSEMENT APRES CONDITIONNEMENT 165 - 1

FIGURE 61 : PROTOCOLE DE MISE EN CULTURE DES SOUCHES DE S.THERMOPHILUS POUR ETUDE DU POUVOIR TEXTURANT 168 - 1

FIGURE 61 bis : PROTOCOLE DE MISE EN CULTURE DES CLONES 14 ET 17 ASSOCIES OU NON AVEC LE L. BULGARICUS P. 169 - 1

FIGURE 62 : METABOLISME DE PRODUCTION DE MUCOPOLYSACCHARIDE PAR LES CLONES 14 ET 17 SUR MILIEU SYNTHETIQUE 169 - 1

FIGURE 63 : SCHEMA DE LA METHODE D'EXTRACTION DU POLYSACCHARIDE PURIFIE, A PARTIR D'UN LAIT FERMENTE 171 - 1

FIGURE 64 : COMPARAISON DES RHEOGRAMMES DU YAOURT LIQUIDE AVEC OU SANS POLYSACCHARIDE AJOUTE A RAISON DE 0.025 %, MESURES EFFECTUEES AU "LOW SHEAR 30" (CONTRAVES) 172 - 1

FIGURE 65 : PRODUCTION DE MUCOPOLYSACCHARIDE PAR UN CLONE DE S. THERMOPHILUS ISOLE D'UN FERMENT SODIMA CULTIVE SUR MILIEU LAIT 174 - 1

FIGURE 66 : REPRESENTATION A L'ECHELLE DE LA TAILLE (1 cm = 1 μ) ET DU NOMBRE (base 1 = 10^7 unités) DES DIFFERENTS ELEMENTS STRUCTURAUX PRESENTS DANS 1 ML DE YAOURT BRASSE AU LAIT ENTIER 190 - 1

INTRODUCTION

L'enjeu initial des recherches fixé par la SODIMA était de parvenir à une économie substantielle dans la production du yaourt brassé grâce à la mise en oeuvre d'un procédé optimisé par l'emploi de ferments sélectionnés pour leurs propriétés épaississantes d'une part, et la mise en oeuvre d'autre part,de paramètres de fabrication maîtrisés et optimisés ; ceci en garantissant la qualité du produit et, en particulier, la texture souhaitée par le consommateur.

Les objectifs que nous nous sommes fixés pour essayer de mener à bien cette étude peuvent être précisés de la manière suivante :

- mettre en oeuvre un ensemble de méthodes permettant l'évaluation objective et complète de la texture du produit.
- parvenir à maîtriser la régularité du procédé de fabrication grâce à la connaissance des amplitudes de variation des facteurs et de leurs conséquences sur la texture.
- diminuer le coût de fabrication du yaourt brassé par la réduction du taux de poudre ajoutée et la mise en oeuvre d'un procédé maîtrisé et optimisé.

En conséquence, le plan de travail que nous avons suivi s'est construit selon 4 chapitres :

. Nous nous sommes attachés, dans la revue bibliographique, à présenter les différents éléments structuraux responsables de la texture du yaourt brassé puis après avoir résumé les différentes méthodes d'étude et de caractérisation d'un tel produit, nous avons essayé d'ordonner les résultats existants, concernant l'influence des paramètres du procédé de fabrication.

. Le deuxième chapitre expose ensuite les méthodes rhéologiques et sensorielles que nous avons du mettre au point, parallèlement à la mesure au "Viscosimètre Brookfield" pour parvenir à une description plus complète des propriétés de texture du yaourt brassé. Ceci nous a permis de discuter ses caractéristiques et de quantifier les conséquences de la variabilité du procédé industriel.

. L'étude des paramètres qui affectent ces différentes caractéristiques rhéologiques et sensorielles a été menée dans le troisième chapitre. Nous y présentons les procédés de fabrication du yaourt brassé utilisés à l'échelle laboratoire puis à l'échelle pilote. Puis nous avons étudié les relations entre variation du paramètre et la variation de la caractéristique texturale, en essayant de proposer des mécanismes d'actions des différents facteurs.

Parmi ceux-ci, nous avons distingué les matières premières, les paramètres de fermentation et les opérations technologiques post-fermentation. Enfin, une étude spécifique s'est attachée à préciser "le pouvoir texturant" de certaines souches de ferments.

. Enfin, le quatrième chapitre présente l'application industrielle des résultats obtenus précédemment et montre la possibilité de mettre en oeuvre un procédé de fabrication modifié où, à texture équivalente le taux de matière sèche ajoutée est significativement diminué.

CHAPITRE I

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Traditional name	
Jugurt/Eyran/Ayran	Turkey
Busa	Turkestan
Kissel Mleka	Balkans
Urgotnic	Balkan Mountains
Leban/Laban	Lebanon and some Arab countries
Zabady	Egypt and Sudan
Mast/Dough	Iran and Afghanistan
Roba	Iraq
Dahi/Dadhi/Dahee	India
Mazun/Matzoon/Matsun/Mastoni	Armenia
Katyk	Transcaucasia
Tiaourti	Greece
Cieddu	Italy
Mezzoradu	Sicily
Gioddu	Sardinia
Tarho	Hungary
Fiili	Finland
Filmjolk/Fillbunke/Filbunk/Taettemjolk/ Tettemelk	Scandinavia
Iogurte	Brazil and Portugal
Skyr	Iceland
Gruzovina	Yugoslavia
Donskaya/Varenetes/Kurunga/Ryshenka/ Guslyanka	Russia
Tarag	Mongolia
Shosim/Sho/Thara	Nepal
Yoghurt/Yogurt/Yaort/Yaourti/Yaourth/ Yogur/Yaghourt	Rest of the world ("Y" is replaced by "J" in some cases).

TABLEAU 1 : **PRESENTATION DE QUELQUES YAOURTS ET LAITS FERMENTES CONSOMMES DANS LE MONDE**

(d'après TAMIME et ROBINSON, 1984)

I : LE YAOURT BRASSE, LES COMPOSANTS STRUCTURAUX RESPONSABLES DE LA TEXTURE

1.- INTRODUCTION : LE YAOURT BRASSE, PRODUIT LAITIER FRAIS

Le yaourt appartient à l'immense famille des produits laitiers fermentés connue de l'alimentation humaine depuis la plus haute antiquité. Deux ouvrages de référence (RASIC et KURMAN, 1978 ; TAMIME et ROBINSON, 1984) font le point sur l'origine, la diversité des procédés de fabrication et des produits appartenant à cette famille (tableau 1). Cette variété cache en fait des constantes qui peuvent être résumées ainsi, selon TAMIME et ROBINSON (1984, p.5) :

- Augmentation du taux de matière sèche du lait jusqu'à 14 à 16 %.
- Chauffage du lait selon des procédés qui utilisent des couples temps-température variables.
- Ensemencement du lait avec un ferment dans lequel Lactobacillus bulgaricus et Streptococcus thermophilus sont les microorganismes dominants.
- Fermentation du lait jusqu'à obtention d'un caillé de texture et de flaveur souhaitées.
- Refroidissement et éventuellement ajout de fruit ou d'autres additifs alimentaires.
- Conditionnement et distribution au consommateur en conditions réfrigérées.

BALLONGUE (1987) a résumé les principales caractéristiques des différents yaourts européens (tableau 2).

En France, l'appellation Yaourt repose sur une législation stricte, s'appuyant sur le décret n°63-695 du 10 juillet 1963 (J.O. du 16 juillet 1963) modifié par le décret n°82-184 du 22 février 1982 (J.O. du 23 février 1982).

Normes / Pays	Finlande	Italie	Espagne	Suisse	Portugal	Autriche	Pays-Bas	Danemark	Belgique	Luxembourg	R.F.A	Grande Bretagne	Irlande
Lactobacillus Bulgaricus et Streptococcus thermophilus	+	+	+	-	-	-	+	-	+	+	-	-	-
Ferments vivants	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	-	-	-
Post-thermisation interdite	+	+	+	+	+	+	+ -	+ -	+	+	-	-	-
Stabilisants interdits — yaourt nature	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+ -	+	-
Stabilisants interdits — yaourt aromatisé	+	+	-	-	+	+	-	-	-	-	+ -	-	-
Ajout de protéines interdit c = caséine autorisée	+	+	-	+	+	+	c	+	c	c	-	-	-
Norme d'hygiène	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	-	-	-
Norme de température	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-	-

TABLEAU 2 : **NORMES EN VIGUEUR DANS DIFFERENTS PAYS CONCERNANT LES YAOURTS** (d'après BALLONGUE, 1987)

+ : norme existante ; - : norme absente.

Ce décret stipule en particulier dans ses articles 2 et 3 :

- la dénomination yaourt ou yoghourt est réservée au lait fermenté frais obtenu, selon les usages loyaux et constants, par le développement des seules bactéries lactiques thermophiles spécifiques dite "Lactobacillus bulgaricus" et "Streptococcus thermophilus", qui doivent être ensemencées simultanément et se trouver vivantes dans le produit mis en vente à raison d'au moins 100 millions de bactéries par gramme.

Le lait utilisé pour la fabrication du yaourt ou yoghourt ne peut avoir fait l'objet d'une reconstitution. Toutefois, il peut être additionné de lait en poudre, écrémé ou non, à la dose maximale de 5 grammes de poudre pour 100 grammes de lait utilisé. Le yaourt ou yoghourt ne doit faire l'objet après coagulation du lait d'aucun traitement autre que la réfrigération, et éventuellement le brassage. La quantité d'acide lactique libre contenue dans le yaourt ou yoghourt ne doit pas être inférieure à 0,8 gramme pour 100 grammes lors de la vente au consommateur.

- Constitue une falsification au sens de la loi du 1 er août 1905 l'addition au "lait fermenté" de tout produit étranger, à l'exception des produits ci-après :

. le sucre (saccharose) ;

. les matières colorantes autorisées ;

. les matières aromatiques naturelles ;

. Les pulpes ou jus de fruits, le miel ou la confiture, à la condition que le "lait fermenté" proprement dit entre au moins dans une proportion de 70 p.100 en poids du produits mis en vente.

Le yaourt est donc un produit laitier frais fermenté et vivant. Trois types de yaourts, différant essentiellement par leur texture sont proposés au consommateur : le yaourt ferme, le yaourt brassé, le yaourt liquide ou "à boire". Ces trois types existent en version nature, aromatisés ou aux fruits. Dans le cas du yaourt ferme la fermentation a lieu dans le pot qui va être proposé au consommateur ; le yaourt brassé comme le yaourt liquide sont obtenus par fermentation dans des cuves de 500 à 5000 litres. Le procédé de fabrication du yaourt brassé sera détaillé dans la troisième partie.

	CARACTERES	*L. BULGARICUS*
GENOTYPE	Contenu de l'ADN en G + C	Voisin de 50 %
	Homologie des acides nucléiques	avec ceux de *L. lactis* : ≥ 80 % *L. helveticus* : 0 à 40 %
	Parenté d'enzymes iso-fonctionnelles (lactico-deshydrogénases) de différentes souches	avec celles de *L. lactis* : oui *L. helveticus* : non
PHENOTYPE	Morphologie	Variable avec l'âge, le milieu, la souche. Granules métachromatiques abondants dans les cellules de cultures âgées colorées au bleu de méthylène
	Isomère de l'acide lactique	D (—) E
	Groupe sérologique	
	Exigences nutritionnelles — riboflavine — vitamine B12 — pyridoxal — acide folique — thymidine	 + — — — —
	Production de gaz à partir du glucose	—
	Croissance à 15°C à 45°C	 — +
	Hydrolyse de l'arginine	—
	Acide lactique % produit dans le lait	≤ 1,8 %
	Sucres fermentés — fructose — galactose — glucose — lactose — maltose — mannose — sucrose — tréhalose	 + ± ± + — — — —

L. bulgaricus

	CARACTERES		OBSERVATIONS
GENOTYPE	Contenu de l'ADN en G + C	Voisine de 40 %	Pas de différence nette avec les autres streptocoques Confirme le bien fondé de l'espèce *S. thermophilus*
	Homologie des acides nucléiques	*S. thermophilus* est différent des streptocoques voisins	
	Parenté d'enzymes iso-fonctionnelles (alcoolases) de différentes souches de *S. thermophilus*.	avec celles de *S. lactis* *S. cremoris* : oui *S. diacetylactis*	Pas de différence nette avec les streptocoques du groupe sérologique N.
PHENOTYPE	Morphologie	Cellules sphériques ou ovoïdes en paires ou en longues chaînes. Polymorphisme prononcé dans les cellules âgées.	
	Ecologie *Température de croissance* : culture à 10°C 45°C	Lait, produits laitiers uniquement. — +	 Le caractère thermophile accusé le différencie nettement des streptocoques lactiques du groupe sérologique N (cultivent à 10 mais pas à 45°C), et des streptocoques du groupe sérologique D (cultivent à 10 et 45°C). C'est aussi l'un des streptocoques les plus thermorésistants.
	Thermorésistance à 65°C, 30 min.	+	
	Croissance en présence de NaCl, 2 %	—	Très sensible au sel, il s'oppose nettement aux streptocoques de groupe sérologique D qui cultivent en présence de 6,5 % de sel.
	Groupe sérologique	Absence d'antigène de groupe	Différence essentielle avec les streptocoques lactiques mésophiles (groupe sérologique N) et les streptocoques fécaux (groupe sérologique D).
	Hydrolyse de l'arginine	—	*S. lactis* et la plupart des streptocoques du groupe sérologique D sont positifs.
	Sucres fermentés — fructose, glucose, lactose, sucrose — maltose, pentoses (xylose et arabinose) et raffinose — tréhalose, inuline, glycérol, mannitol, sorbitol	 + (—) —	Petit nombre de sucres fermentés. Préférence marquée pour les disaccharides, lactose et saccharose. *S. thermophilus* est l'un des streptocoques les moins « actifs » en ce qui concerne l'éventail des sucres fermentés.
	Action sur le lait tournesolé Acidification rapide A Coagulation C Réduction très lente et souvent incomplète du tournesol r		Cette réaction le différencie des autres streptocoques isolés du lait et produits laitiers en particulier des streptocoques lactiques du groupe sérologique N (RAC).

+ : réaction positive pour 90 % ou plus des souches. - (—) : réaction négative pour 90 % ou plus des souches. - — : réaction toujours négative.

S. thermophilus

TABLEAU 3 : PRINCIPALES PROPRIETES DE STREPTOCOCCUS THERMOPHILUS ET LACTOBACILLUS BULGARICUS
(d'après ACCOLAS, 1982 in TERRE, 1986)

Le produit se présente sous la forme d'un caillé homogène, lisse, "semi-fluide". Sa texture, son acidité, ses propriétés aromatiques sont les critères essentiels de qualité qui sont fixés par les cahiers des charges des fabriquants. Sa composition biochimique a été décrite par FAVIER (1987).

Un yaourt brassé nature est donc constitué d'environ 85 % d'eau. La matière sèche, composée des protides dont la caséine, des lipides, des glucides dont le lactose et des minéraux, forment les éléments structurés originaires du lait. Les bactéries lactiques (10^8/ml) constituent les éléments structurés exogènes.

2.- LES BACTERIES LACTIQUES THERMOPHILES PRODUCTRICES DE MUCUS

2.1 Introduction

Dans le yaourt, les deux bactéries thermophiles, Streptococcus thermophilus et Lactobacillus bulgaricus vivent en symbiose. Ces deux espèces appartiennent au groupe des bactéries lactiques dans lequel on distingue les thermophiles des mésophiles. Leurs principales propriétés sont précisées dans le tableau 3 (TERRE 1986). De très nombreux travaux et articles de synthèse ont été publiés concernant la nutrition et le métabolisme de ces bactéries (DESMAZEAUD, 1983), (THOMPSON, 1987) leur symbiose dans le lait (BOTTAZI, 1978), voire sur leurs propriétés technologiques (BOUILLANE et DESMAZEAUD, 1980) ; mais peu d'auteurs se sont encore intéressés aux propriétés de synthèse d'agents épaississants par les bactéries lactiques. Une synthèse bibliographique sur le sujet a été proposée très récemment par F.GANCEL (1988). Elle met en évidence la différence de comportement entre les bactéries mésophiles et thermophiles. Nous détaillerons donc seulement ici, les propriétés texturantes des deux bactéries du yaourt.

2.2 Production de mucus par Lactobacillus bulgaricus

GALESLOOT et HASSING (1973) avait montré que la souche RR (collection du NIZO) entrainait le caractère filant ("ropy") du lait ensemencé.

GROUX (1973) étudia la composition du mucus secrété par une souche et détermina sa structure polysaccharidique où le galactose semblait être le constituant essentiel, l'arabinose, le mannose et le glucose étaient aussi présents. Des résultats similaires ont été obtenus par BIANCHI-SALVADORI (1983). MANCA DE NADRA (1985) étudia la production d'exo-polysaccharide à partir d'une souche CRL 420 isolée d'un yaourt commercial cultivée sur lait reconstitué ; la production du polysaccharide apparaissait après 3 heures d'incubation sur milieu glucose ou fructose, après 5 heures sur milieu lactose ou saccharose, elle était maximale en phase exponentielle de croissance, la masse moléculaire du polysaccharide était de 200.000. Le glucose et le fructose représentaient les deux monomères majeurs dans un rapport respectif de 1/2.
SCHELLHASS (1985), en incubant des souches filantes de type RR sur un milieu lait écrémé par comparaison avec une souche non filante, a mis en évidence des appendices visibles en microscopie électronique, en surface des bactéries. Ces filaments étaient aussi liés à la matrice protéique. Enfin, CERNING et coll (1986) montra que 3 souches différentes incubées sur lait écrémé produisent un polysaccharide de masse moléculaire 500 000 constitué de galactose, glucose et rhamnose dans un rapport molaire de 4 : 1 : 1.

2.3 Production de mucus par Streptococcus thermophilus

GALESLOOT et HASSING (1973) ont montré que, dans une souche référencée Ist, le Streptococcus thermophilus produit un mucus responsable de l'aspect filant du yaourt, cette faculté était perdue au cours de repiquages successifs.

Temp. I	Temp. II	D.O.	pH	Production
30	10	0,214	6,83	1763
	42	0,327	6,71	287
37	10	0,781	6	750
	42	2	4,39	185
42	10	1,702	4,41	306
	42	1,815	4,39	223
45	10	0,363	6,67	1200
	42	0,4	5,42	222

Tableau 33 Influence de la température de croissance et de la température de phase stationnaire sur la production de polysaccharides par le clone S22-3.

Temp. I : température de croissance ,
Temp. II : température de phase stationnaire
D.O. : densité optique à 600 nm au temps T 18h de culture
pH : pH au temps T 18h de culture
Production : en µg d'équivalents dextrane / mg de poids sec

TABLEAU 4 : **INFLUENCE DE LA TEMPERATURE DE CROISSANCE ET DE LA TEMPERATURE DE PHASE STATIONNAIRE SUR LA PRODUCTION DE POLYSACCHARIDE PAR S. THERMOPHILUS (clône S22-3) SUR MILIEU SYNTHETIQUE**
(d'après F. GANCEL, 1988)

ODA et Coll. (1983), à partir d'une culture sur lait écrémé, ont isolé un polysaccharide exocellulaire à propriété épaississante composé de glucose et galactose dans un rapport 2/1. SCHELLHASS (1984) a caractérisé sur différentes souches un polysaccharide externe lié à la paroi bactérienne formant des filaments. Les caractéristiques du polysaccharide isolé étaient les suivantes : rapport galactose/glucose égal à 2/1 ; présence de 2 liaisons β et d'une liaison α ; absence d'acide uronique ; traces de sucres réducteurs ; poids moléculaire très variable ; synthèse augmentée par les températures basses (30°C).

GIRAFFA et BERGERE (1987) ont extrait à partir de 3 souches dites épaississantes deux fractions polysaccharidiques, l'une insoluble attachée au culot bactérien, l'autre soluble dans le milieu de culture. La production de polysaccharide soluble est faible (40 mg/l), celle du polysaccharide exocellulaire, composé essentiellement de galactose, glucose et de faibles proportions d'autres sucres simples, semblait augmenter par l'adjonction d'extrait caséique dans le lait.

Enfin, F.GANGEL (1988) en dosant la production du polysaccharide sur milieu synthétique, a montré qu'elle relevait d'un métabolisme secondaire, dépendant de la nature des sucres et de la température lors de la phase de production (tableau 4). De plus, la variabilité clonale de production a été établie.

En conclusion, il apparait que l'ensemble de ces travaux y compris les plus récents insistent sur l'aspect variable, aléatoire de la production de substances polysaccharidiques par les deux espèces bactériennes. Quant aux relations entre cette production et les propriétés de texture du Yaourt brassé, elles seront vues dans le paragraphe III.

2.4 Répartition et structure spatiale des bactéries dans le yaourt

Le yaourt brassé contient au minimum 10^8 bactéries par ml, le rapport entre les deux espèces se situe en général autour de 60 à 70 % pour le Streptococcus thermophilus et 40 à 30 % par le Lactobacillus bulgaricus. S. thermophilus est de forme sphérique (diamètre environ 0.8 µ), les bactéries peuvent être isolées mais sont le plus souvent constituées en chainettes de 3 à 10 unités.

L.bulgaricus est de forme allongée en bâtonnet cylindrique (de longueur variant de 1 à 5 µ et de diamètre 0.5 à 1 µ). Les bactéries sont individualisées (TERRE, 1986).

Très récemment, BOTTAZI et BIANCHI (1986) ont étudié par observation en microscopie électronique de balayage sur du yaourt au lait entier, la production de polysaccharides par les deux espèces de bactéries dont un lactobacille "filant"- (L. bulgaricus 20 1). Les lactobacilles constituent des microcolonies en forme de filaments qui occupent un espace long de 60 et large de 6 µ .

Il existe un espace libre autour de cette microcolonie qui est en général, étroit. Les streptocoques sont rassemblés en plusieurs dizaines d'unités qui forment une masse sphérique pouvant atteindre 10 . L'espace libre autour de ce type de colonie atteint 20. Quand on rencontre des associations mixtes de streptocoques et de lactobacilles, les espaces vides varient en taille suivant le ratio S.thermophilus/L.bulgaricus. Ces espaces libres avaient déjà été mis en évidence par TAMIME et coll.(1984). Une autre observation très intéressante est faite par ces auteurs qui, en utilisant une souche de L. bulgaricus filante, montre que des filaments relient plusieurs lactobacilles entre eux et peuvent même recouvrir complètement certaines bactéries. De plus, les filaments sont aussi attachés à la matrice caséique, ce qui renforce les observations de SCHELLHASS (1985) montrant l'attachement de polysaccharides de paroi aux protéines chez les deux espèces.

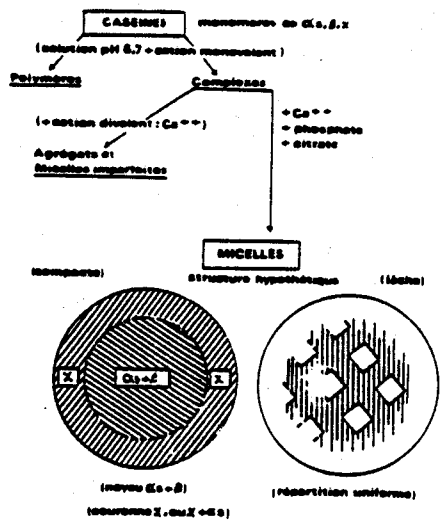


FIGURE 1 : SCHEMA DE L'EDIFICATION DES MICELLES
(d'après ALAIS, 1984)

	Proportions moyennes			
	g par litre		réserves	
Protides totaux	32		100	
I. Protéines				
A - Caséine isoélectrique	25		78	100
a - caséine α_{s1}		9.0		36
b - caséine α_{s2}		2.5		10
c - caséine β		8.5		34
d - caséine κ		3.2		13
e - caséine γ_1, γ_2, γ_3		1.75		7.0
B - Protéines du lactosérum	5.4		17	100
B-1-albumines				
a - β-lactoglobuline		2.7		50
b - α-lactalbumine		1.2		22
c - sérum-albumine		0.25		5
B-2-globulines immunes		0.65		12
B-3-protéoses-peptones		0.6		10
II. Substances azotées non protéiques	1.6		5	

TABLEAU 5 : DISTRIBUTION DES PRINCIPALES MATIERES AZOTEES DU LAIT DE VACHE (ALAIS, 1984)

	α_{s1}	α_{s2}	β	K
Acides aminés	199	207	209	169
Poids moléculaire	23 600	25 200	24 000	19 000
Résidus cystéines	0	2	0	2
Groupements phosphorylés	8-9	10-13	5	1
Glucides	0	0	0	présence
Hydrophobicité (KJ/résidu)	4.9	4.65	5.6	5.1
Charge à pH 6.6	- 20.9	- 14.8	- 12.3	- 3.0
Sensibilité au calcium				
à 20° C	+ +	+ + +	+	-
à 2° C	+ +	+ + +	-	-

TABLEAU 6 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES CASEINES
(d'après LENOIR, 1985)

3.- LES MICELLES DE CASEINE DANS LE COAGULUM LACTIQUE

3.1 Structure des micelles

La caséine est la protéine insoluble du lait, elle précipite à pH 4.6 son point iso électrique. Elle représente en moyenne 78 % des 32 g de protides totaux présents dans 1 litre de lait (tableau 5). La fraction azotée de la base laitière pour yaourt est enrichie du fait de l'ajout de poudre de lait écrémé ou de la concentration du lait. La caséine dans le lait est en fait un complexe formé de quatre composants majeurs, les caséines αs_1 , αs_2 , β et κ (tableau 6). Ces quatre fractions s'arrangent pour former des structures particulières : les micelles, en suspension stable dans le lait.
La structure de la micelle a fait l'objet de nombreux travaux, deux synthèses bibliographiques récentes ont été réalisées sur le sujet (PAYENS, 1982 et SCHER et HARDY, 1987). La figure 1 , empruntée à ALAIS (1984) présente une tentative de schématisation des associations des quatre caséines qui aboutissent à la formation des micelles.

Deux modèles interprétatifs coexistent aujourd'hui : une structure compacte et hétérogène où la caséine κ serait essentiellement externe (PAYENS, 1982 et SCHMIDT,1980) et une structure lâche, régulière plus "spongieuse" où une répartition uniforme des trois constituants est plausible (GARNIER, RIBADEAUDUMAS, 1970). Le modèle le plus communément retenu aujourd'hui étant celui de SCHMIDT (1982), représenté dans la figure 2.

La micelle de caséine sphérique de 100 à 130 nm de diamètre résulterait donc de l'association de submicelles sphériques de diamètre 20 nm. L'association est rendue possible par la formation de liaisons entre les groupements phosphoséryls d'une submicelle et le phosphate de calcium colloïdal qui jouerait le rôle d'un ciment intersubmicellaire (figure 3).

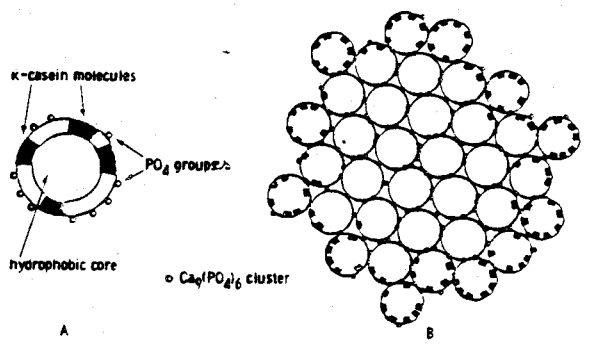


FIGURE 2 : MODELE DE SUBMICELLES (A) ET DE MICELLES (B) DE CASEINE
(selon SCHMIDT, 1982, Core : noyau : cluster : aggrégats)

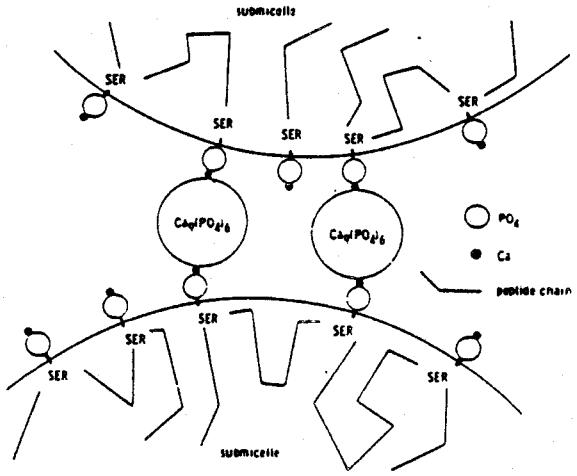


FIGURE 3 : SCHEMA DE PONTAGE DE DEUX SUBMICELLES PAR LE PHOSPHATE DE CALCIUM
(d'après SCHMIDT, 1982)

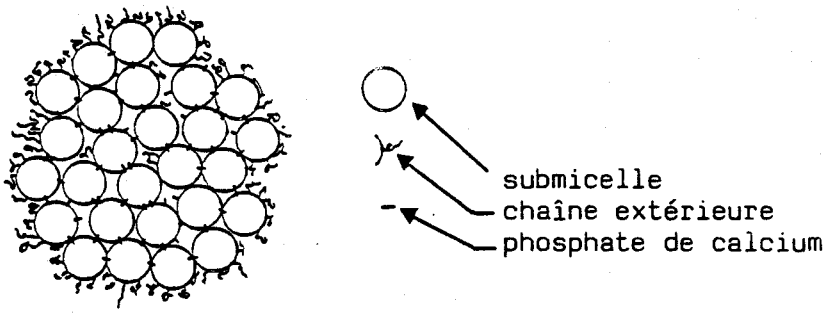


FIGURE 4 : MODELE D'UNE MICELLE DE CASEINE AVEC "CHEVELU EXTERNE"
(d'après WALSTRA et JENNESS, 1984)

Dans ce modèle, les submicelles contenant peu ou pas de caséine κ seraient internes et les submicelles riches en caséine κ seraient externes. La taille de la micelle serait maximale quand sa surface serait essentiellement constituée par les parties polaires externes de la caséine κ.

WALSTRA et JENESS (1984) proposent même un modèle où apparait un chevelu externe ("hairy layer") constitué des projections de caséine κ dans la phase soluble (figure 4). LENOIR (1985) reprend ce modèle et signale qu'il répond assez bien aux caractéristiques connues de la micelle et de son comportement.

3.2 Charge, hydratation et stabilité des micelles

LENOIR (1985) indique que la très grande stabilité des micelles de caséine est due à deux facteurs majeurs :

- leur charge de surface négative (potentiel zeta) d'environ -15 mV ;
- leur hydratation importante 3.7 g d'eau par g de caséine ;

Ces facteurs primaires de stabilité sont dépendants de divers paramètres, les uns relevant de la composition de la phase aqueuse (pH, concentrations en ions), les autres de la composition biochimique des micelles elles-mêmes (teneur en caséine κ).

3.3 L'influence de la chaleur

Lors du traitement thermique de la base laitière, il est maintenant bien établi que les protéines de sérum en particulier la β lactoglobuline se dénaturent et s'associent avec la micelle, ce qui augmente son caractère hydrophile (TAMIME, 1980 et RASIC et KURMAN, 1978 p.53). DAVIES et coll. (1978), HARWALKAR et KALAB (1981) ont mis en évidence par microscopie électronique du caillé, des liaisons β lactoglobuline et κ caséine du fait du traitement thermique. Ceci va avoir des conséquences sur la texture du caillé lactique qui seront vues dans le paragraphe III.

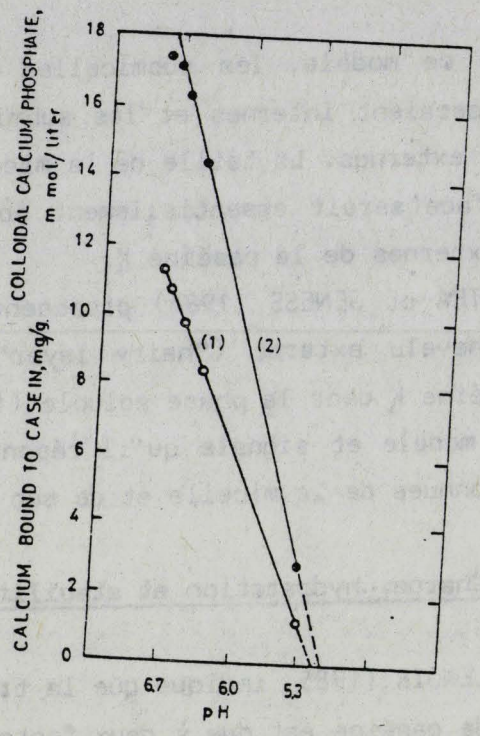


FIGURE 5 : **EFFET DU pH SUR LE RAPPORT CALCIUM/CASEINE ET LE CONTENU EN PHOSPHATE DE CALCIUM COLLOIDA DU LAIT**
(d'après EVENHUIS et DE VRIES, 1959)

(1) Calcium lié à la caséine en mg/g
(2) Phosphate de calcium colloïdal nmol/litre

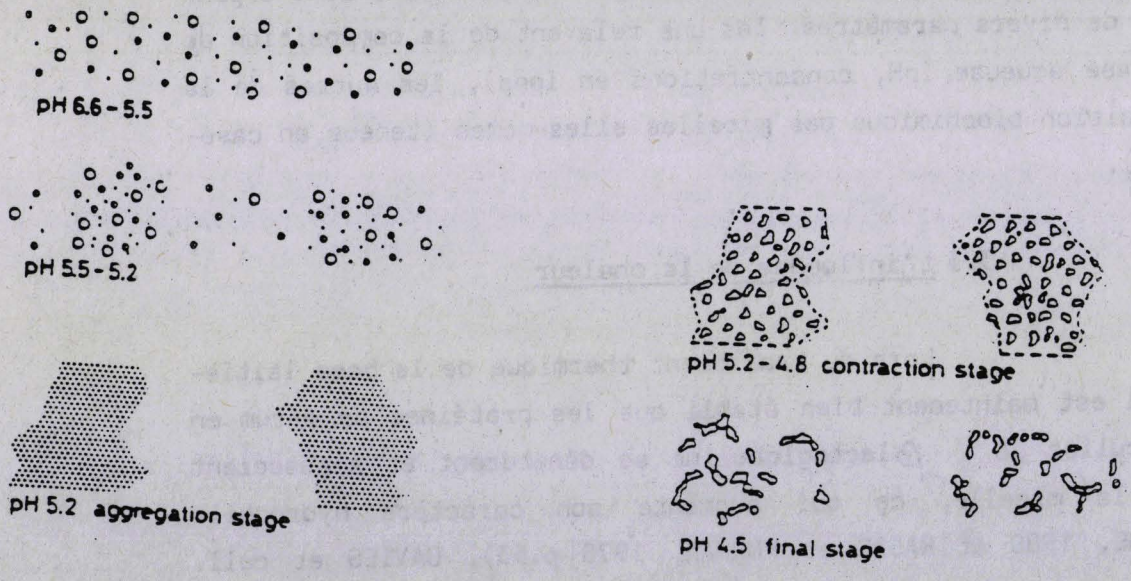


FIGURE 6 : **REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA FORMATION DE LA STRUCTURE DANS UN GEL LACTIQUE ACIDE**
(d'après HEETJE et coll., 1985)

3.4 L'acidification, la coagulation lactique

Les micelles de caséine vont, sous l'influence de l'acide lactique produit par les bactéries du yaourt, progressivement se déstabiliser puis se réarranger pour former un coagulum. De nombreux auteurs, DAVIES et coll. (1978), KALAB (1983), LENOIR (1985) proposent le mécanisme suivant, en s'appuyant sur la construction en submicelles de SCHMIDT (1982).

De pH 6.6 à 5.0, il y a relarguage progressif dans le lactosérum du phosphate de calcium colloïdal (voir figure 5) ; à pH voisin de 5, la déminéralisation est totale, la caséine est dispersée en ses submicelles ; ensuite, de pH 5 à 4.6, il y a aggrégation des submicelles du fait de la neutralisation de leurs charges et formation d'un réseau de chaines et d'aggrégats protéiques. D'autres auteurs, tels HEERJE et coll. (1985) proposent un mécanisme un peu plus complexe. Leur étude utilise des techniques d'acidification de lait écrémé par la gluconolactone puis des mesures rhéologiques, des mesures de potentiel zeta et des observations en microscopie électronique par cryodécapage pendant l'acidification. La coagulation aurait lieu en plusieurs étapes successives (voir figure 6).

1ère étape : de pH 6.6 à 5.5

Sous l'influence du relarguage dans la phase soluble du phosphate de calcium colloïdal, il y a départ de caséine κ puis β . Ceci provoque une désagrégation continue des micelles mais la charpente de caséine α_s reste encore entière.

2 ème étape : de pH 5.5 à 5.2

La rupture des micelles devient complète et à pH 5.2, il y a une nouvelle réorganisation des caséines par aggrégation. Les structures formées ont des tailles de quelques microns avec de larges espaces entre elles.

3ème étape : de pH 5.2 à 4.8

Il y a contraction des aggrégats et formation d'agglomérats qui se rapprochent, les espaces solvants sont plus nombreux et plus réduits.

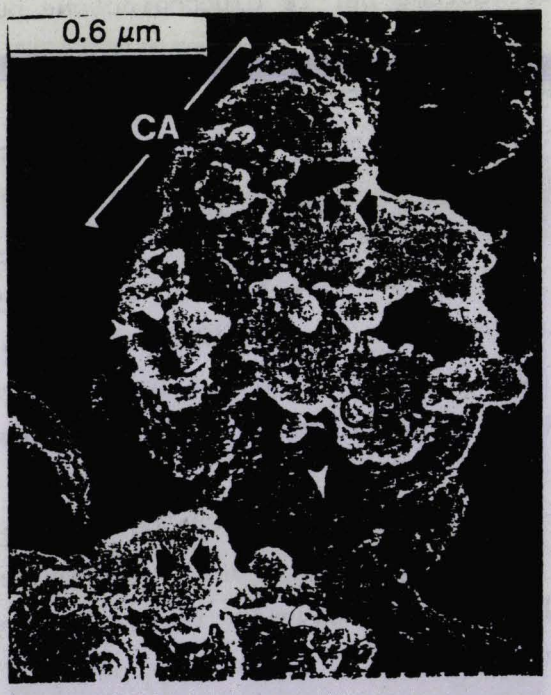


FIGURE 7 : **STRUCTURE EN MICROSCOPIE ELECTRONIQUE DE YAOURT MONTRANT LES AGREGATS DE CASEINES (CA) ET LES PARTICULES DE CASEINE (P)**
(d'après PARNELL-CLUNIES, 1987)

4ème étape : de pH 4.8 à 4.5

Il y a alors aggrégation des agglomérats pour former un réseau où sont visibles des structures aggrégées de grosses tailles ("corpuscular structure") liées entre elles par des structures en chaînes ("thread-like element"). Selon ces auteurs, ce mécanisme implique un modèle de micelles formant un réseau continu.

3.5 Structure du coagulum à la fin de la fermentation

Les études sur l'observation de la structure du coagulum caillé lactique sont assez récentes (KALAB, 1979, HARWAKAR et KALAB,1980) ; elles utilisent en particulier les possibilités de la microscopie électronique par transmission, balayage ou cryodécapage. Cependant, KURMAN (1967) signalait que la structure de la caséine dans le caillé se présentait sous la forme de particules rondes, agglomérées de façon irrégulière. Plus récemment, BROOKER (1987), sur du yaourt ferme, montre que les protéines sont constituées en réseau formé de noeuds qui sont reliés par des chaines linéaires ou légèrement branchées. Les particules de protéines ayant subies le traitement thermique sont aggrégées mais non fusionnées.
Mais surtout, c'est PARNELL-CLUNIES (1987) qui livre l'étude la plus riche en comparant des effets de différents traitements thermiques de lait pour yaourt. Les photographies (voir figure 7) montrent nettement un réseau en trois-dimensions. Ce réseau est formé d'éléments unitaires, des particules (CP) de caséine d'environ 1 micron de diamètre.

Ces particules s'associent en aggrégats plus grands de 3 microns (CA) qui peuvent être reliés par des éléments en forme de chaines; enfin, les espaces vides contenant la phase soluble ont une taille de 3 à 10 microns.

Remarquons à ce niveau que ces études concernent le yaourt type ferme, c'est-à-dire un caillé qui n'a subi ni brassage ni traitement mécanique.

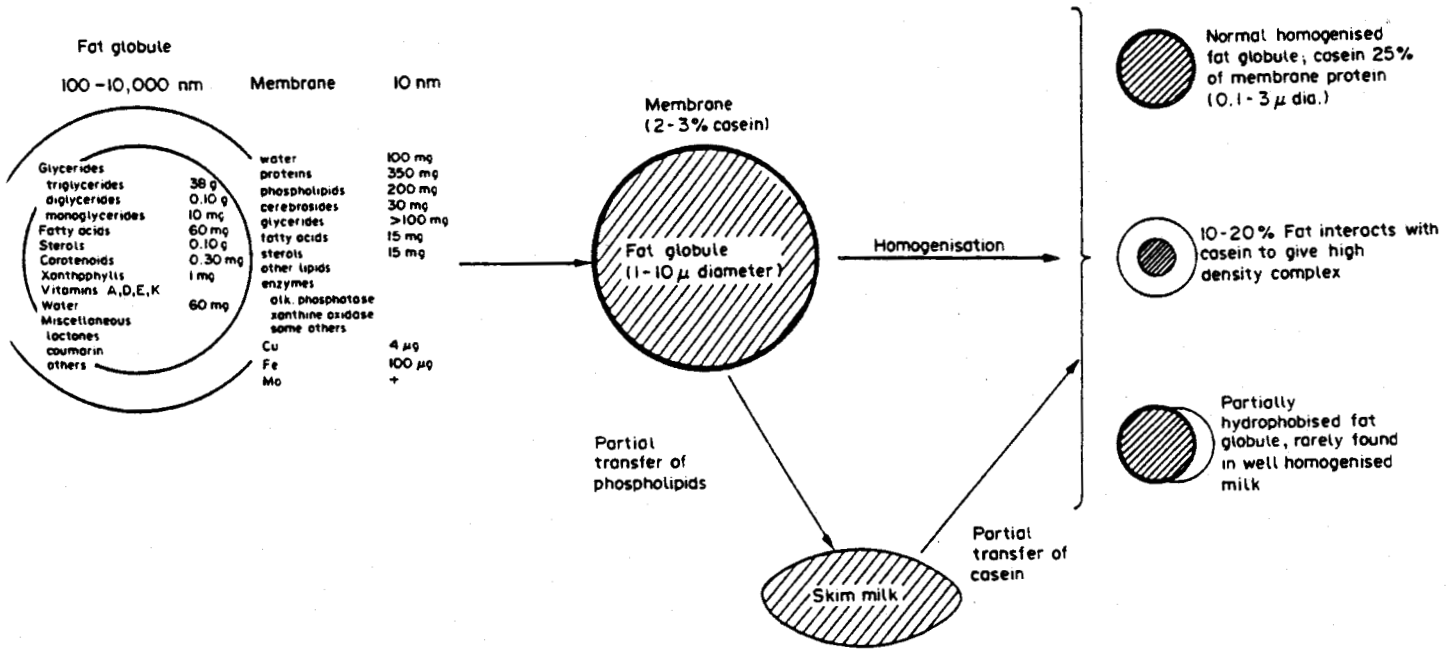


FIGURE 8 : **STRUCTURE D'UN GLOBULE GRAS, COMPOSITION ET REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE L'EFFET DE L'HOMOGENEISATION SUR LA TAILLE**

(d'après WALSTRA et JENESS, 1984)

4.- LES AUTRES CONSTITUANTS DU YAOURT BRASSE

4.1 Les globules gras

La matière grasse représente environ 35 g par litre de lait entier, elle est formée de globules gras. Les globules gras (environ 2 billions/l) sont des particules sphériques (voir figure 8). Lors de l'homogénéisation, leur diamètre moyen de 4 à 5 microns est réduit à 1 micron environ (ALAIS, 1984). Ceci conduit théoriquement à ce qu'un globule donne 125 globules de 1 micron, les nouveaux globules ne peuvent pas être complètement recouverts par les constituants de la membrane originelle, un film d'absorption se forme à partir des protéines solubles, surtout la fraction caséique. La fraction protéique de la membrane passe ainsi de 0.6 à 2.4 % de la matière grasse. Lors de l'homogénéisation du lait, il se forme un complexe "micelle-globule"grâce à la liaison de la caséine K et des constituants de la membrane globulaire (ALAIS, 1984).

4.2 La phase aqueuse

Elle est composée d'eau (environ 840 g/l), de lactose, d'éléments minéraux et d'une fraction azotée soluble non dénaturée par le traitement thermique et des protéines du sérum. Rappelons qu'un gramme de caséine est hydraté en moyenne par 3.7 g d'eau.

L'eau

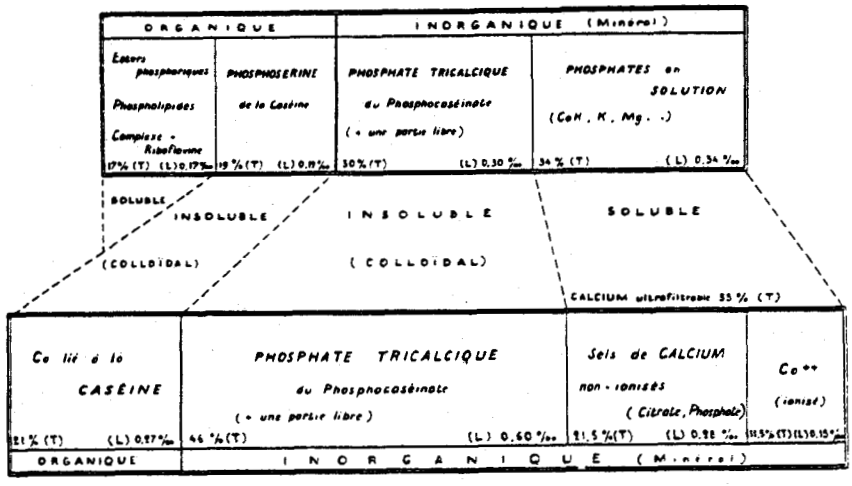
KURMAN (1967) distingue trois catégories :

- l'eau liée ou l'eau d'hydratation des protéines : la proportion d'eau liée par rapport à l'eau libre n'est pas fixe et dépend de plusieurs facteurs (changement dans l'état d'hydratation des protéines).

- l'eau capillaire : par l'effet de capillarité, une certaine quantité d'eau est retenue entre les particules agglomérées.

Dans le yoghourt brassé, la rétention d'eau varie du fait de l'effet capillaire.

I. Phosphore (P total = 1 $^{0}/_{00}$ de lait)



II. Calcium (Ca total = 1,3 $^{0}/_{00}$ de lait)

FIGURE 9 : **LA DISTRIBUTION DU PHOSPHORE ET DU CALCIUM DANS LE LAIT DE VACHE**

- l'eau d'inclusion ou l'eau libre : la quantité d'eau la plus importante se trouve sous forme libre, incluse à l'état de gouttelettes invisibles dans le coagulum. Ce haut pourcentage d'eau ne doit pas être séparé sous l'effet des traitements ultérieurs. Le brassage constitue un des moyens de stabiliser cette eau libre.

Pour LENOIR (1985) les 3.7 g d'eau par gramme de caséine se répartissent en 0,5 g d'eau liée et 2,2 g d'eau libre enfermée dans la micelle ou retenue en surface pour former une enveloppe d'hydratation).

- le lactose

50 g/l sont présents environ dans le lait initial, plus la quantitée apportée par les 5 % de poudre de lait écrémé ajoutée.
Seuls, 30 g environ sont transformés en acide lactique par les bactéries thermophiles (TERRE, 1986) ; ce dernier composé ainsi que le lactose résiduel est soluble dans l'eau.

- les protéines de sérum

les protéines solubles du lactosérum (β lactoglobuline et α lactalbumine essentiellement) représentent 17 %, les 5 % de protides restants sont de l'azote soluble non protéique (NPN).
Nous avons vu qu'elles étaient dénaturées sous l'effet du traitement thermique.

- les sels minéraux

ce sont principalement le calcium (1,2 g/l), le potassium (1,5 g/l), le phosphate (0.9 g/l), le citrate (0,2 pour 1000) et le magnésium (0,12 g/l), (voir figure 9). Partiellement insolubles dans le lait de départ puisque le calcium est lié à la caséine et que le phosphate tricalcique colloïdal intervient comme ciment constitutif de la micelle, ils sont relargués au fur et à mesure dans le lactosérum sous l'effet de l'acidification (BRULE, 1986); à pH 5, tous les éléments minéraux sont solubles (LENOIR,1985).

sources bibliographiques	éléments structuraux	dimension unitaire	forme	quantité moyenne estimée pour 1ml de yaourt
LENOIR,1985 PARNELL-CLUNIES 1987	aggrégats de micelles protéiques	diamètre : 1 à 3 microns	+ ou - sphérique	10^{13} à 10^{15}
ALAIS,1984 p.302	globules gras homogénéisés	diamètre : 1 micron	sphère	3.10^{11}
RASIC,KURMAN,1978 TERRE, 1979	lactobacilles	Longueur : 4 µ diamètre : 0.7 µ	batônnet	3.10^{7}
RASIC,KURMAN,1978 TERRE, 1979	streptocoques	diamètre : 0.8 µ	sphères	7.10^{7}
TAMINE et coll. 1984 BOTTAZZI et BIANCHI,1986 SCHELLHASS,1985	exopolysaccharide bactérien	Longueur : 3 à 4 microns	chaine filament	-
BOTTAZI et BIANCHI, 1986 TAMINE et coll., 1984	espace vide : autour des lactobacilles autour des streptocoques	diamètre : 5 à 10 µ diamètre : 60 µ	espace ± sphérique	-

TABLEAU 7 : **ELEMENTS STRUCTURAUX PRESENTS DANS 1 ML DE YAOURT BRASSE**

(COMPILATION DES SOURCES CITEES CI-DESSUS)

5.- CONCLUSION : STRUCTURE DU YAOURT BRASSE

En résumé, nous retiendrons que le coagulum lactique est constitué d'un réseau tridimensionnel, très fortement hydraté, formé d'aggrégats de caséines enfermant les globules gras homogénéisés. Ce réseau permet entre ces "mailles" de retenir l'eau libre. Il ménage en outre des espaces libres où vivent les streptocoques et/ou les lactobacilles groupés en colonies. Les bactéries sont dispersées dans le réseau mais elles peuvent être aussi liées entre elles ou à la matrice caséique si elles sont productrices de mucus polysaccharidique. Le tableau 7 résument la proportion et les dimensions des différents éléments structuraux présents dans le caillé lactique. Il faut maintenant aborder l'effet physico-chimique du brassage qui confère toute sa spécificité au yaourt brassé.

Lors du brassage, le coagulum est brisé en petites particules, du fait que la pression interne de ces particules est minime, l'eau ne se sépare pas (KURMAN,1967). Ainsi, le coagulum lactique constitué d'un gel fortement hydraté subit une inversion de phases lors du brassage. D'une distribution d'eau dans un gel, l'on passe à une distribution d'un gel dans l'eau (RASIC et KURMAN, 1978, p.244). Ceci a deux conséquences essentielles, la stabilisation du caillé et l'augmentation de la capacité de rétention d'eau (ces deux propriétés sont plus importantes chez le yaourt brassé que chez le yaourt ferme) mais en contre-partie, la texture du caillé change, elle devient moins ferme, plus souple, plus homogène. La "consistance" du caillé diminue du fait du brassage.

Sur le plan structural, le yaourt brassé est donc une phase aqueuse continue qui enferme une dispersion ordonnée, structurée, de protéines, de globules gras, de bactéries plus ou moins mucoïdes. C'est un produit laitier frais "semi-fluide".

Il convient maintenant de reprendre les travaux qui ont cherché à caractériser sa texture, avant de voir les différents traitements susceptibles de la modifier.

II : LA MESURE DE LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE

1.- NOTION DE TEXTURE

Si l'on reprend la définition concernant les produits alimentaires proposée par SZCZESNIAK (1973) : "la texture est la résultante des propriétés qui proviennent des élements physiques structuraux et de la manière par laquelle cela est perçu par les organes des sens".

L'importance de la perception sensorielle de la texture apparaît clairement, nous consacrerons le paragraphe 4 à l'évaluation sensorielle de la texture, mais il faut noter tout de suite que, pendant son évaluation tactile, le yaourt brassé subit des déformations qui peuvent être à la fois la cause et la conséquence de la perception de sa texture. Ainsi, il parait évident qu'une science qui traite des déformations et de l'écoulement des produits sous l'action de contraintes contribuera fortement à la connaissance de la texture. Nous avons donné là, la définition de la rhéologie. Le développement des études rhéologiques dans le domaine des produits laitiers est relativement récent (PRENTICE,1972) ; en effet, les mesures imitatives ou empiriques que nous décrirons dans le paragraphe 2, sont encore monnaie courante pour les produits agro-alimentaires, mais, cependant, des auteurs de plus en plus nombreux, cherchent à exprimer les propriétés rhéologiques fondamentales des produits complexes, tels les produits laitiers. Leurs travaux seront présentés au paragraphe 3.

A ce propos, il est nécessaire de faire deux remarques

- la première, s'appuie sur les travaux de BOURNE (1977) qui fait observer que la rhéologie, ne peut pas couvrir tout le champ de la texture du produit alimentaire, en particulier,l'apparence du produit a peu à voir avec la rhéologie, songeons en particulier pour le yaourt brassé, aux aspects lisses ou rugueux, granuleux qui ne sont pas des grandeurs rhéologiques. Il en va de même des propriétés d'adhérence.

- la deuxième, (SZCZESNIAK 1973) indique au contraire que la rhéologie n'est pas seulement utile à la compréhension des relations entre propriétés fonctionnelles et qualités organoleptiques de l'aliment, elle couvre aussi un autre terrain d'application hors du champ de notre travail : la relation des propriétés rhéologiques avec les propriétés de transfert de matière et de chaleur qui sont très importantes pour la maîtrise des procédés technologiques (HOLDSWORTH 1971, MIDOUX 1985).

Enfin, nous essaierons de rassembler dans le chapitre 5, les travaux qui ont pour but de mettre en relation les caractéristiques instrumentales et les propriétés jugées par l'évaluation sensorielle de la texture du yaourt brassé.

La présentation du yaourt brassé réalisée dans la première partie a confirmé qu'il est permis de classer ce produit dans le domaine des produits alimentaires "semi-fluides", ce qui nous a permis d'élargir le champ d'investigation bibliographique à d'autres produits alimentaires de consistance voisine.

2.- LES MESURES EMPIRIQUES DE LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE

Compte tenu de la complexité des structures et des comportements des produits alimentaires, les premières estimations objectives de la texture de ces produits ont été menées à l'aide d'instruments très divers dans leurs principes et donc, dans le type de renseignements qu'ils peuvent apporter sur la texture du produit.

Les principales caractéristiques de ces appareils sont leur simplicité d'utilisation, leur relative répétabilité, le fait qu'ils donnent une indication parlante à l'opérateur direct et à son environnement immédiat, c'est-à-dire, que la composante mesurée s'avère être, en général, en relation relativement étroite avec une propriété texturale facilement perçue du produit. Ces appareils sont en général peu coûteux, la réponse est rapide. Tout ceci s'ajoute pour souligner leur grande importance d'utilisation pour la caractérisation et donc dans les produits laitiers frais.

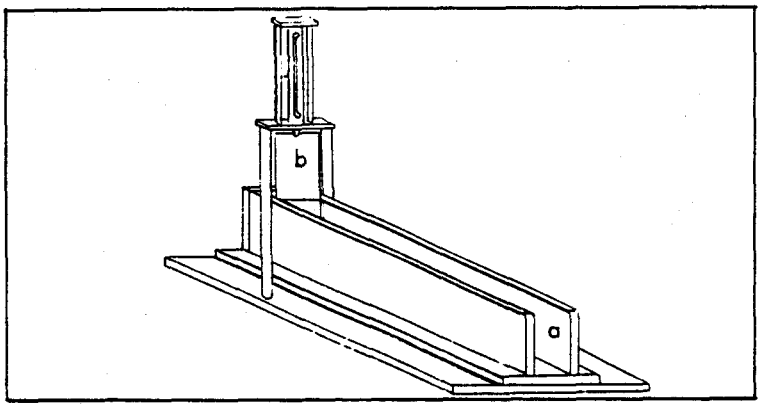
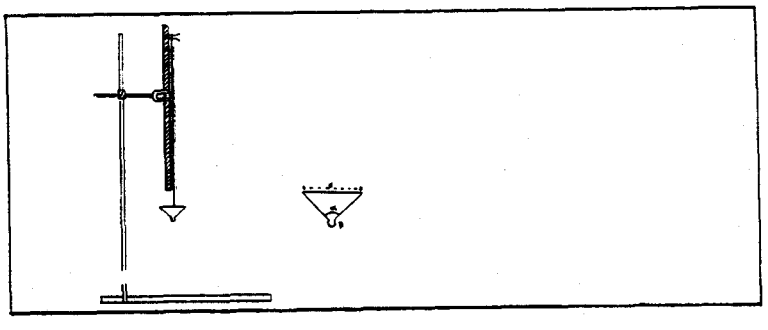


FIGURE 10 : **SCHEMA DE L'APPAREIL D'ETALEMENT**
(CENCO)
(a) : gouttière
(b) : guillotine (en position levée)



Poids du pénétromètre : 15 g ; longueur : 30 cm
Caractéristiques de l'embout : d = 22 mm, = 90°, = 5 mm
Distance embout - face supérieur du yaourt : 15 cm.

FIGURE 11 : **UN EXEMPLE DE PENETROMETRE UTILISE POUR MESURER LA TEXTURE DU YAOURT**

Mais, l'inconvénient majeur de ces techniques est qu'elles sont arbitraires, uniquement valables dans des conditions précises et limitées, et surtout, qu'elles fournissent des indications non utilisables en dehors de leur application immédiate. Elles ne permettent donc pas, le plus souvent, d'établir les propriétés intrinsèques du produit. En nous limitant aux mesures réalisées sur le yaourt brassé, nous avons essayé de regrouper selon la propriété qu'ils mesurent sur le produit les appareils les plus utilisés. Les principaux travaux et auteurs qui le mettent en oeuvre sont mentionnés et le principe de mesure rapidement décrit.

2.1 Les mesures imitatives

Ces tests essaient tout simplement de reproduire les conditions auxquelles le produit serait soumis dans la pratique. Il semble que peu d'appareils de ce type soient utilisés pour évaluer la texture du yaourt brassé, nous pouvons cependant citer BOTTAZI (1976) qui utilise le "thromboélastographe d'HELLIGE" afin de déterminer le moment de rupture du coagulum lactique.

2.2 Les mesures d'étalement

L'appareil de type "CENCO" (figure 10) mentionné par SAUVAGEOT (1977), est utilisé pour mesurer l'étalement du yaourt, la mesure est réalisée au bout de 5 minutes, elle varie en fonction de l'extrait sec total du produit.
Le "consistomètre d'ADAMS" ou celui de "BOSTWICK", utilisé par SZCZESNIAK (1963), BOURNE (1982) et LABROPOULOS (1984) ou encore JACQUIN (1986), sont basés sur le même principe. On mesure une "capacité d'étalement" ou encore la "fluidité" en donnant la distance parcourue par le yaourt, sur une règle graduée légèrement inclinée, sous l'effet de son propre poids.

2.3 Les mesures de pénétration

Différents types de pénétromètres ont été utilisés pour évaluer la texture des produits alimentaires et des yaourts en particulier. BOURNE (1966), dans une proposition de classification des tests de compression, hormis les tests de déformation où il n'y a pas de pénétration du système de mesure dans le produit, distinguait :

- les tests de perforation où on mesure la force nécessaire pour arriver à une profondeur constante ;
- les tests de pénétration où on mesure la profondeur de pénétration d'un module dans le produit sous une force constante en un temps fixé.

Plus récemment, PRENTICE (1972), dans un article de synthèse sur la rhéologie et la texture des produits laitiers, mentionne l'utilisation fréquente de ces méthodes mais le plus souvent pour des produits type beurre ou margarines, c'est-à-dire des produits à consistance quasi-solide , à température ambiante. Dans ce cas, on évalue en général, la fermeté, la dureté du produit.
Pour le yaourt, SAUVAGEOT (1977) indique son utilisation mais il doit s'agir du yaourt de type ferme.
Cependant, MARTENS (1972), en utilisant un pénétromètre à plaques, TAMIME (1978) ou encore LABROPOULOS (1984) indiquent des profondeurs de pénétration pour caractériser la consistance du yaourt brassé. Dans tous les cas, cela revient à évaluer la résistance du produit à la pénétration d'un module de mesure. Les pénétromètres "STEVENS" par-exemple, entre dans cette catégorie.(figure **11**).

La diversité des géométries de mesures utilisées, des forces de pénétration appliquées, font que les résultats sont difficilement comparables entre eux. En conséquence, la force de pénétration, la géométrie et les dimensions du cône de mesure, la profondeur de pénétration doivent être indiqués avec précision dans le protocole expérimental.

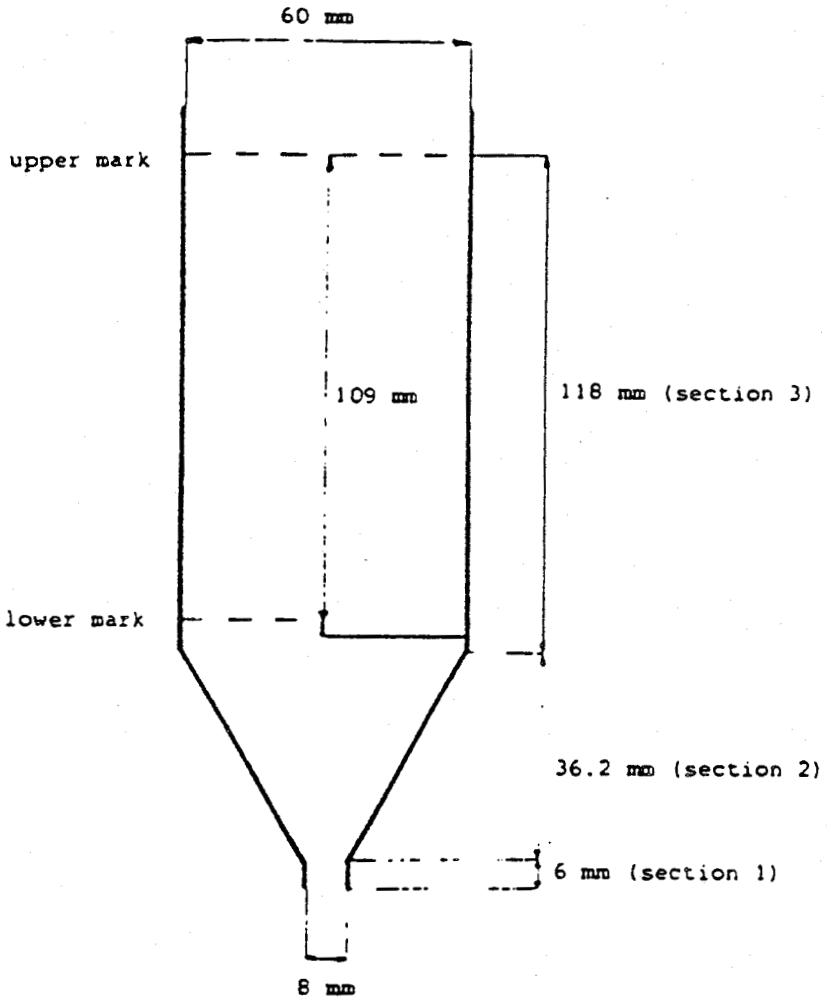


FIGURE 12 : **PRESENTATION ET DIMENSIONS DE L'ENTONNOIR DE POSTHUMUS**

Des auteurs tels que DE MAN (1969) ou encore TANAKA et coll. (1971) ont essayé de relier les réponses du pénétromètre à des grandeurs rhéologiques fondamentales en travaillant respectivement sur des produits laitiers.

Un autre appareil, l'INSTRON (machine universelle de traction - compression) cité par BOURNE (1966 et 1982), commence à être largement utilisé dans les industries alimentaires ; SCHMIDT et coll. (1980) avaient essayer d'évaluer la texture du yaourt avec cet appareil.

Remarque : Les appareils à chute de bille

GALESLOOT (1973) utilise un tel système pour caractériser la "fermeté préagitatoire" du yaourt brassé. BOTTAZI (1976) utilise la chute d'une bille dans un tube en verre pour caractériser un "indice viscosimétrique".
Remarquons à ce propos que le principe de ces appareils est de mesurer le temps mis par une bille pour parcourir en chute libre, une distance donnée dans le liquide étudié. La loi de STOKES qui permet de déterminer la viscosité du fluide par comparaison avec celle d'un liquide témoin, ne s'applique pas içi, car le yaourt brassé a un comportement non newtonien.

2.4 Les mesures d'écoulement

Dans ce cas, il s'agit de mesurer le temps nécessaire à l'écoulement au travers d'un tube, le plus souvent cylindrique, du produit à caractériser. HILKER (1947) a utilisé un système apparenté "LE PLUMMET" pour étudier la consistance de la crème et son application au yaourt a été suggérée. STORGARDS (1964), en utilisant le "SWEDISH FUNNEL" et, DOLEZALEK (1972) ont aussi utilisé un tel principe pour étudier la texture du yaourt brassé.

GALESLOOT et HASSING (1973), par ce procédé, caractérisent la "fermeté postagitatoire" du yaourt brassé, c'est-à-dire la consistance du caillé une fois brassé, et observent que cette méthode est en bon accord avec ce que le consommateur apprécie.

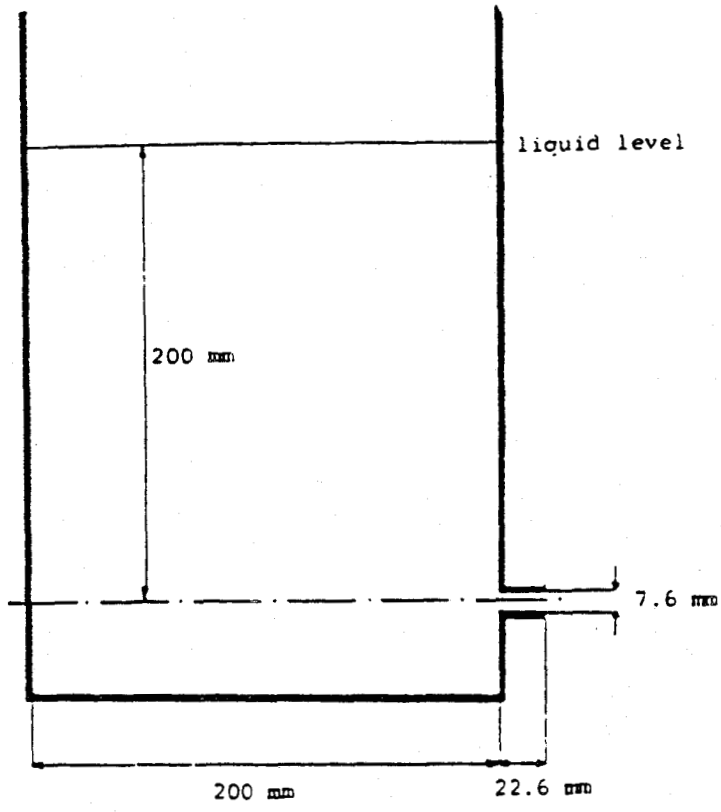


FIGURE 13 : NOUVEL APPAREIL DE HELLINGA ET Coll. (1986) PERMETTANT D'APPROCHER LES CONTRAINTES SUBIES PAR LE YAOURT LORS DE SA CONSOMMATION

Une extension très importante de ce principe a été mise en oeuvre à travers "l'entonnoir de POSTHUMUS"- (POSTHUMUS, 1954) qui constitue pratiquement l'appareil de référence pour l'évaluation de la texture dans l'industrie du yaourt brassé aux Pays Bas (figure **12**). Le yaourt à 7° C empli complètement le récipient de dimensions standardisées et on mesure soit le temps nécessaire jusqu'à l'écoulement complet hors de l'entonnoir, soit encore le temps nécessaire à la récupération d'une certaine masse de produit sur une balance disposée en dessous de l'orifice de sortie.

VAN HOOYDONCK et coll (1984) mettent au point, grâce à cet appareil, un test qui permet d'évaluer les propriétés d'écoulement du yaourt brassé. Les auteurs voient en ce dispositif un grand intérêt du point de vue technologique, car l'entonnoir permet de prévoir la perte de viscosité du yaourt brassé lors de son écoulement dans un tuyau, ceci par la mesure de temps d'écoulement correspondant à des vitesses de cisaillement données.
Plus récemment, HELLINGA et coll. (1986) ont calculé les vitesses et contraintes de cisaillement afférentes à la mesure. Ils ont montré que celles-ci variaient respectivement de 15 à 90 s^{-1} jusqu'à 100 à 500 s-1 et de 100 à 125 Pa jusqu'à 500 Pa du début à la fin de la mesure.

Ceci a pu être montré grâce aux mesures parallèles effectuées à l'aide d'un rhéomètre. Mais, les auteurs ne s'arrêtent pas là, constatant que ces valeurs ne correspondent pas aux travaux de SHAMA et SHERMANN (1973) qui établissent les contraintes subies par le yaourt lors de sa consommation (voir paragraphe 4), ils proposent un nouvel appareil (figure - **13**) qui donne cette fois, une indication empirique dans une gamme de vitesse de cisaillement (10 s-1 à 20 s^{-1}), beaucoup plus proche de celles qui affectent la consommation du yaourt.

2.5 Mesure d'une résistance au cisaillement

L'appareil type correspondant à cette catégorie de mesure est le "viscosimètre BROOKFIELD" type RVT ou RVF (figure 28). Il est très utilisé actuellement dans l'industrie des produits laitiers où il constitue quasiment une référence interne, une norme de texture du yaourt brassé (Cahier des charges SODIMA yaourt brassé - 1985).

Le principe de la mesure est le suivant :
La résistance exercée par le fluide sur le module provoque la tension d'un ressort spiral qui se traduit par le déplacement d'une aiguille sur un cadran. On en déduit alors une valeur appelée "Viscosité Brookfield" qui est calculée en multipliant la valeur de ce déplacement par un coefficient dépendant de la vitesse de rotation et des caractéristiques du module.

Le protocole de mesure impose en outre, une profondeur constante et une lecture en un temps donné.
Il faut insister sur le fait que cette viscosité ne correspond à la viscosité du matériau qu'à la condition qu'il soit de nature newtonienne; dans le cas du yaourt brassé, à comportement plus complexe, l'unité est arbitraire.
Un système "HELIPATH" existe également où simultanément à sa rotation, le module s'enfonce doucement dans le produit, ce système est plutôt utilisé pour le yaourt type ferme.
L'appareil "RHEOVISCO" est conçu sur le même principe, il fournit une lecture digitale qui est directement comparable à celle obtenue sur l'appareil BROOKFIELD.

De nombreux travaux récents sur la texture du yaourt brassé utilisent un tel système, ainsi GUIRGIS (1984) étudie l'effet de la qualité de la poudre de lait ajoutée, LABROPOULOS (1984) étudie l'effet du traitement thermique du lait, SALJI (1985) et SCHMIDT (1985) étudient l'effet de différents facteurs du procédé de fabrication.

2.6 Conclusion

Ce tour d'horizon rapide des plus importantes méthodes empiriques utilisées, permet de se faire une idée de la diversité des voies d'approches de la texture du yaourt brassé. Dans la plupart des cas, les auteurs gardent à l'esprit la nécessité, d'une part, de définir très précisément les conditions expérimentales et, d'autre part, d'essayer de rapprocher les tests mis en oeuvre d'au moins une des conditions réelles qui président à l'évaluation organoleptique de la texture du yaourt brassé (SAUVAGEOT 1977).
Ceci appelle deux remarques, faites à la lumière de la lecture des travaux les plus récents :

- la première, c'est que, de plus en plus souvent, les auteurs (DERVISOGU 1986), mettent en oeuvre au moins deux tests empiriques en parallèle afin d'obtenir deux éclairages complémentaires de la texture du yaourt.

- la deuxième concerne le terme de "test empirique" qui a été utilisé, il faut observer qu'il arrive quelquefois que ce ne soit pas l'appareil qui soit empirique, mais bien son utilisation par l'opérateur. Des travaux montrent en effet que l'on peut utiliser des mesures réalisées par un pénétromètre ou un viscosimètre capillaire (DERVISOGLU, 1986) ou type BROOKFIELD (CHARM 1963) pour approcher par des procédures cependant longues et parfois complexes les grandeurs rhéologiques fondamentales caractéristiques du produit alimentaire. BOURNE et RAO (1977) corrèlent par exemple étalement et plasticité en travaillant sur de la purée.

3 LES PROPRIETES RHEOLOGIQUES DU YAOURT BRASSE

PRENTICE (1972) avait fait le point des données concernant la liaison entre rhéologie et texture de quatre produits laitiers : le lait, la crème, le beurre et le fromage, type Cheddar.

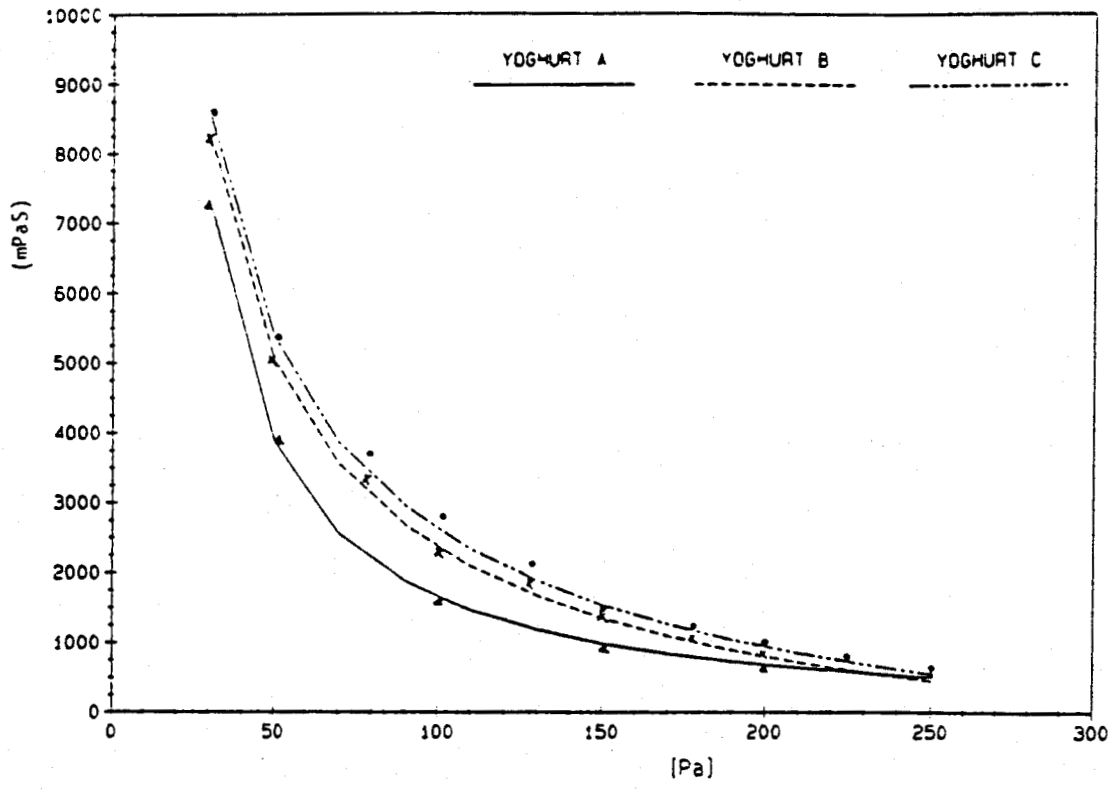


FIGURE 14 : **VISCOSITE APPARENTE EN FONCTION DE LA CONTRAINTE DE TROIS YOGHURTS BRASSES A,B,C**
(d'après HELLINGA, 1986)

Plus récemment, KOKINI et PLUTCHOK (1987), dans un article de synthèse sur les propriétés viscoélastiques des semi-solides alimentaires, soulignent le développement récent de la rhéologie. L'aspect méthodologique de l'article cache en fait des résultats fondamentaux récents concernant par exemple, la consistance du beurre. Mais, il faut convenir que ces produits ont des textures très différentes, par rapport au yaourt brassé tel qu'il a été défini dans le paragraphe I. Pour ce dernier, les propriétés rhéologiques décrites dans la littérature sont plus rares et nous avons essayé de les rassembler ci dessous. Nous discuterons aussi de quelques produits alimentaires non laitiers de texture relativement proche du yaourt brassé.

3.1 Les propriétés visqueuses

. Le comportement visqueux est celui, par définition, du liquide. On définit une grandeur η la viscosité comme le rapport de la contrainte appliquée, notée τ, exprimée en Pascal sur la vitesse de cisaillement, notée $\dot{\gamma}$, exprimée en s-1. Cette définition de la viscosité sous entend qu'il s'agit de viscosité dynamique. Pour certains fluides, la viscosité est une constante, ces fluides ont un comportement visqueux newtonien, citons par exemple le lait (PRENTICE, 1972).

Pour d'autres, elle varie en fonction de la contrainte. Onle définit alors une viscosité apparente, notée η_a. Les variations de viscosité en fonction de la contrainte peuvent être alors modelisées selon différentes lois mathématiques.

Déjà, HODWORTH (1971) citant HIGGS et NORRINGTON (1971) applique sur le lait concentré sucré à 25°C une loi en puissance ($\tau = C.\dot{\gamma}^n$). HELLINGA (1986) (voir figure 14)indique que l'écoulement du yaourt brassé, dans une zone où τ est compris entre 20 et 300 Pa, suit une loi de type HERSCHEL-BULKLEY exprimée par :

$$\eta^* = K + C^* \tau^{n^*}$$

C^* constante de la loi en puissance modifiée, viscosité apparente, mesurée à 175 Pa

n^* paramètre modifié de la loi en puissance, sans dimension.

η^* viscosité apparente

La viscosité apparente du yaourt brassé est alors comprise entre 4 000 et 6 000 mPa.s à 50 Pa. L'écoulement du yaourt est de type rhéofluidifiant n 1.

DE KEE (1983) dans une étude assez complète en utilisant un viscomètre cône/plan "SHIRLEY", applique la loi d'HERSCHEL-BULKLEY sur le yaourt brassé dans une zone ou $1 < \dot{\gamma} < 10^5$ s-1. Afin de situer ces valeurs sur des produits relativement proches, nous pouvons utiliser les travaux de DERVISOGLU et KOKINI (1986) qui, en comparant trois modèles rhéologiques : la "loi en Puissance", la "loi de CASSON", la "loi d'HERSCHEL-BULKLEY" sur le ketchup, la moutarde, la sauce tomate et "l'applesauce" pour des vitesses de cisaillement de 1 à 600s-1, établissent que la loi d'HERSCHEL-BULKLEY s'adapte pour modeliser l'écoulement de ces quatre produits. Ces auteurs indiquent que ces produits semblent présenter un seuil d'écoulement, mais que la confirmation doit être obtenue par l'emploi de rhéomètre à contrainte imposée.

3.2 Les propriétés plastiques

Un matériau est dit plastique s'il peut recevoir des déformations permanentes qui n'apparaissent qu'au delà d'un certain niveau de sollicitation, appelé seuil. Ce seuil d'écoulement, noté τ_0, est homogène à une contrainte et s'exprime en Pascal. Pour ce type de composé, on est amené à définir une viscosité plastique, notée η_{pl}, égale à $\tau - \tau_0 / \dot{\gamma}_{max}$.

DE KEE et coll. (1983) indiquent que le yaourt présente un seuil d'écoulement d'environ 39 Pa. JACQUIN (1986) utilise un rhéomètre "CARRIMED" et l'ajustement automatique selon le modèle d'HERSCHEL BULKLEY pour étudier le yaourt brassé. Les seuils expérimentaux obtenus varient de 7 à 15 Pa.

3.3 Les propriétés élastiques

Un solide est dit élastique s'il tend à reprendre la forme et les dimensions qu'il avait avant une sollicitation, une fois cette sollicitation supprimée.

Lorsque le retour à l'état initial est intégral, on définit l'élasticité complète ; lorsque le retour à l'état initial est instantané, on définit l'élasticité idéale, l'élasticité peut aussi être retardée. On cherche donc à caractériser la résistance à la déformation.

Une contribution importante à la connaissance de ces propriétés pour le yaourt brassé nature et aux fruits a été apportée par ATKIN et SHERMANN (1979). Ils utilisent un système analogue à celui déjà ancien proposé par SCOTT BLAIR (1957), si ce n'est que, dans le tube en U, ont été ajoutéés des aspérités afin d'éviter le phénomène de glissement à la paroi. On mesure le déplacement d'un volume de produit sous pression d'air comprimé, l'auteur calcule ensuite la complaisance de Fluage (déformation/contrainte) du produit en fonction du temps et détermine ainsi l'élasticité instantanée Eo et l'élasticité retardée E1.

Les résultats et discussion montrent que tous les produits ont un comportement viscoélastique quand ils sont soumis à une faible contrainte constante. La déformation du produit décroit quand on ajoute des fruits, avec la quantité d'une part et la grosseur des morceaux de fruits, d'autre part.
Les auteurs donnent un avantage à cette méthode qui permet de mesurer les propriétés rhéologiques de yaourt avec morceaux de fruits, chose que ne peut pas faire un système cône/plateau du fait de l'espace de mesure trop étroit.

Légèrement en dehors de notre investigation, signalons néanmoins que RAMET (1980),KOROLCZUCK (1986) et LEE (1987) en étudiant la coagulation du lait, mettent en évidence des propriétés élastiques du caillé lactique ; KOROLCZUCK (1986), par exemple, utilise une méthode harmonique à l'aide d'un rhéomètre, cône/plan pour caractériser un module de rigidité G' variant de 10-2 à 10^4 mPa.
Enfin, KOKINI et PLUTCHOK (1987), dans un court article de synthèse, soulignent le développement des méthodes viscoélastiques très récentes pour la caractérisation des semi-solides alimentaires.

produit	T°C	matériel/méthodologie utilisés	PROPRIETES RHEOLOGIQUES					Références
			Loi rhéologique	viscosité (mPa.s)	K (Pa.s^n)	n	(Pa)	
lait condensé sucré	25	Viscosimètre cône/plan écoulement	rhéofluidifiant thixotrope	D.A	3,6	0.83	-	HIGGS, NORRINGTON (1971)
yoghurt brassé	25	viscosimètre "Ferranti - Shirley" cône/plan $\dot{\gamma}$ imposée écoulement	modèle HERSCHEL - BULKLEY	η_a = 300 ($\dot{\gamma}$ = 10 s^{-1})	1.86 x 10-1	0,64	env.40	DE KEE (1983)
yoghurt brassé	7	viscosimètre cône/plan τ = 50 Pa, fluage	Loi en puissance modifiée	N = 2500 après 100 sec.	DA	DA	DA	HELLINGA (1986)
yaourts brassés	15	CARRIMED cône/plan, τ imposée.RHEOMAT cylindres coaxiaux, $\dot{\gamma}$ imposé	rhéofluidifiant viscosplastique thixotrope	$1000<\eta_a<4500$ ($\dot{\gamma}$= 10s^{-1})	2,4 K 5,6	0,48 et 0,64	$7<\tau_o<13$	JACQUIN (1986)
laits fermentés	8	HAAKE Rotovisco (8°C) . écoulement . fluage, 70s^{-1}, 10 mn	loi en puissance	70 N 250	0.6 K 4	0.7	DA	SCHELLHASS (1983)
mayonnaise	25	viscosimètre "Ferranti - Shirley" cône/plan imposée écoulement	HERSCHEL - BULKLEY	η_a = 1200 ($\dot{\gamma}$ =10s^{-1})	6.5	0.38	8	DE KEE (1983)
"natural yoghurt"	DA	tube en U contrainte constante (0,4 Pa) déformation de compression	Eo = 0.11x10-4Pa E = 0,13x10-4Pa Viscoélasticité	N = 1.6 x 10^{-2} mPa.s	DA	DA	DA	ATKIN SHERMANN (1979)

TABLEAU 8 : **COMPORTEMENTS RHEOLOGIQUES DU YAOURT BRASSE ET DE QUELQUES PRODUITS ALIMENTAIRES**

D.A. : données absentes ; N : viscosité à l'équilibre - fluage ;
η_a : viscosité apparente - écoulement

3.4 Les propriétés thixotropes

Certains composés peuvent avoir un comportement d'écoulement qui ne dépend pas seulement de la valeur de la sollicitation appliquée, mais aussi du temps pendant lequel, on applique cette sollicitation. Dans ce cas, la viscosité apparente sera fonction des traitements subis par le produit. Ce phénomène se traduit par l'apparition d'une boucle d'hystérésis sur un rhéogramme représentant τ en fonction de $\dot{\gamma}$. Si, après avoir supprimé la sollicitation et laissé le matériau au repos pendant une durée suffisante, on observe à nouveau un phénomène identique, on qualifie le matériau de thixotrope. Bien souvent, la thixotropie peut n'être que partielle.

Ces propriétés sont signalées par RAO (1977) sur le lait condensé sucré, cet auteur reprend les travaux de HIGGS et NORRINGTON (1971) qui avaient déjà quantifié la thixotropie de ce produit. HELLINGA et coll. (1986) mentionnent que le yaourt a un comportement dépendant du temps, mais c'est surtout DE KEE et coll. (1983) qui ont étudié la boucle d'hystérésis du yaourt brassé. Ces auteurs signalent que pour $\dot{\gamma}$ = 50 s-1, le yaourt perd environ 40 % de sa viscosité apparente (à cette même valeur, la mayonnaise étudiée en comparaison, ne perd que 20 %.)

Enfin, JACQUIN (1986) met en évidence la boucle d'hystérésis sur le yaourt brassé mais ne retient pas ce critère pour caractériser le produit, du fait de sa mauvaise répétabilité.

3.5 Conclusion

Peu de travaux ont donc été publiés sur la rhéologie du yaourt brassé, nous avons essayé de les résumer dans le tableau 8. Avant de conclure cette partie consacrée à l'étude rhéologique, nous voudrions reprendre trois remarques faites par PRENTICE (1983) :

la première mentionne qu'il est important de vérifier la répétabilité du protocole de mesure utilisé compte tenu de la complexité du produit et des ajustements mathématiques utilisés.

la deuxième souligne la subjectivité des nombreux paramètres rhéologiques qui sont souvent issus de modelisations, valables dans un certain domaine de sollicitation. L'auteur illustre son propos en établissant un rhéogramme sur une purée de pomme. Selon que l'on utilise une détermination manuelle, un ajustement selon HERSHEL-BULKLEY ou CASSON, le seuil d'écoulement calculé est respectivement de 8 Pa, 22 Pa ou inférieur à 0,5 Pa.

la troisième peut être la plus délicate à appréhender éclaire le problème de l'interaction permanente réelle qui existe entre le comportement du produit et le choix de la méthode de mesure. Or, bien souvent, il faut connaître le comportement pour appliquer la méthode à laquelle on demande de modéliser le comportement du produit !!

4. L'EVALUATION SENSORIELLE DE LA TEXTURE

La définition de la texture reprise dès notre introduction et proposée par SZCZESNIAK (1973) fait explicitement référence aux organes des sens. Parmi l'odorat, le goût, l'audition, la vue et le toucher, il semble à priori que ce sont la vue mais surtout le toucher qui concernent le plus directement l'évaluation de la texture. Il faut néanmoins signaler qu'il existe d'une part, des interactions entre la texture et la flaveur (KOKINI, 1985) et d'autre part, que l'audition peut jouer dans une moindre mesure un rôle (songeons par exemple aux sons que provoquent le "craquement" des grains sous la dent dans un yaourt aux céréales).

Le premier sens mis en jeu pour évaluer la texture et d'abord l'apparence du produit est bien la vue (BOURNE, 1977). La forme, l'aspect du produit sont des premières indications de sa texture au sens large et non plus seulement rhéologique du terme. On verra en effet un yaourt trop liquide couler, déborder d'une petite cuillère.

Mais la texture est essentiellement l'affaire du toucher, réponse du sens tactile au stimulus physique qui résulte du contact entre le produit et un endroit du corps (BOURNE, 1977) par l'intermédiaire ou non d'un instrument.

A ce propos, le terme de "sensibilité kinesthésique" a été introduit par KRAMER (1973). SAUVAGEOT (1982) la juge fondamentale puisque c'est elle qui, par les mouvements de la main, pour appuyer, tourner, couper et de la machoire lors de la formation du bol alimentaire permet ainsi la perception de la texture du produit. La sensibilité kinesthésique met en jeu de plus des terminaisons nerveuses réceptrices variées du tissu cutané, des tissus plus profonds tels les ligaments articulaires.

Le principe de base de l'évaluation sensorielle de la texture défini par SZCZESNIAK (1963) repose sur le fait que la texture est composée d'un certain nombre de sensations différentes.

Par ailleurs, il s'agit d'un procédé dynamique où interviennent la contrainte, le temps, la température et l'influence de la salive. L'évaluation sensorielle est donc une méthode d'étude de la texture qui possède une méthodologie propre. Classiquement, pour la mettre en oeuvre,en plus du rôle particulier lié au local d'évaluation, on a l'habitude de préciser trois aspects fondamentaux et particuliers : les descripteurs utilisés, le type d'épreuve choisie et le jury d'évaluation. En respectant ce plan, voyons ce qui a été fait dans le cas du yaourt brassé.

4.1 Les descripteurs

Il faut d'abord mentionner la difficulté d'une recherche de descripteurs génériques communs aux différents auteurs, ceci tient d'abord à la diversité des languages, des cultures et des produits eux-mêmes qui, sous une même appellation, peuvent varier considérablement d'un pays à l'autre.

Cependant, SZCZESNIAK (1979) en comparant trois études, une japonaise (YOSHIKAWA,1970), une américaine, (SZCZESNIAK et KLEYN, 1963), et cubaine (DE HOMBRE, 1978), résume les termes les plus cités dans la description de la texture qui sont dans l'ordre décroissant : "hard" (dur), "soft" (mou), "juicy" (juteux), "chewy" (difficile à mâcher), "greasy" (gras), "viscous"(visqueux), "slippery" (glissant), "creamy" (crémeux). L'auteur japonais utilise une méthode d'analyse multifactorielle pour réduire un espace de 40 descripteurs de la texture à 8 axes essentiels : "hard/soft" (dur - mou), "cold/warm" (froid/chaud), "oily-juicy" (aqueux/juteux), "elastic-flaky" (elastique/flasque), "heavy" (lourd), "viscous" (visqueux) "smooth" (lisse) et "gummy" (gluant). Déjà en 1971, HENRY avait réduit 15 termes descriptifs de la texture en 4 termes essentiels.

Dans une étude plus récente, KOKINI (1977), sur des solutions de gomme et de semi-liquides alimentaires en particulier le lait, la crème, les crèmes glacées, réduit un espace de 12 descripteurs en 3 termes essentiels : "thick" (épais), "smooth" (lisse) et "slippery" (glissant).

L'évaluation en bouche de la texture est aussi précisée par SZCZESNIAK (1979) et CUTLER (1983) qui définit et relie l'aspect épais en bouche avec la viscosité en bouche. WOOD (1974) définit quant à lui, l'aspect velouté, onctueux sur des soupes additionnées d'agents de texture par opposition à des textures soit visqueuses ou courtes. Sur le yaourt lui-même, ce sont les travaux de SHAMA et SHERMANN (1973) qui distinguent très clairement méthodes "non orales" et méthodes "orales". DUTHIE (1977) propose une fiche de notation générale de la "consistance" du yaourt en trois points. SCHELLHASS (1983) définit le terme "ropy" (filant), PARNELL - CLUNIES (1986) définit les aspects ferme et granuleux.

O NEIL (1979) définit les termes : "curdy" (aspect caillé), "grainy" (granuleux), "lumpy" (grumeleux) "weak" ("molle") "too firm" (trop ferme). JACQUIN (1986) met en oeuvre des techniques d'analyse factorielle des correspondances pour réduire une liste de 19 descripteurs préalablement fournie au jury et selectionner en final 4 termes : épais, lisse, filant, et dans une moindre mesure, glissant. Les termes "crémeux" et "onctueux" sont souvent utilisés par le jury, mais s'avèrent peu discriminateurs.

En conclusion, rappelons que la méthode maintenant communément admise d'élaboration des profils sensoriels, comporte 4 phases distinctes :

- l'élaboration d'une liste de descripteurs par jury,
- la réduction de cette liste,
- l'apprentissage du jury, avec introduction de références,
- la production et utilisation de profils à descripteurs indépendants.

4.2 Le jury

Deux pratiques différentes sont mises en oeuvre à ce niveau. La plupart des auteurs utilisent pour juger les caractéristiques de leurs produits des "spécialistes" travaillant dans le laboratoire où ont lieu les évaluations. Le nombre de ces juges est alors très variable. Ainsi, pratiquent par exemple O NEIL (1979) qui utilisent 3 juges entrainés, ou JACQUIN (1986) qui fait appel à un jury de 19 personnes. Mais nombreux sont ceux qui font appel à des panels plus larges, constitués de consommateurs non spécialistes à priori du produit qu'ils évaluent, ainsi pratiquent CUTLER (1983) et SHAMA et SHERMANN (1973).Ces derniers font appel à 26 étudiants et professeurs après avoir néanmoins montré que les réponses obtenues selon que l'on s'adresse à un jury spécialisé ou à des "maitresses de maison" volontaires étaient similaires.

La caractéristique n'est pas indiquée	La caractéristique est indiquée
épreuve triangulaire	- épreuve 2/5
duo/trio	- épreuve de classement (ranking) par paire.
A/non A	Blocs incomplets équilibrés
	- épreuve de classification et cotation
	- épreuve de notation
	. d'intervalle échelle structurée ou non structurée
	. magnitude - estimation (note de référence, valeurs proportionnelles).

Tableau 9 : **CLASSIFICATION DES DIFFERENTES METHODES D'EVALUATION SENSORIELLE (SAUVAGEOT, 1982)**

Signalons que ce dernier point est discuté par SAUVAGEOT (1982) qui pose le problème de la variation individuelle à la stimulation sensorielle. Sans régler la question et en insistant sur l'aspect formation qui est nécessaire, l'auteur, en citant PINET (1982), précise qu'il est préférable de réserver le terme "panel" à un groupe qui, sur des périodes successives, répond aux mêmes questions et réalise les mêmes tâches. La fonction du groupe dans ces conditions s'assimile parfaitement à celle d'un instrument de mesure.

4.3 L'épreuve

L'épreuve d'évaluation sensorielle constitue en fait le lien entre le produit et le juge. Le choix de l'épreuve et la qualité de sa mise en oeuvre conditionnent donc l'appréciation portée sur le produit. Divers types d'épreuves sont aujourd'hui utilisés pour juger de la texture et si l'on reprend la classification pragmatique adoptée par SAUVAGEOT (1982), tableau 9 , on observe que l'évaluation de la texture consiste la plupart du temps, à évaluer une ou plusieurs caractéristiques indiquées par un ou plusieurs descripteurs préalablement définis.

4.3.1 Les épreuves de classification et de cotation

C'est dans cette catégorie que peuvent se ranger l'épreuve descriptive et en particulier, les épreuves de type profil "TEXTURE PROFILE" (SZCZESNIAK, 1963) qui consistent en fait à placer le produit dans la bonne catégorie. Les épreuves de classement, et en particulier l'épreuve par paire est très facile à pratiquer et peut être très efficace. SHAMA et SHERMANN (1973) ont utilisé, cette technique pour identifier les stimuli contrôlant l'évaluation sensorielle de la viscosité.

4.3.2 Epreuve de notation

Remarquons que si le sujet est invité à noter, l'épreuve descriptive devient alors épreuve de notation. Elles sont utilisées par WOOD (1974) pour noter sur quatre points les aspects "creamy" et "slimy", par CUTLER (1983) pour son étude sur les relations "viscosity" - "thickness". Dans ces épreuves, le juge doit attribuer une note selon une échelle qui lui est proposée, les intervalles entre chaque barreau de l'échelle sont considérés comme égaux et non structurés. Parfois, aucun "barreau" n'est explicitement défini. Les échelles utilisées sont le plus souvent à 7 ou 9 points (SAUVAGEOT 1983).

4.3.3 Epreuve "magnitude - estimation"

Enfin, l'épreuve d'estimation de la grandeur "magnitude estimation" consiste à estimer une variable de rapport, proportionnelle à l'intensité perçue. Elle est encore peu utilisée pour l'évaluation des denrées alimentaires malgré les travaux de MOSKOWITZ (1974). On mentionnera cependant l'importante application qu'en a faite KOKINI (1977).

Pour la plupart de ces épreuves, le support utilisé est un questionnaire individuel sur papier qui constitue la fiche d'évaluation sensorielle du produit à analyser.

Dernièrement, des systèmes informatisés ont été développés où le juge traduit sa perception par l'intermédiaire d'une console micro-informatique, le système SENSTEC développé par le groupe TECATOR et le NINF (Institut Norvégien de Recherche en agro-alimentaire) ou le système ACTIS mis au point par la SSHA (Société Scientifique d'Hygiène Alimentaire)en sont deux exemples. La rapidité du traitement de l'information permise par ces systèmes devrait permettre de voir se développer les techniques d'évaluation sensorielle pour des produits complexes à multiples descripteurs.

Enfin, très récemment, EVES et KILCAST (1987), décrivent un appareil Electromyographique (EMG) qui permet l'enregistrement de signaux reliés directement à la texture de l'aliment qui est mâché et avalé. Ces auteurs montrent pour le yaourt et le fromage frais qu'il existe une corrélation entre le logarithme de l'aspect épais et le logarithme d'un des signaux obtenu par EMG.

4.3.4 Conclusion

Le choix de l'épreuve est important. Ainsi, selon que l'on utilise une échelle de notation ou une échelle de rapport, la relation observée entre l'intensité de la sensation et l'intensité du stimulus est différente : logarithmique dans le premier cas, de puissance dans le second cas (SAUVAGEOT, 1982).

L'évaluation sensorielle est donc une méthode qui nécessite la mise en oeuvre d'une méthodologie propre et de quelques règles de base simples; parmi ces dernières, l'homogénéité des échantillons et l'anonymat de leur présentation sont fondamentales. Elle reste une procédure coûteuse en temps et assez lourde à mettre en oeuvre pour être bien conduite. C'est une des raisons pour laquelle de nombreux travaux ont été réalisés afin de relier l'évaluation sensorielle aux diverses approches instrumentales tant empiriques que rhéologiques.

5.- LES RELATIONS ENTRE MESURES INSTRUMENTALES ET SENSORIELLES DE LA TEXTURE

Dans un récent article de synthèse sur le sujet, SZCZESNIAK (1987) indique quatre raisons essentielles qui motivent les travaux dans ce domaine :

1) le besoin d'instruments de contrôle qualité,

2) le désir de prévoir la réponse du consommateur,

3) le besoin de comprendre ce qui est perçu pendant l'évaluation sensorielle de la texture,

4) la nécessité de développer des méthodes instrumentales améliorées qui, en final, devront simuler l'épreuve sensorielle.

Sur les produits semi-liquides, les travaux de KOKINI (1985) et CUTLER (1983) ont dernièrement apportés une intéressante contribution. Plus précisément sur le yaourt brassé, les travaux de SHAMA et SHERMANN (1973) sont souvent pris en référence.

Nous nous sommes efforcés de faire le point sur cette question, en adoptant une classification par famille de descripteurs.

5.1 Perception non orale

"Viscosité"

SHAMA et SHERMANN (1973) ont demandé au jury de juger la viscosité du produit. Ils ont montré pour des produits alimentaires rhéofluidifiants, dont le yaourt brassé, que, lorsqu'on incline doucement un pot de yaourt le stimulus est la vitesse de cisaillement, développée pour des contraintes données variant de 10 à 100 Pascal, selon les caractéristiques d'écoulement du produit. Par contre, lorsqu'on brasse doucement le yaourt avec une cuillère, le stimulus associé à l'évaluation de la viscosité est la contrainte (de 3 à 1000 Pa) développé pour une vitesse de cisaillement de 100 s-1 constante.

Aspect épais

JACQUIN (1986) étudie le yaourt brassé et demande de juger de l'aspect épais "qui a de la consistance, s'oppose à fluide". Elle met en évidence qu'il existe un coefficient de corrélation r = 0.92 entre la vitesse de cisaillement à 129 s-1 et l'aspect épais.

Aspect filant

JACQUIN (1986) fait juger l'aspect filant "qui coule lentement sans se diviser et s'allonge en un fil continu" et indique qu'il serait relié (r = 0.60) à un paramètre d'étalement mesuré au CENCO, mais la définition adoptée fait penser aussi à la notion de fluidité et l'auteur reste très prudent.

5.2 Perception orale

Consistance, "Viscosité", Aspect épais

Les premiers travaux de mise en relation de la sensation en bouche et des propriétés rhéofluidifiantes ont été effectuées par SZCZESNIAK et FARKAS (1962) puis STONE et OLIVER (1966) sur des solutions de gomme xanthane, puis WOOD (1968) a montré que la perception de la consistance pour des produits alimentaires non newtoniens est reliée au stimulus physique par une loi en puissance. SHAMA et SHERMANN (1973) ont établi les conditions d'écoulement régnant dans la bouche pour des produits alimentaires complexes. Pour des produits liquides, le stimulus serait la vitesse de cisaillement développée à une contrainte constante d'environ 10 Pa, cependant que pour les produits plus visqueux, le stimulus serait la contrainte développée pour permettre un écoulement constant du produit estimé à 10 s-1. Ainsi, ils démontrent que le stimulus sensoriel dépend des propriétés d'écoulements du produit lui- même.

CUTLER et coll. (1983) en travaillant sur des systèmes modèles et des produits alimentaires, confirment qu'une large plage de vitesse de cisaillement est utilisée pour la perception en bouche de l'aspect épais, ils discutent la méthodologie de l'épreuve par paire et les relations mises en avant par les deux auteurs précédents et indiquent que les viscosités mesurées à 10 s-1 sont bien corrélées avec l'épaisseur perçue en bouche de la plupart des fluides. Enfin, ils observent que pour des échantillons qui montrent un comportement rhéofluidifiant marqué, l'épaisseur perçue est surtout fonction de la viscosité à basse vitesse de cisaillement.

En 1985, KOKINI relie l'épaisseur et la contrainte de cisaillement sur la langue. Pour déterminer cette contrainte de cisaillement, il utilise la loi en puissance pour des produits tels que les crèmes concentrées et détermine expérimentalement une bonne relation entre évaluation sensorielle de l'épaisseur et contrainte de cisaillement. Pour des produits dépendants du temps, il utilise la relation de LEIDER et BIRD (1974). Il donne des de 5 à 9 s^{-1} pour aliments épais tels que la margarine.

Dans son travail sur le yaourt brassé, JACQUIN (1986) bien que ne précisant pas toujours les descripteurs utilisés pour la perception orale, trouve une vitesse de cisaillement de 129 s-1 comme étant celle la mieux corrélée avec les aspects épais, consistant et même collant.

Aspect collant

Les contributions de MORRIS et coll (1983) sur des solutions de polysaccharides, mondrent qu'il existe une bonne relation entre les aspects épais et collant. Cependant, CUTLER (1983), s'il vérifie le principe de cette corrélation pour quelques produits semi-liquides alimentaires, relèvent la déviation qui existe pour des produits qui présentent des particules structurées.

Aspect lisse

Pour KOKINI (1977,1986), l'aspect lisse est à mettre en relation (magnitude estimation) avec l'inverse d'un coefficient de friction qui est proportionnel à la vitesse et à la force.

Pour JACQUIN (1986), l'aspect lisse semblerait en première approche, lié à la surface de thixotropie mesurée par un rhéomètre CARRIMED.

Aspects velouté, onctueux, visqueux, filant, gluant

WOOD (1974) fait évaluer sensoriellement des soupes contenant différentes proportions d'agents épaississants. Les viscosités de chacune des soupes étant constantes et égales à environ 100 mPa.s = à 50 s-1, il constate que les réponses sensorielles sur les aspects "slimy" (gluant) et "creamy" (velouté, onctueux) sont très différentes. Pour obtenir un certain caractère velouté, il faut un certain degré de caractère visqueux.

L'auteur montre de plus qu'il existe une relation entre l'exposant de la loi en puissance modelisant l'écoulement des soupes et l'aspect visqueux pour des produits à viscosité plus élevée (200 mPa.s à 50 s-1). Ceci avait déjà été étudié par SZCZESNIAK et FARKAS (1962) qui avait montré sur des solutions de polysaccharides que l'aspect gluant était lié à l'exposant de la loi en puissance. Plus la valeur était élevée, plus la solution était visqueuse, voire gluante.

KOKINI et Coll. (1984) quant à eux, relient le descripteur creaminess (aspect onctueux) à une combinaison des descripteurs épais et lisse.

JACQUIN (1986), sur le yaourt brassé, observe par analyse factorielle des correspondances, la proximité entre un critère d'étalement (CENCO), l'exposant n de la loi en puissance ajusté sur la partie retour du rhéogramme et le descripteur filant, mais les coefficients de corrélations linéaires ne sont pas significatifs.

Aspect glissant

Selon KOKINI (1987), l'aspect glissant est lié simultanément à des propriétés de viscosité et à des propriétés de frictions.

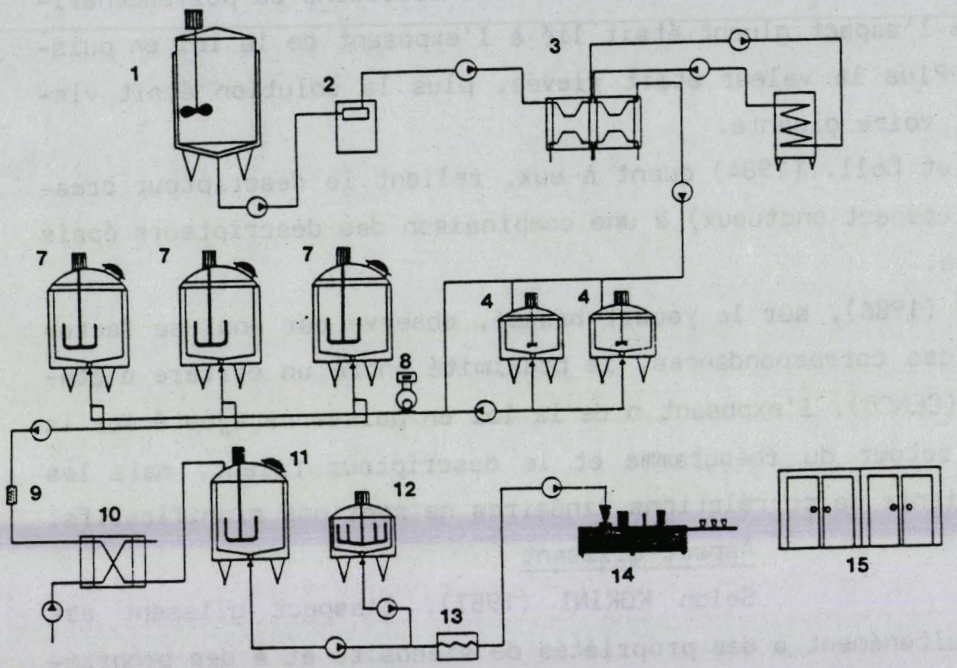
5.3 Conclusion

En conclusion de cette partie, il nous semble indispensable à nouveau de reprendre les remarques de SZCZESNIAK (1987) qui met en garde contre les dangers qui affectent toute étude de corrélation entre mesures instrumentale et sensorielles. Trois sources d'erreurs possibles sont à surveiller :

- la similarité entre les conditions physiques des 2 types de mesure ; c'est-à-dire, qu'il faut s'attendre à obtenir de bien meilleures corrélations si les niveaux de contraintes de déformations instrumentales et sensorielles sont comparables, même si la mesure instrumentale n'intègre pas en général, l'effet des hautes températures et surtout de la salive.

- l'hétérogénéité du produit traité, par nature, un produit alimentaire est un matériau complexe donc variable, la portée d'un coefficient de corrélation établie sur une série de mesures doit être vérifiée.

- la précision du descripteur utilisé et le type d'épreuve sensorielle utilisée.



1. Cuve de Préparation de la base laitière.
2. Homogénéisateur.
3. Pasteurisateur à plaques.
4. Cuve de levains.
7. Cuves de Fermentation du yaourt.
8. Pompe.
9. Filtre (pour éliminer les grains de caillé).
10. Refroidisseur à plaque.
11. Cuve de stockage du yaourt.
12. Cuve de stockage des Fruits.
13. Mélangeur statique.
14. Machine de conditionnement.
15. Tunnel de refroidissement et chambres froides.

FIGURE 15 : **SCHEMA DE PRODUCTION DU YAOURT BRASSE**

modifié d'après TAMIME et ROBINSON, 1984,

III : REVUE DES PARAMETRES DE FABRICATION QUI AFFECTENT LA STRUCTURE ET LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE

1.- INTRODUCTION : LE PROCEDE INDUSTRIEL DE FABRICATION DU YAOURT BRASSE

La fabrication industrielle du yaourt brassé fait appel aujourd'hui à un procédé hautement mécanisé et automatisé, capable de produire l'équivalent de 12 000 pots/heure de yaourts natures, pulpés ou aux fruits. LUQUET (1987) a dressé un inventaire des principaux procédés de fabrication du yaourt brassé selon les pays. Dans les usines du groupe SODIMA, la fabrication du yaourt brassé de marque "CARESSE" est régie par un cahier des charges qui spécifie les paramètres des différentes étapes du procédé de fabrication.

Le diagramme général de production présenté dans la figure 15 peut être séparé en trois grandes phases regroupant chacune plusieurs opérations unitaires.

- la préparation des matières premières et leurs traitements avant fermentation.
- la phase de fermentation en cuve après ensemencement par les bactéries lactiques.
- les opérations technologiques post-fermentaires de brassage, soutirage, prérefroidissement, conditionnement, réfrigération puis stockage.

Nous allons dans cette troisième partie reprendre les travaux traitant des effets de la matière première, des ferments et des paramètres technologiques de fabrication sur la texture du yaourt brassé.

Pour cela, nous suivrons le plan suggéré par le tableau **10** qui dresse la liste de ces facteurs dans l'ordre chronologique où ils interviennent dans le procédé de fabrication.

1ère phase : Les matières premières et leur préparation

Matières premières

1. Qualité du lait de départ (extrait sec, matières azotées, matière grasse, lactose, taux de sucre, minéraux.
2. Mode d'enrichissement en E.S.T. (poudrage ou concentration par évaporation, osmose inverse, ultra-filtration.
3. Temps d'hydratation de la poudre.
4. Qualité de la poudre de lait ajoutée.

Préparation

1. Charge thermique lors du traitement thermique.
2. Pression et température d'homogénéisation.
3. Température et cinétique de refroidissement du lait.
4. Désaération du lait (teneur en O_2 résiduel).

2ème phase : Fermentation

Ferment

1. Type de souche utilisée.
2. Rapport S. thermophilus / L. bulgaricus.
3. Traitement subi par le ferment.

Levain

1. Composition.
2. Temps de fermentation.
3. Acidité finale du levain.
4. Conditions de conservation.

Fermentation du yaourt en cuve

1. Taux d'ensemencement et conditions.
2. Températures de culture.
3. Acidité finale.
4. Agitation - Aération.

3ème phase : Les opérations post-fermentation

1. Traitement mécanique après maturation : (brassage - décaillage).
2. Traitement mécanique après soutirage : (échangeur - pompe tuyauterie).
3. Procédé de conditionnement.
4. Cinétique de refroidissement après conditionnement.
5. Durée et température de stockage.
6. Agitation - vibrations pendant le transport.

TABLEAU 10 : **LISTE DES FACTEURS DU PROCEDE DE FABRICATION POUVANT AFFECTER LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE**

Cause of Changing Milk Quality	Consistency of Yoghurt
Stage of lactation:	
Early lactation	Less firm
Late lactation	Firmer
Mastitis	Possibly weaker
Protective vaccination against mouth and claw disease	Less firm
General sickness	Possibly less firm
High bacterial content (acid milk)	Sandy coagulation
Feeding (changed milk composition)	More or less firm

TABLEAU 11 : QUALITE DU LAIT ET CONSISTANCE DU YAOURT (d'après RASIC et KURMAN 1978, p.142)

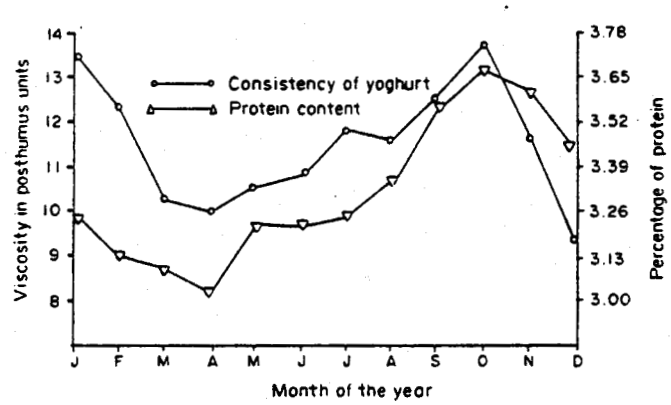


FIGURE 16 : RELATIONS ENTRE LE TAUX DE PROTEINES ET LA CONSISTANCE DU YAOURT PENDANT L'ANNEE

N° de l'essai	Teneur en matière grasses du lait en %	Mesure de la consistance		Examen organoleptique	
		temps d'écoulement en s	profondeur de pénétration	consistance	goût
1	0,05	18,0	27,9	3,4	4,3
	1,1	21,3	19,4	4,0	4,4
	2,5	31,5	6,5	4,4	4,9
	3,9	38,5	2,1	4,9	4,9
2	2,7	25,0	12,8	4,2	4,4
	3,5	28,9	7,4	4,5	4,4
	3,8	28,3	6,6	4,7	4,1
	4,3	32,5	4,0	4,9	3,9

TABLEAU 12 : INFLUENCE DE LA TENEUR EN MATIERES GRASSES DU LAIT SUR LA CONSISTANCE ET LE GOUT DU YOGHOURT BRASSE

2.- LES MATIERES PREMIERES ET LEUR PREPARATION

2.1 La qualité du lait et de la base laitière

RASIC et KURMAN (1978,p.142) mettent en relation (tableau 11) la qualité du lait et la consistance du yaourt.

TAMIME et DEETH (1980) s'appuient sur de très nombreux auteurs pour confirmer qu'une augmentation du taux de matière sèche augmente la consistance du yaourt. CASALIS (1975) avait néanmoins signalé qu'un renfort de matière sèche par ajout de poudre de lait à un taux supérieur à 5 % peut favoriser des fractures du caillé et la synérèse. CHALET-WAGNER (1979) a montré que l'effet d'une augmentation d'extrait sec dégraissé pouvait se traduire par des augmentations de viscosité du yaourt, mais qui étaient différentes suivant le type de ferment utilisé. SALJI (1985) remarque qu'une augmentation de 11 à 12 % de l'extrait sec total multiplie par 5 la viscosité mesurée, mais n'entraine pas de différence significative en évaluation sensorielle.

L'augmentation de l'extrait sec du yaourt est très généralement obtenu par un enrichissement de la fraction protéique de la base laitière.

* Les matières azotées

RASIC et KURMAN (1978,p.154) et TAMIME et ROBINSON (1984,p.22) reprennent de nombreux travaux qui observent que la consistance du yaourt est augmentée du fait d'une plus grande richesse en protéines (figure 16).

* Matière grasse

MARTENS, (1972) signale que, plus la teneur en matière grasse est élevée, plus le yoghourt brassé est visqueux et épais (tableau 12). Ce point est aussi signalé par DOLEZALEK et coll.- (1972).

* Matière minérale

CASALIS, (1975) met en relation les teneurs en minéraux calcium, potassium, phosphore et la consistance du yaourt. Une teneur élevée en sels minéraux et en particulier en potassium favorise la fermeté du caillé, mais des concentrations trop fortes entrainent une synérèse. CHALET-WAGNER (1979) a noté, pour 6 ferments sur 8, une augmentation de viscosité du yaourt brassé sous l'effet d'un ajout du 2 g/l de chlorure de calcium ; à 4 g/lla viscosité diminuait pour les 8 types de ferments étudiés.

2.2 Mode d'enrichissement en matières sèches et/ou en protéines

Trois opérations sont utilisées afin d'augmenter la concentration en matière sèche non grasse.

- l'addition de poudre de lait écrémé de 1 à 6%
- la concentration par évaporation de 10 à 25 % de l'eau, ce qui équivaut à une augmentation de 2 à 4 % de matière sèche (TAMIME et ROBINSON, 1984 p.19).
- la concentration par filtration sur membrane selon deux procédés l'osmose inverse (R.O.), l'ultrafiltration (UF).

(a)- l'addition de poudre de lait écrémé

Le taux optimum semble être de 3 à 4 %, un taux supérieur peut entrainer des effets néfastes sur le goût (TAMIME et ROBINSON, 1984, p.17). La qualité de la poudre ajoutée est importante, il est préférable d'utiliser des poudres à reconstitution instantanée qui ont la meilleure solubilité (RASIC et KURMAN, 1978, p.154). Cette méthode est très utilisée en France.

(b)- concentration par évaporation

Méthode couramment pratiquée en Angleterre et aux U.S.A., elle a lieu en général sous pression et présente l'avantage d'éliminer l'air enfermé dans le lait, ce qui améliore la stabilité du yaourt (GRADHAGE, 1978). RASIC et KURMAN (1978,- p.161) ont dressé un tableau qui permet de faire correspondre le pourcentage d'eau évaporée et le taux de matière sèche du lait.

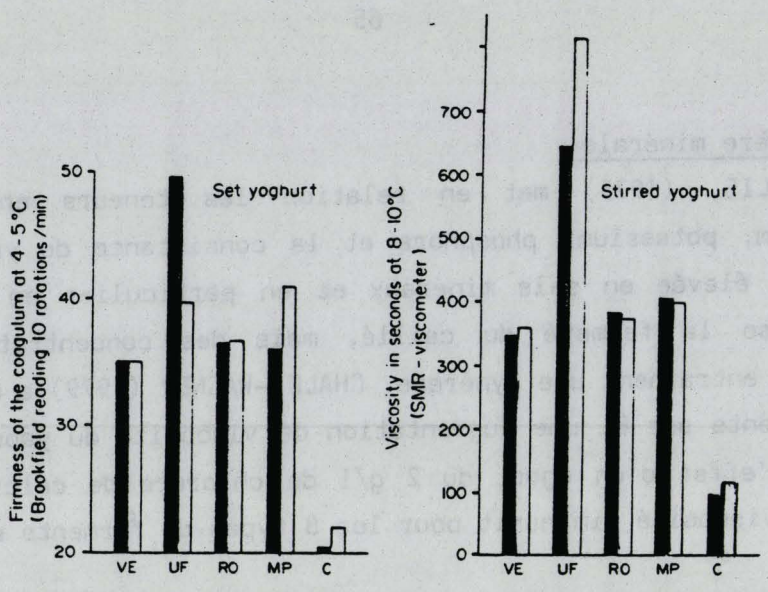


FIGURE 17 : **VISCOSITE DE YAOURTS BRASSES FABRIQUES A PARTIR DE LAIT CONCENTRE OU ENRICHI SELON DIFFERENTES METHODES**
(d'après ABRAHAMSEN HOLMEN, 1980)

VE - évaporation ; UF - ultrafiltration ; RO - osmose inverse ;
MP - addition de poudre ; C - témoin (lait)

▮ : après 1 jour à 4°C ▯ : après 14 jours à 4°C

property	Age/Type of yoghurt	Treatment of milk RO	UF	VE	MP
Body/ Consistency	Stirred (1 day)	4,6	4,8	4,8	4,7
	(14 days)	4,6	4,4	4,6	4,6
	Set (1day)	4,6	3,9	4,8	4,4
	(14 days)	4,0	4,0	4,4	4,1
Flavour/ Aroma	(1day)	4,35	3,7	4,7	4,25
	(14 days)	3,9	3,5	3,9	3,9

(all scores out of 5)

FIGURE 18 : **CONSISTANCE JUGEE PAR EVALUATION SENSORIELLE DE YAOURTS BRASSES OBTENUS SELON DIFFERENTES METHODES**

(d'après ABRAHAMSEN et HOLMEN, 1980)

(c)- <u>les concentrations par ultrafiltration ou osmose inverse</u>

Ces techniques, plus récentes, ont lieu en général à température ambiante.

* rapidement décrits, les deux procédés diffèrent par les principes suivants (TAMIME et ROBINSON,1984, p.19) :

- le procédé par osmose inverse sépare les molécules de bas poids moléculaire (inférieur à 500) et l'eau, des composés organiques et des ions inorganiques. Il s'opère à de fortes pressions 2 à 10 MégaPascal. Le perméat est constitué essentiellement d'eau.

- le procédé par ultrafiltration sépare les constituants du lait, la membrane retient les molécules de poids moléculaire élevé (supérieur à 1000) ; les pressions opérantes sont plus faibles (0.1 à 1 mega.Pa. Le perméat contient l'eau mais aussi le lactose, les sels minéraux et les vitamines.

Par UF, on concentre le lait jusqu'à 18 à 20 % de matières sèches ce qui peut même éviter le recours à l'homogénéisation. GLOVER et coll.(1978) proposent une synthèse de leurs applications dans l'industrie laitière. JEPSEN (1979) mentionne leur utilisation en conditions industrielles de fabrication du yaourt.

ABRAHAMSEN et HOLMEN (1980) ont comparé les propriétés de texture du yaourt brassé issu de quatre procédés différents d'enrichissement en extrait sec : l'osmose inverse (RO), l'ultrafiltration (VF), l'évaporation (VE) et l'addition de poudre de lait écrémé (MP). La composition chimique et la viscosité des yaourts obtenus est donnée dans les figures 17 et 18. Les conclusions sont les suivantes :

- le yaourt ultrafiltré possède la viscosité la plus élevée.

Measurement of consistency/viscosity of yoghurt	Heat treatment of milk for 30 minutes at 70°C A	70°C B	78°C A	78°C B	86°C A	86°C B	95°C A	95°C B
Falling sphere (depth in cm)	3.0	> 15.0	1.5	10.5	1.2	6.0	1.2	2.7
Posthumus funnel (time in seconds)	9.0	5.0	14.0	7.5	17.0	8.5	18.7	9.0

"Falling Sphere"—The deeper the sphere sinks into the yoghurt, the thinner is the product.
"Posthumus Funnel"—The longer the time required for the yoghurt to pass through the funnel, the more viscous is the product.
A—Homogenised milk.
B—Non-homogenised milk.

FIGURE 19 : EFFET DE L'HOMOGENEISATION ET DE TRAITEMENT THERMIQUE SUR LA CONSISTANCE ET LA VISCOSITE DU YAOURT

(d'après GALESLOOT, 1978)

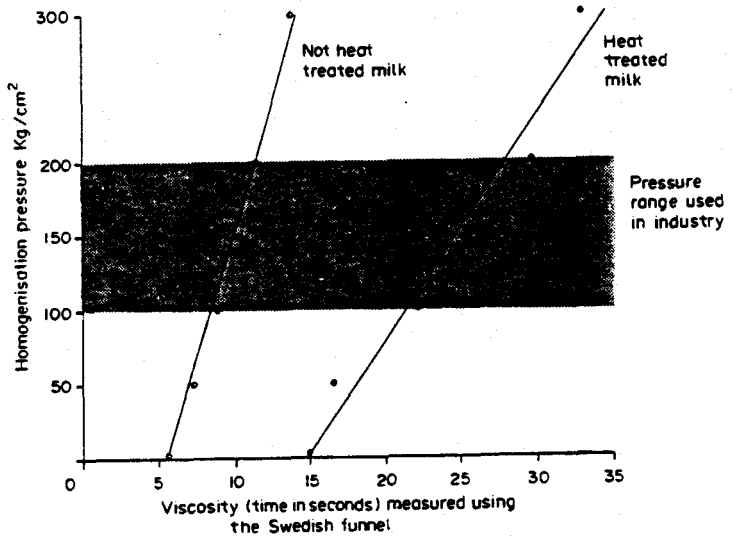


FIGURE 20 : EFFET DE LA PRESSION D'HOMOGENEISATION SUR LA VISCOSITE DU LAIT FERMENTE

(d'après STORGARDS, 1964 et TAMIME et ROBINSON, 1984)

- cette appréciation instrumentale n'est pas confirmée par l'évaluation sensorielle et le yaourt préparé par évaporation est équivalent du point de vue texture, il présente une meilleure flaveur, il est, en définitive, préféré.

De manière générale, du point de vue texture et qualité du produit, les différentes méthodes utilisées sont comparables.

2.3 L'homogénéisation

Elle a pour but de favoriser l'émulsion de la phase lipidique dans la phase aqueuse. Elle est mise en oeuvre selon un couple pression-température. (100 à 200 kg/cm^2 et 50 à 70°C) dont les conséquences sur la texture du yaourt ont été relativement bien étudiées. STORGARDS (1964) a montré l'augmentation de la viscosité quand la pression augmente (figure **20**). GALESLOOT (1978) avait nettement montré l'influence positive d'une augmentation de température au moment de l'homogénéisation (figure **19**).

HYLMAR (1974) étudie les pressions de 4,9 MegaPa à 24.5 MegaPa et retient comme optimale la pression de 19.6 Mega.Pa à 60°C. CASALIS (1975) conseille un barème de 200 kg/cm^2 de pression et de 85°C de température.

Sur les composés structuraux, l'homogénéisation augmente l'hydrophylie des globules gras, augmente la stabilité des caséines et contribue à la dénaturation des protéines de sérum. RASIC et KURMAN (1978,p.163) reprennent les différents travaux sur le sujet et insistent sur la double application de l'homogénéisation, selon que l'on s'adresse à la matière grasse ou aux protéines.

En définitive, ils recommandent différents couples pression-température, selon le type de procédé utilisé. Enfin, ces auteurs citant PETTE et LOKEMA (1951), rappellent que l'homogénéisation effectuée après traitement thermique, induit une meilleure consistance sur le yaourt mais qu'il peut y avoir des risques de recontamination.

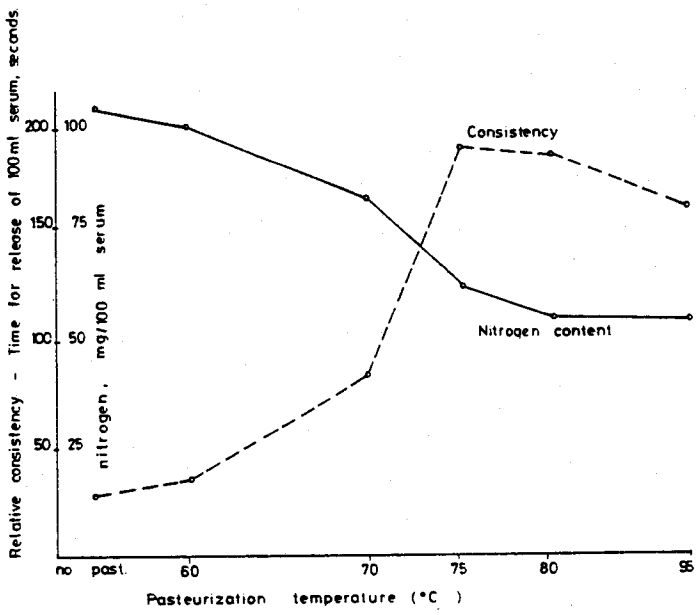


FIGURE 21 : **CONSISTANCE DU YAOURT EN FONCTION DES TEMPERATURES DE PASTEURISATION, TEMPS EGAL A 30 MINUTES**

(d'après STORGARDS, 1964)

MARTENS (1972) pour sa part, signalait que l'ordre des deux phases homogénéisation et pasteurisation n'avait pas d'influence sur la consistance du yaourt brassé.

2.4 Le traitement thermique

Rappelons qu'il a trois effets principaux :

- la destruction et/ou l'élimination des micro-organismes indésirables.
- la production de facteurs effecteurs pour la croissance bactérienne.
- la modification des propriétés physico-chimiques de la base laitière et en particulier de la fraction protéique d'où des modifications de la texture.

Ce dernier point a été particulièrement bien repris par RASIC et KURMAN (1978, p.53) et TAMIME et DEETH (1980). Concernant les barèmes à appliquer, les traitments classiques type pasteurisation ont d'abord été étudiés. Ainsi, STORGARDS (1964), voir figure 21 , GRIGOROV (1966) et GALESLOOT et HASSING (1968) donnent une hydratation maximale des protéines pour une température de 85°C pendant 20 à 30 minutes.

Les travaux de HYLMAR (1974), CASALIS (1975) concluaient plutôt à des températures optimales proches de 95°C, appliquées de 1 à 5 minutes. STORCK (1959) avait montré que des traitements de 90-95°C pendant plus de 5 minutes diminuaient la consistance du yaourt. LABROPOULOS (1984) concluait qu'à 95°C, l'effet négatif du temps de chambrage n'était sensible qu'à partir de 30 minutes. L'application de procédé type UHT (130°C, 15 à 45 secondes ou 145°C-15 secondes) mise en oeuvre plus tardivement, induit un yaourt de consistance inférieure ou au mieux égale au procédé type pasteurisé (GALESLOOT, 1966 ; STADHOUDERS, 1973).

Ce point a été confirmé plus récemment par LABROPOULOS (1981,1984), SCHMIDT (1985) et PARNELL-CLUNIES (1987). Selon ce dernier, la fermeté et la viscosité apparente sont maximales par les méthodes conventionnelles de traitements thermiques en cuve, mais les lots correspondants ont la plus faible capacité de rétention d'eau et conséquemment, font apparaitre une synérèse et un aspect granuleux. En définitive, le traitement 98°C pendant 1'52" minute donne le meilleur compromis entre fermeté et viscosité suffisamment élevés et l'aspect lisse du yaourt. Ceci est confirmé par l'évaluation sensorielle. Mais ces auteurs étudiaient la consistance du yaourt de type ferme, plus facile à reproduire au laboratoire ; notons quand même que SCHMIDT (1985) signalait une synérèse accrue par la mise en oeuvre du procédé pasteurisé (82°C, 20 mn) par rapport au procédé type U.H.T.

En conclusion, si l'on reprend les équivalences posées par RASIC et KURMAN (1978,p.176) pour des laits enrichis à 14 % ou plus de matières sèches soient 85°C, 5mn - 90°C, 2 à 3 mn - 95°C, 1 à 2 mn - 130 à 150°C, 2 à 4 sec ; il semble quand même que les procédés type pasteurisation conduisent à la meilleure texture et parmi eux, les couples température/temps de 95°C -2 à 3 mn.

2.5 Le refroidissement de la base laitière

CASALIS (1975) signalait qu'un refroidissement jusqu'à 45°C était insuffisant et ne permettait pas une recristallisation complète des triglycérides d'où une hétérogénéité possible du caillé. Il soulevait le problème d'un refroissement inférieur suivi d'une remontée de température correspondant à celle de la fermentation. MEIKLEJOHN (1977) préconisait lui, un refroidissement rapide.

3.- LA FERMENTATION EN CUVE

Usuellement, l'industrie laitière utilise un ferment qui, ensemencé, permet d'obtenir le levain. Ce levain, incorporé à des taux variables de 1 à 5 % dans la base laitière, permet d'obtenir le yaourt. Des procédés d'ensemencement direct du ferment dans la base laitière pour yaourt sont, depuis, peu utilisés.

3.1 Influence du ferment

3.1.1 "Propriétés texturantes" de la souche utilisée

GALESLOOT et HASSING (1973) ont isolé deux souches, l'une "IST" d'un Streptococcus thermophilus , l'autre "RR" d'un Lactobacillus bulgaricus. Ces deux souches possèdant un caractère épaississant marqué. Les auteurs soulignaient la relation entre le caractère épaississant de ces deux souches et la faculté d'augmenter la viscosité post-agitatoire (mesurée dans l'entonnoir de POSTHUMUS) du yaourt obtenu. La fermeté du caillé lactique était moins affectée par la propriété mucoïde du ferment.

BIANCHI-SALVADORI (1983) montrait la relation entre production de substances muqueuses et viscosimétrie du caillé lactique fermenté par des lactobacilles épaississants. Des travaux similaires avaient été présentés par KOSIKOWSKA et coll. (1979). ANDRES (1982), VEDAMUTHU (1982) ont montré que l'utilisation de ferment à pouvoir épaississant augmentait la texture lisse et épaisse et renforçait "l'aspect lisse en bouche" du yaourt brassé. SCHELHASS (1983), à partir de ferments commerciaux, a isolé de 6 souches de Streptococcus thermophilus, une souche épaississante (YP). Cet auteur utilisait aussi aussi un ferment de type RR où le lactobacille est épaississant.
Il a montré que les caillés lactiques fabriqués à partir de cultures épaississantes ont un comportement moins rhéofluidifiant.

Ainsi, à des vitesses de cisaillement élevées, leur viscosité est plus importante. La synérèse du yaourt est aussi moins importante. Mais si leur viscosité apparente est supérieure, le comportement thixotropique est plus marqué, il apparait en effet que la perte de viscosité en fonction du temps est plus importante pour des caillés obtenus à partir de ferments mucoïdes.

	Acidité titrable	Viscosité mPa.s	mg polysaccharide/ litre de culture
Souche non filante			
CNRZ 398	68	7	14
Souches filantes			
CRL 420	116	61	55
CNRZ 416[a]	71	3	57
CNRZ 416[b]	85	164	285
CNRZ 737[b]	84	218	424

a : lait écrémé ; b : lait écrémé + 1 % caséine.

TABLEAU 13 : **PRODUCTION DE POLYSACCHARIDE ET VISCOSITE DANS LE LAIT ECREME FERMENTE PAR DES SOUCHES FILANTES ET NON FILANTES DE LACTOBACILLUS BULGARICUS**
(d'après CERNING, 1986)

	Acidité titrable	viscosité mPa.s	mg polysaccharide/litre "soluble"	"insoluble"	"somme" "somme"
Souche non filante					
CNRZ 389	53	2	26	31	57
CNRZ 388	46	4	24	32	56
CNRZ 388a	63	164	52	9	61
Souche filante					
CNRZ 1000	60	40	29	14	43
CNRZ 1068b	57	50	28	33	61
CNRZ 1068a	62	1100	146	20	166
CNRZ 1066	57	41	36	9	45
CNRZ 1066	60	240	185	152	327
CNRZ 1066c	112	1640	400	392	792

a = lait écrémé + 1 % caséine
b = Mean value of 5 cultures with an average viscosity of 50 mPa.s.
c = Ropy strain S. thermophilus associated with a non ropy strain of L. bulgaricus (CNRZ 398).

TABLEAU 14 : **PRODUCTION DE POLYSACCHARIDE ET VISCOSITE DANS LE LAIT ECREME FERMENTE PAR DES SOUCHES "FILANTES" ET "NON FILANTES", DE S. THERMOPHILUS**
(d'après CERNING, 1988)

BOUILLANE et DESMAZEAUD (1980) ont montré qu'il existe une variation de 1 à 8 de la viscosité apparente, en étudiant dans des conditions de cultures comparables, 30 souches différentes de Streptococcus thermophilus. Parmi celles-ci, 8 souches peuvent être considérées épaississantes. Le caractère épaississant ne semblait pas être corrélé positivement ou négativement avec un autre critère métabolique. CERNING et coll. (1986 et 1988) ont étudié d'abord sur le Lactobacillus bulgaricus(tableau 13) puis sur le Streptococcus thermophilus (tableau 14) la relation entre production d'un polysaccharide et viscosité du caillé lactique.

Même s'il existe une relation entre viscosité et quantité de polysaccharides produits, l'instabilité de la production du polysaccharide est soulignée par les auteurs, surtout pour le Streptococcus thermophilus, ceci induisant la variabilité de la viscosité mesurée sur le caillé.

Pour leur part, GIRAFFA et BERGERE (1987), en étudiant le caractère épaississant de certaines souches de Streptococcus thermophilus, observent les points suivants :

- l'augmentation de viscosité n'existe que si les souches isolées sont cultivées sur milieu lait.
- la production du polysaccharide est faible et ne permettrait pas d'expliquer les augmentations de viscosité.
- la production d'un polysaccharide bactérien est favorisée à 30°C, or, à cette température, la viscosité est la plus faible.

Pour conclure, les auteurs émettent les plus grandes réserves quant à la participation structurelle du polysaccharide bactérien à la texture du yaourt brassé.

3.1.2. Traitements subis par les ferments

Selon RASIC et KURMAN (1978), l'utilisation de ferment lyophisé, la croissance sur milieu carencé, la séparation des deux souches Streptococcus thermophilus et Lactobacillus bulgaricus favoriseraient les propriétés épaississantes du ferment. GALESLOOT et HASSING (1973) ont étudié les effets défavorables des repiquages successifs.
GIRAFFA et BERGERE (1987) par-contre, constatent une augmentation de viscosité au cours des repiquages successifs à partir d'une souche lyophilisée à caractère épaississant.

3.1.3 Conclusion

En conclusion, il apparait que, suivant le type de ferment utilisé, le caractère épaississant peut être porté soit par le Streptococcus thermophilus soit par le Lactobacillus bulgaricus, soit encore par les deux bactéries. La proportion dans le mélange initial de chaque espèce peut donc modifier les propriétés de texture du yaourt obtenu (MARTENS, 1972 ; BOTTAZI, 1976 ; RASIC et KURMAN 1978). D'autre part, la nature épaississante des bactéries lactiques s'avère être génétiquement instable et variable suivant les conditions de culture.

GANCEL, (1988) a en effet démontré la variabilité clonale de la production de polysaccharides par Streptococcus thermophilus. Elle a déterminé les conditions physiologiques de production sur milieu synthétique.

3.2 Influence des conditions de fermentation du levain

Peu d'éléments spécifiques à ce stade de la fabrication existent dans la bibliographie. En effet, les différents travaux concernant l'influence d'un ou plusieurs paramètres de fermentation sur la texture, ne distinguent pas le stade levain du stade yaourt. D'un point de vue microbiologique, cela revient en effet à étudier l'effet d'un "repiquage". A notre connaissance, peu d'éléments ont été publiés concernant les conditions de conservation du levain avant utilisation dans le yaourt.

3.3 Influence de la fermentation au stade yaourt

3.3.1 Effet du taux d'ensemencement

Il varie industriellement de 0.5 à 5 %. Il peut être beaucoup plus bas si la température de fermentation utilisée est voisine de 30°C. Dans cette optique, HYLMAR (1974), en étudiant des taux variables de 0.1 % à 5 %, a mis en évidence une viscosité apparente accrue et une synérèse diminuée pour des taux de 0.1 % ; la fermentation durait alors 30 heures. MARTENS (1972) montré qu'il n'y avait pas d'influence du taux d'ensemencement (0.05 % ; 0.1 % ; 0.2 % ; 0.5 %) sur la consistance du yaourt brassé fermenté à 32°C. Pour des températures voisines de 42°C, RASIC et KURMAN (1978, p.214) préconisent un taux de 2 %.

3.3.2 Effet de l'Aération de la base laitière

Le taux d'oxygène (02) dissous, lié au niveau d'aération du lait lors des traitements précédents la phase de fermentation peut être très variable suivant les procédés utilisés. Il est logique de penser qu'il peut entrainer des effets sur la fermentation du lait par les bactéries lactiques. Le métabolisme des bactéries lactiques, en présence d'oxygène, est étudié dans un article bibliographique général (CONDON, 1987). Celui-ci conclue clairement en affirmant que l'effet de l'oxygène sur la croissance des bactéries lactiques n'est pas forcément négatif. Pour certaines souches, un surplus d'02 permet à la bactérie d'utiliser un plus grand nombre de sucres et donc, d'accroître son taux de croissance.

Sur le plan technologique, les quelques données en notre possession indiquent des valeurs de pénétrométrie moins bonnes pour des yaourts dont le lait n'a pas subi de dégazage . Cette idée se retrouve dans un article qui indique un effet négatif de l'02, jugée sensoriellement sur la synérèse et la consistance des laits fermentés et du yaourt du fait de la mauvaise stabilité du caillé qui contient trop d'air (RAGE, 1985). L'auteur n'en préconise pas pour autant un investissement coûteux en matériel de dégazage.

N° de l'essai	intensité du brassage	température d'incubation	mesure de la consistance		examen organoleptique	
			temps d'écoulement en s	profondeur de pénétration en mm	consistance	goût
1	1	42	18,4	12,2	4,3	4,3
		32	28,3	34,5	4,5	4,6
2	2	42	18,0	15,7	4,5	4,2
	1	32	31,7	30,5	4,5	4,6

TABLEAU 15 : **INFLUENCE DE LA TEMPERATURE D'INCUBATION SUR LA CONSISTANCE ET LE GOUT DU YOGHOURT BRASSE**
(MARTENS, 1972)

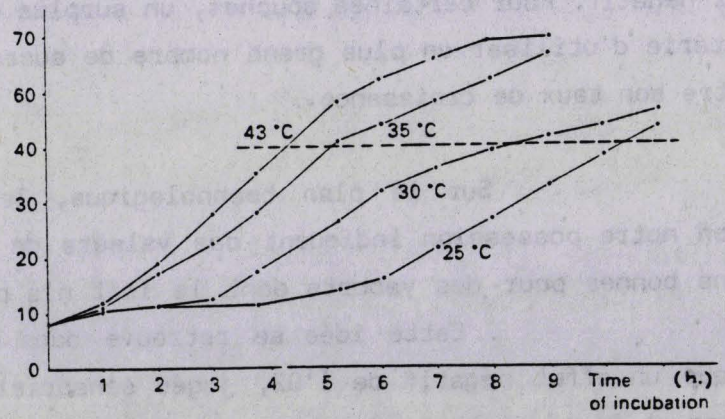


FIGURE 22 : **INFLUENCE DE DIFFERENTES TEMPERATURES D'INCUBATION SUR LA PRODUCTION D'ACIDE DANS LE YOGHOURT (INOCULUM 3 % - TEMPERATURE D'INCUBATION 25°C ; 30°C ; 35°C ; 43°C**
(d'après KURMANN, 1972

3.3.3 Effet de la température de Fermentation

Le choix de la température de fermentation va influencer la vitesse d'acidification de la base laitière par les deux bactéries thermophiles en symbiose. Mais il va influencer aussi la production de substances épaississantes. Ces deux effets vont avoir des répercussions sur la texture du caillé lactique finalement obtenu.

KURMAN (1972) a étudié l'effet de la température de fermentation sur la production d'acide, figure 22.
Concernant les températures optimales de production d'acide, RADKE-MITCHELL et SANDINE (1986) montrent qu'elles se situent de 2 à 8°C au-dessus des températures optimales de croissance.
Ces dernières variaient de 35 à 42°C pour 9 souches de Streptococcus thermophilus et de 43 à 46°C pour 10 souches de Lactobacillus bulgaricus.
MARTLEY (1983) avait lui, observé un optimum de croissance entre 39.3 et 46.1°C pour Streptococcus thermophilus et entre 41.8 et 46.6°C pour Lactobacillus bulgaricus.
La température n'a donc pas d'influence en soit sur la croissance qui est d'abord fonction du couple de souches utilisé.

Plus directement sur la consistance du yaourt brassé, MARTENS (1972) a comparé les effets des températures 32°C et 42°C. Les résultats sont repris dans le tableau 15, ils indiquent qu'une température de 32°C augmente la viscosité mais diminue la fermeté tandis qu'à 42°C, il y a au contraire, diminution de la viscosité et augmentation de fermeté du yaourt brassé. Ces effets antagonistes se traduisent finalement par des appréciations sensorielles de la consistance équivalentes.

GALESLOOT et HASSING (1973), en étudiant l'effet de trois températures (32°C, 37°C et 45°C) montrent, eux aussi, que la diminution de la température induit une diminution de la fermeté (chute de bille), mais une augmentation de viscosité (entonnoir de POSTHUMUS).

AUTEURS	VISCOSITE	FERMENTE	EVALUATION SENSORIELLE
MARTENS* (1972)	**augmentation** (entonnoir posthumus)	**diminution** (chute de bille)	différence non significative
GALESLOOT HASSING * (1973)	**augmentation** entonnoir de posthumus	**diminution** (pénétromètre)	absence de données
SCHELLHASS ** (1985)	**diminution** (coefficient de consistance viscosimètre	**diminution** (pénétromètre instron)	absence de données

TABLEAU 16 : **RESULTATS OBSERVES SUR DIFFERENTS LOTS DE YAOURT BRASSE EN FONCTION DE LA DIMINUTION DE LA TEMPERATURE DE FERMENTATION**

* : de 42 à 32 °C
** : de 45 à 37 °C puis 32°C

L'effet sur la fermeté est confirmé par l'étude de SCHELLHASS (1985) mais l'action sur le coefficient de consistance K, voir tableau **16,** semble différente. L'étude montre en effet que le coefficient de consistance K augmente quand la température de culture augmente, ceci aussi bien pour des ferments épaississants que non épaississants. A basse température, les souches filantes ont un coefficient de consistance plus faible, mais un indice d'écoulement plus grand que les souches non filantes. Ce dernier auteur met aussi en évidence une production de mucus plus importante pour des températures basses (32°C). Ceci avait été établi par KURMAN (1967) et MEIKLEJOHN (1977). Rappelons, GIRAFFA et BERGERE (1987) qui confirmaient l'influence positive d'une température de 30°C sur la production de substances épaississantes par Streptococcus thermophilus sur le lait.

3.3.4 Acidité finale du caillé lactique

L'acidité finale du caillé lactique est indiquée par la valeur du pH ou de l'acidité titrable.
Industriellement, c'est à cette valeur que le caillé lactique sera brassé, soutiré de la cuve, et refroidi.

KURMAN (1967) indiquait que l'acidité finale ne devait pas être trop basse au moment du brassage (pH optimum voisin de 4,4 et 4,3) afin d'obtenir une bonne consistance. GROUX (1973) indiquait qu'un pH final élevé favorisait la production de mucus. MARTENS (1972) dans une étude plus précise, a comparé quatre valeurs de pH final (4.7, 4.5, 4.3, 4.2) il a montré que la consistance du yaourt brassé augmentait quand le pH final diminuait, mais la variation d'acidité pouvait être aussi due à des différences de postacidification pendant la conservation révélées au moment de la mesure de la texture. BOTTAZI (1976) signalait que la prise de viscosité avait lieu entre pH 4.3 et 4. Enfin, SALJI (1985) observait une viscosité de 2 880 mPa.s à un pH final de 4.2 contre une viscosité de 175 mPa.s à pH final 4.5, la différence de synérèse n'était pas significative.

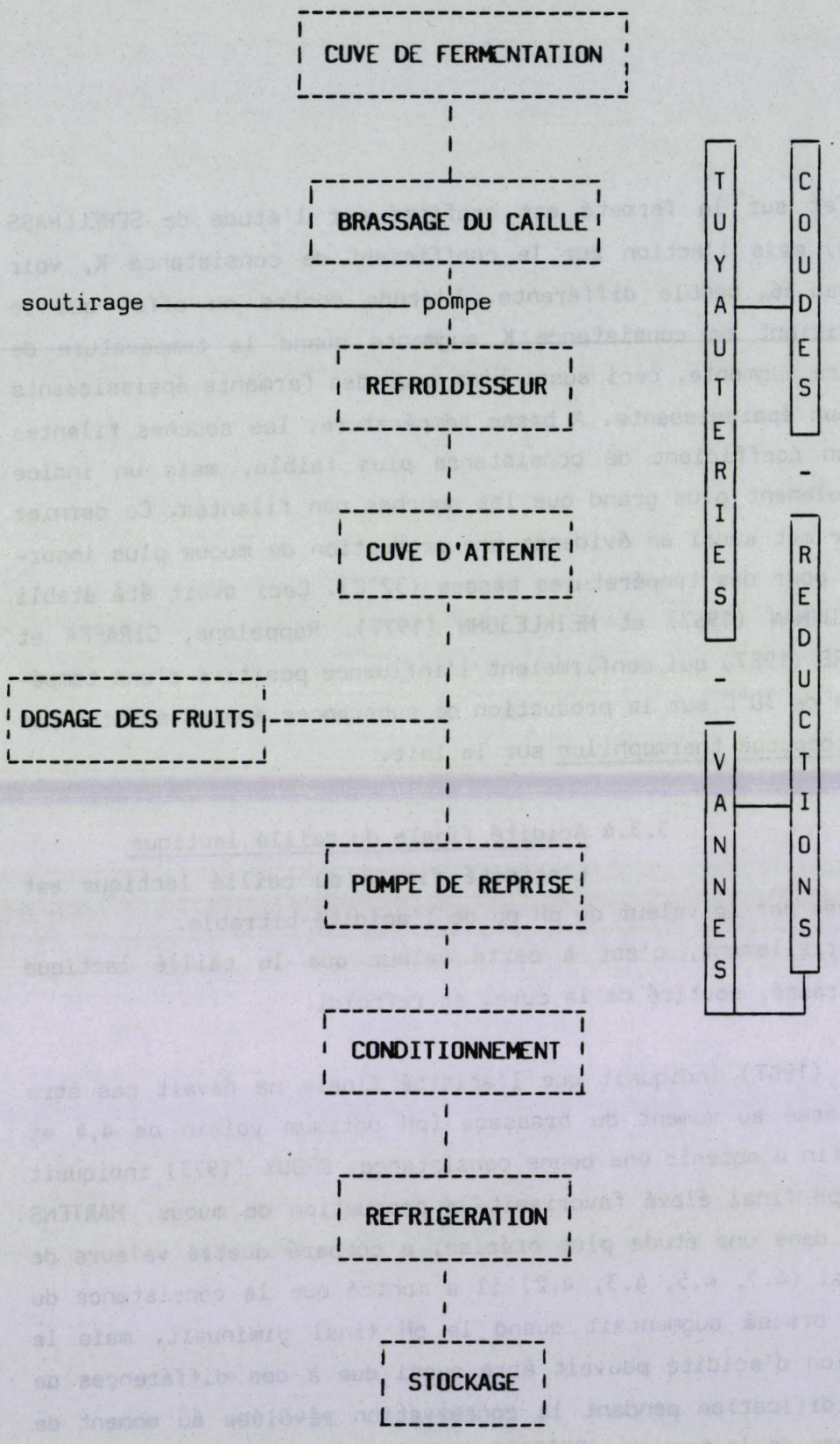


FIGURE 23 : SUCCESSION DES OPERATIONS TECHNOLOGIQUES DE LA TROISIEME PHASE DE FABRICATION DU YAOURT BRASSE

4.- LES OPERATIONS TECHNOLOGIQUES POST-FERMENTATION

Elles sont schématisées par la figure 23.

4.1 Le brassage du caillé lactique

Le brassage du caillé lactique est effectué industriellement en cuve au moyen d'un agitateur à larges pales, de rotation lente (inférieure à 50 rpm). Il a pour but de stabiliser le caillé en petites particules (0.01 à 0.4 mm de diamètre), ce qui favorise l'hydratation des protéines (RASIC et KURMAN, p.244) et lui donne un aspect plus lisse, plus homogène. Ces auteurs recommandent un brassage à des températures basses (0°C à 7°C), un brassage en fin de fermentation à température plus élevée pouvant induire une apparence sableuse hétérogène du caillé et une synérèse.

Par opposition, BOTTAZZI (1976) préconise le brassage du coagulum dès la fin de fermentation afin que le yaourt puisse reprendre ensuite sa viscosité. MARTENS (1972) indique qu'en augmentant l'intensité du brassage, la "composante visqueuse" du yaourt brassé est diminuée tout comme la composante ferme. Enfin, MEIKLEJOHN (1977) mentionne qu'un brassage en cuve est préférable à froid (T° inférieure à 7°C) s'il doit avoir lieu à chaud, il doit être moins fort et bien surveillé. D'un point de vue plus technologique, FULLER (1979) mentionne sur une cuve particulière (figure 24) des vitesses d'agitations de 7 rpm pour les pales de surface et de 15 rpm pour l'arbre central, ce qui permet de minimiser les effets de cisaillement sur le caillé tout en assurant un bon brassage.

4.2 Le refroidissement du caillé

L'objectif de ce traitement est de ralentir fortement l'activité acidifiante des bactéries lactiques, une fois le pH final de fermentation en cuve atteint.

* Industriellement, deux systèmes de refroidissement peuvent être utilisés :

- le refroidissement dans la cuve de fermentation.
- le refroidissement continu dans des échangeurs tubulaires ou à plaques.

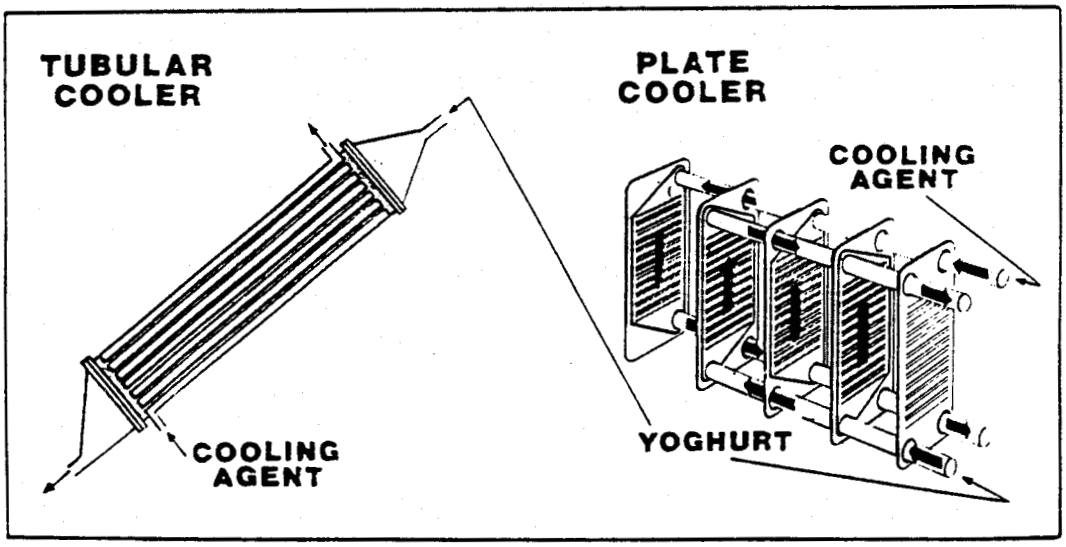


FIGURE 25 : PASSAGE DU YAOURT BRASSE A TRAVERS DEUX TYPES D'ECHANGEUR-REFROIDISSEUR : TUBULAIRE (TUBULAR COOLER) ET A PLAQUES (PLATES COOLER)
(d'après TAMIME et GREIG, 1979)

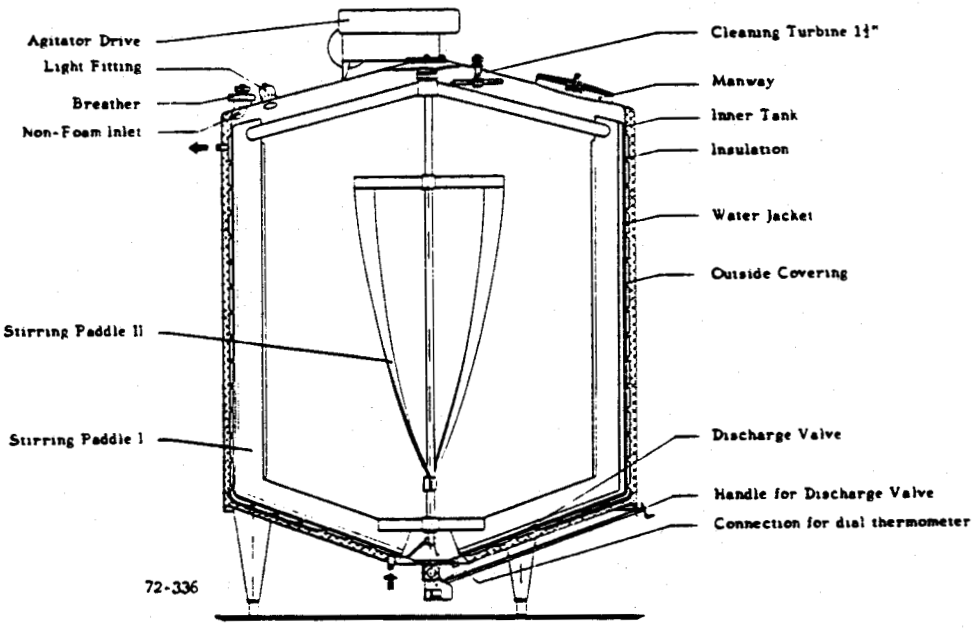


FIGURE 24 : CUVE DE YAOURT BRASSE PERMETTANT LE REFROIDISSEMENT EN CUVE SIMULTANEMENT AU BRASSAGE, ASSURE PAR DE LARGES PALES A VITESSE DE ROTATION CALCULEES POUR MINIMISER LE CISAILLEMENT DU CAILLE
(d'après FULLER, 1979)

Ces deux systèmes different totalement par leur conception ; en effet, les traitements mécaniques associés au refroidissement ne sont pas du même ordre de grandeur. Or, dans la plupart des études, il est difficile de séparer l'effet du refroidissement de celui du traitement mécanique.

Le refroidissement en cuve

La cuve est alors spécialement équipée d'une double enveloppe, de pales et de tubulures creuses où peuvent circuler une eau glacée (température inférieure à 4°C). A notre connaissance, hormis les recommandations technologiques faites par TAMIME et GREIG (1979) et TAMIME et ROBINSON (1984, p.148), il n'existe pas de travaux sur la relation entre ce mode de refroidissement et la texture du yaourt.

Le refroidissement continu

Il est réalisé dans un échangeur tubulaire ou à plaques, figure 25. Les spécifications de ces appareils sont présentées par TAMIME et ROBINSON (1978, p.152). Dans ce type d'échangeur, le refroidissement s'accompagne inévitablement d'un effet mécanique négatif sur la texture du caillé lactique. STEEBERGEN (1971) et PIERSMA et STEENBERGEN (1973) ont montré que la perte de viscosité était moindre dans un échangeur tubulaire.

* L'influence de la cinétique de refroidissement a été aussi étudiée. RASIC et KURMAN (1978, p.232) l'avaient décomposée en quatre phases, basées sur l'activité d'acidification bactérienne,(figure 26) et préconisaient une limite de pH 4.6 pour démarrer le refroidissement ; puis le refroidissement devait être ni trop rapide afin d'éviter les phénomènes de rétraction, d'hétérogénéité de la texture, ni trop lent pour éviter la postacidification. Aujourd'hui, deux techniques principales coexistent (TAMIME et ROBINSON, 1978, p.61) :

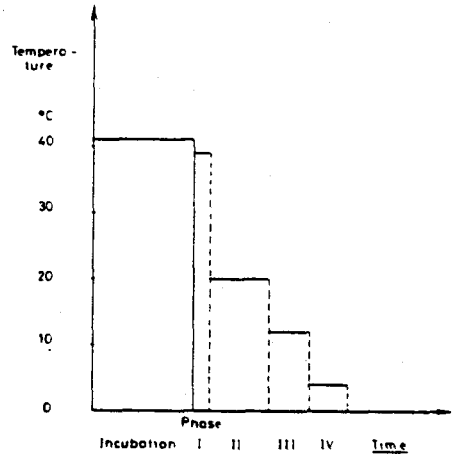


FIGURE 26 : **DIFFERENTES PHASES DE REFROIDISSEMENT DU YAOURT APRES INCUBATION** (d'après KURMANN, 1967)

Phase I : Introduction du choc thermique.
Phase II : Arrêt de la croissance bactérienne.
Phase III : Ralentissement de la fermentation lactique.
Phase IV : Température de stockage.

N° de l'essai	Température de l'air après le brassage	Mesure de la consistance		Examen organoleptique		pH après 48 H
		temps d'écoulement en s	profondeur de pénétration en mm	consistance	goût	
1	5°C	19,8	10,0	4,4	5,0	4,27
2	10°C	19,8	8,2	4,6	5,0	4,28
3	17°C	22,9	5,6	4,8	4,8	4,17

TABLEAU 17 : **INFLUENCE DE LA VITESSE DE REFROIDISSEMENT SUR LA CONSISTANCE ET LE GOUT DU YOGHOURT BRASSE**

- un refroidissement direct et continu de la température de fermentation (40 à 45°C) à la température de 10°C maximum où le yaourt est conditionné.

- un refroidissement en deux étapes avec un palier de durée variable entre 15°C et 25°C, correspondant à la température de conditionnement.

ANON (1977) a montré que la deuxième technique améliorait nettement la viscosité du yaourt brassé. Il préconise un prérefroidissement et un conditionnement à 24°C, puis un refroidissement aussi lent que possible (en une douzaine d'heures) jusqu'à la température de stockage. Ceci est confirmé par MEIKLEJOHN (1977). Déjà, MARTENS (1972) avait montré en comparant les températures de 17°C, 10°C et 5°C après 12 heures, qu'un refroidissement lent augmentait la viscosité, la fermeté et la consistance perçue sensoriellement sur le yaourt brassé, tableau 17. HYLMAR (1974) avait étudié plus spécifiquement le niveau de température requis pendant le passage dans un échangeur à plaques et en comparant 30°C, 20°C, 13°C et 5°C avait retenu la température de 30°C pour la meilleure texture et la plus faible synérèse observée sur le yaourt brassé.

Enfin, mentionnons SALJI (1985) qui indique que la viscosité double quand le refroidissement d'un caillé fermenté à 43°C à pH 4.25 est rapide. Mais de fait, cet auteur compare un refroidissement rapide à 30°C (durée 20 mn) dans un échangeur à plaques contre un refroidissement lent en cuve jusqu'à 10°C (en 50 mn). Plus que la vitesse de refroidissement, c'est en réalité le couple température/effet mécanique qui est alors différent. La texture est favorisée dans le 1er cas, (traitement mécanique important réalisé à chaud, rapidement), par opposition avec le traitement mécanique plus doux, plus long mais réalisé à froid (10°C).

En conclusion, le schéma suivant a été retenu par TAMIME et ROBINSON, 1984, p.62 pour le yaourt brassé :

Pressure (Bar)	Pump speed (RPM)	Viscosity (Seconds)	% Reduction
0	100	51.0	15.0
	200	45.0	25.0
	300	41.5	30.8
1	100	47.5	20.8
	200	42.5	29.2
	300	37.5	37.5
2	100	45.0	25.0
	200	40.1	33.2
	300	35.0	41.7

TABLEAU 18 : **REDUCTION DANS LA VISCOSITE DU YAOURT (%) AFFECTE PAR LA VITESSE DE ROTATION ET LA CONTRE PRESSION LORS DU POMPAGE** (d'après STEENBERGEN, 1971 .)

Pompe WAU KESHA, viscosité initiale équivalente à 60 secondes (tunnel de POSTHUMUS)

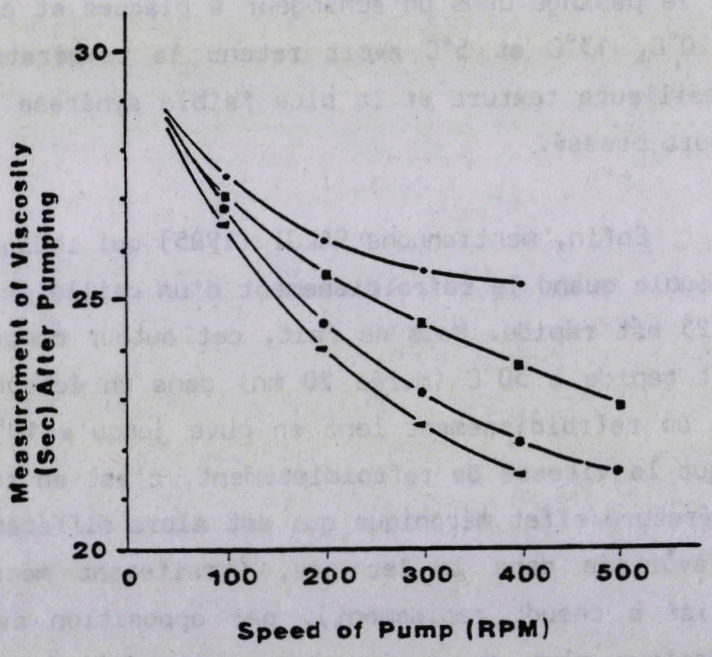


FIGURE 26 bis : **REDUCTION DE LA VISCOSITE DU YOGHURT SOUS L'EFFET DU POMPAGE** (d'après STEENBERGEN, 1971)

La "viscosité initiale" du yoghurt avant pompage "équivalait à 30 secondes (tunnel de POSTHUMUS). La pression de travail est de 0 bar.

Fristain FK 15 — Rotary pump — stroke volume 18.4 cm
Moineau LBF 6/R 46 — Mono pump — stroke volume 93 cm
Mono SH 22 — R8 — Mono pump — stroke volume 8.5 cm
Wankesha 25 DO — Rotary pump — stroke volume 224 cm

- refroidissement du yaourt jusqu'à 24°C et conditionnement.

- refroidissement 5 à 6 heures à une température de 7 à 10°C dans une chambre froide ventilée.

- refroidissement 6 à 7 heures en chambre froide de 1 à 2°C.

Mais ces auteurs rappellent les interactions entre la vitesse de refroidissement lente, la texture améliorée et l'acidification qui ne doit pas être trop élevée.

4.3 Les traitements de soutirage et de pompage

Industriellement, il est indispensable d'utiliser des pompes pour transférer le caillé lactique de la cuve de fermentation au refroidisseur puis jusqu'à la machine de conditionnement. Les traitements de pompage doivent affecter le moins possible la texture du yaourt brassé chaud ou déjà partiellement refroidi. Peu de publications existent dans ce domaine, cependant, STEENBERGEN (1971) indiquent les trois paramètres qui affectent le plus la texture du yaourt brassé :
la vitesse de rotation, la forme du piston, la contre-pression. Ces travaux sont clairement présentés par TAMIME et GREIG (1979) et repris par TAMIME et ROBINSON (1984, p.166) qui préconisent les pompes dite positives plutôt que centrifuges.

- La vitesse de rotation doit alors être minimale, figure **26bis.** Dans ces conditions, les effets sur la texture sont minimisés et identiques quelquesoit le type de pompe positive utilisée. Quand la vitesse augmente, le choix de la pompe pourra permettre de préserver plus ou moins la viscosité du yaourt.

- La contre-pression affecte d'autant plus la viscosité que la vitesse de rotation de la pompe est grande comme le montre le tableau **18.**

- enfin, ces auteurs mentionnent l'effet de "fuite interne" variable suivant le type de pompe qui diminue la viscosité du yaourt brassé. En s'appuyant sur les travaux de HAUGE et coll. (1974), ils recommandent les pompes positives de type monolobes ou capsulaires qui minimisent ce phénomène.

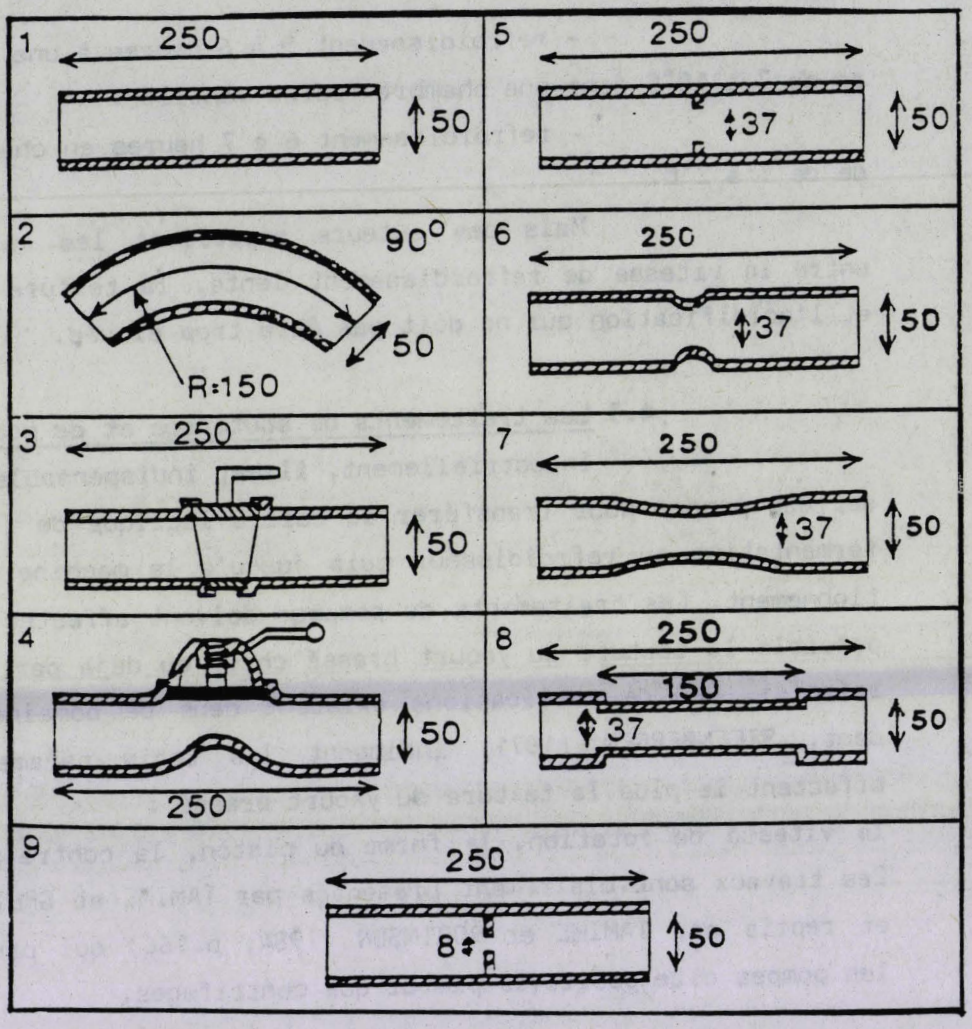


FIGURE 27 : **REDUCTION DE VISCOSITE DU YAOURT RESULTANT DU TRANSPORT A TRAVERS LES TUYAUTERIES** (d'après STEENBERGEN, 1971)

Viscosité initiale : 30 secondes (tunnel de POSTHUMUS).
Dimensions données en mm ; débit égal à 3600 l/h.

Tuyauteries n°	Réduction de viscosité (secondes)
1, 2 et 3	0.2
4	0.5
5, 6 et 7	1.5
8	1.9
9	20

4.4 Les effets des tuyauteries, vannes et coudes

STEENBERGEN (1971) a montré que pour une vitesse du produit et un diamètre de tuyauterie constants, la viscosité du yaourt diminuait en fonction de la longueur de la conduite ; si la longueur de tuyauterie est constante, la viscosité diminue quand le diamètre diminue.

Les résultats d'une étude plus précise sur la géométrie des tuyauteries et la perte de viscosité (écoulement dans l'entonnoir de POSTHUMUS) sont représentés sur la figure 27 Elle montre que les pertes de viscosité sont essentiellement dues aux réductions de diamètres.

4.5 Les effets du conditionnement

La perte de viscosité est moindre pour des machines équipés de pistons de remplissage de faibles vitesses et de buses de larges diamètres (STENBERGEN, 1971).

4.6 Durée et température de stockage

RASIC et KURMAN (1978, p.278) d'après KURMAN (1969 c) mentionnent une augmentation plus importante de la viscosité pendant les quatre premiers jours de stockage à 5°C du yaourt brassé.
Cette augmentation est attribuée pour environ 60 % à une solidification du réseau protéique, et pour environ 30% à un gonflement des protéines du fait de leur hydratation et aux propriétés thixotropiques du yaourt. MARTENS (1972) avait signalé une augmentation réelle mais faible de la fermeté et de la consistance du yaourt brassé conservé à 5°C, au bout de 5 jours. La conservation à des températures plus élevées augmenterait beaucoup plus "la fermeté" du yaourt brassé mais diminuait légèrement sa "viscosité". Bien entendu, la postacidification était aussi augmentée.

4.7 Transport du yaourt brassé

MARTENS (1972) a montré que le transport diminue un peu plus la "fermeté" que la "viscosité" du yaourt brassé. L'aspect général du produit est dans l'ensemble affecté.

IV.- CONCLUSION

L'importance de cette revue bibliographique se justifie par la nécessité de rassembler des travaux de disciplines très différentes.

* Concernant la structure du yaourt brassé, les structures individuelles de chacun des éléments sont assez bien décrites (ALAIS, 1984 - RASIC et KURMAN, 1978 - PAYENS, 1982 - LENOIR, 1985), même si différentes hypothèses coexistent encore comme pour les caséines, mais l'assemblage de ces différents éléments reste très peu abordé (HARWALKAR et KALAB, 1981 - BOTTAZI et BIANCHI, 1986 - PARNELL-CLUNIES, 1987). En particulier, l'apport à la structure des macromolécules bactériennes polysaccharidiques, mises en évidence très récemment (SCHELLHASS, 1985), commence à peine a être étudié.

* Les mesures empiriques de la texture sont très diverses, elles ont pu être reliées dans quelques cas à certaines propriétés sensorielles (MARTENS, 1972 - LABROPOULOS, 1984 - GALESLOOT et HASSING, 1973), mais par nature, elles ne sont pas généralisables. Les mesures rhéologiques sont trop peu nombreuses (DERVISOGLU et KOKINI, 1986 - HELLINGA, 1986), elles mettent en évidence cependant le comportement très complexe du yaourt brassé. Elles ont souvent été réalisées dans l'intention d'une étude rhéologique du produit en lui-même, et non pas de mise en relation avec le procédé de fabrication, quelques travaux existent cependant sur le sujet (DEKEE, 1983).
Si d'intéressants rapprochements entre critères organoleptiques et méthodes empiriques ont été proposés (SHAMA et SHERMAN, 1973), les études de relations entre mesures rhéologiques et notes d'évaluation sensorielle (SCZESNIAK, 1987) proposées très récemment, restent très hypothétiques (JACQUIN, 1986).

* Des travaux de nature très diverses, génétiques (GANCEL, 1988), microbiologiques (CERNING, 1986, 1988 - BOUILLANE et DESMAZEAUD, 1980 - GIRAFFA et BERGERE, 1987 - SCHELLHAASS, 1985), physicochimiques (KURMAN, 1967) et même d'ingénierie (TAMIME et ROBINSON, 1984 - STEENBERGEN, 1971, TAMIME et GREIG, 1979), permettent de connaître l'effet de telle ou telle condition opératoire sur la texture du yaourt brassé.
Cependant, ceci a souvent été étudié de façon isolée, indépendamment du procédé de fabrication dans son ensemble. L'effet des ferments utilisés en est sans doute la meïlleure illustration.

Or, s'il est fondamental pour le scientifique de chercher à comprendre les effets de chacun des très nombreux facteurs de variation, il est tout aussi important pour l'ingénieur de connaitre les effets relatifs de l'ensemble des paramètres qui peuvent modifier la texture du yaourt brassé.

CHAPITRE II

CARACTERISTIQUES RHEOLOGIQUES ET SENSORIELLES DE LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE

I.- INTRODUCTION

L'évaluation de la texture du yaourt brassé définie par le cahier des charges de la SODIMA, repose sur une norme instrumentale établie par l'utilisation d'un viscosimètre de type "BROOKFIELD". Cette technique est utilisée par toutes les usines du groupe et au Centre de Recherches pour juger de la qualité de texture du produit, elle est éventuellement accompagnée d'une dégustation rapide du yaourt selon une pratique qui tient compte de l'expérience acquise dans le domaine.

Pour sa part, notre travail vise à caractériser le yaourt brassé par des grandeurs fondamentales, standardisées, contrôlables, et qui décrivent le plus complètement possible la texture du yaourt brassé. Pour cela, nous avons mis au point et développé deux types de méthodes :

- des techniques d'évaluation sensorielle
- des mesures rhéologiques

Les résultats attendus sont :

. Une élaboration d'une "carte d'identité" de la texture du yaourt brassé.

. Des corrélations entre les mesures rhéologiques et les notes d'évaluation sensorielle.

. La caractérisation de la texture recherchée sur le produit, ce qui implique une sélection de grandeurs spécifiques susceptibles d'être ensuite modifiées et optimisées par la maîtrise du procédé de fabrication.

II.- MATERIELS ET METHODES

1.- ORIGINE DES YAOURTS BRASSES ANALYSES

Toutes les mesures ont été effectuées sur des yaourts brassés natures fabriqués soit en conditions industrielles soit au laboratoire ou sur le matériel pilote du Centre de Recherches.

La détermination du protocole de mesure a été effectuée en utilisant des yaourts brassés de ces différentes origines.

La caractérisation rhéologique du yaourt brassé porte sur des lots homogènes de yaourts destinés à la vente, provenant de la Coopérative Laitière Centrale de Paris (C.L.C.P.) et de la Coopérative Laitière Agricole de la Région d'Amiens (CLARA). Ils ont été prélevés hebdomadairement ou bihebdomadairement et correspondent aux fabrications de mars à mai 1987. Ils sont conservés à 10°C puis mesurés à J + 1 pour les lots de la C.L.C.P., à J + 10 pour les lots de la C.L.A.R.A.

Un lot particulier, prélevé en sortie de la machine de conditionnement de l'atelier "J.J. ROUSSEAU" de la C.L.C.P. a été utilisé pour la détermination de la répétabilité de la mesure du viscomètre BROOKFIELD, il a été stocké à 10°C.

Pour les études d'évaluation sensorielle concernant la recherche des descripteurs et les études de corrélations entre les mesures sensorielles et instrumentales les types de yaourt brassé nature utilisés étaient très différents en origine et en texture. Ceci sera précisé dans les paragraphes correspondants.

2.- LE VISCOSIMETRE BROOKFIELD TYPE RVF

2.1 Principe d'utilisation de l'appareil

Le viscosimètre Brookfield RVF - voir figure 28 - est l'instrument de mesure de référence utilisé pour caractériser simplement la texture du yaourt brassé.

2.1.1 Principe de la mesure

La valeur de "viscosité Brookfield" est en fait la mesure du couple résistant exercé sur le rotor ou module tournant à une vitesse déterminée et constante dans le yaourt dont on veut caractériser la viscosité. La valeur du couple résistant est indiquée sur le cadran par l'aiguille fixée sur l'axe du rotor.

FIGURE 28 : **VISCOSIMETRE BROOKFIELD -Type RVF**

	MOYENNE 21 mesures	VALEUR MINIMALE	VALEUR MAXIMALE	ECART TYPE	COEFFICIEN DE VARIA-TION (%)
VISCOSITE BROOKFIELD cpoß	9928	8800	11000	500	5,4 %

TABLEAU 19 : **DETERMINATION DE L'ERREUR DE MESURE DE VISCOSITE PAR LE VISCOSIMETRE BROOKFIELD**

Un facteur de conversion en fonction du type de module utilisé permet ensuite d'obtenir une viscosité exprimée en Centipoises Brookfield (cpoß). Cette valeur correspond bien à la viscosité du matériau dans le cas d'un comportement newtonien. On utilise le même coefficient dans le cas des comportements non-newtoniens : l'indication de viscosité est alors arbitraire.

2.1.2 Appareillage et mode opératoire :

Le viscosimètre BROOKFIELD RVF à 4 vitesses, équipé du module avec repère n°4 a été utilisé selon le mode opératoire suivant :

- échantillons à la température de 10°C.
- mesure pendant 30 secondes à 10 tours/minute.
- multiplier la valeur obtenue par le facteur correctif (200) correspondant au module n°4, les résultats sont exprimés en "centipoises Brookfield" (cpoß).

2.1.3 Précautions d'utilisation :

- les dimensions des récipients contenant les différents lots de yaourt brassé sont identiques pour les essais comparés.
- la profondeur de pénétration du module dans le yaourt est constante.
- la quantité de yaourt dans le récipient est constante pour les essais comparés.
- les pots contenant le yaourt brassé sont sortis un par un du réfrigérateur à + 10°C, juste avant la mesure.

2.2 Répétabilité de la mesure

Nous avons prélevé directement sur une machine industrielle de conditionnement, 21 pots de yaourt brassé nature. Ces pots ont été immédiatement placés dans une chambre froide à 10°C. Le lot ainsi constitué est considéré homogène. A J+7, nous avons mesuré la viscosité Brookfield selon le protocole décrit.

FIGURE 29 : PRESENTATION GENERALE DU RHEOMETRE CARRIMED ASSERVI AU MICROORDINATEUR

FIGURE 29bis : GEOMETRIE DE MESURE DU RHEOMETRE CARRIMED CS 50

Le calcul de l'écart-type entre les 21 mesures permet de connaître la variation autour de la moyenne. Puisque le lot est homogène, cet écart-type représente bien la répétabilité de la méthode de mesure de la viscosité du yaourt brassé (tableau 19).

L'écart-type de 500 cpoB estime la répétabilité du protocole de mesure du yaourt brassé au viscosimètre Brookfield pour une valeur proche de 10.000 cpoB.

3.-LES MESURES RHEOLOGIQUES : LE RHEOMETRE CARRIMED

3.1 Présentation générale de l'appareil

Le rhéomètre CARRIMED CS 50, utilisé dans ce travail (figure 29), est un rhéomètre à contrainte imposée.
Il est équipé de la géométrie de mesure cône - plateau et peut réaliser des mesures en régime permanent (écoulement) ou en régime transitoire (fluage). Le plateau est muni d'un régulateur de température, ce qui permet de choisir et de contrôler la température de mesure. L'angle du cône utilisé est 4°, son diamètre de 4 cm. L'ensemble des corps de mesure est maintenu en équilibre par une pression d'air comprimée comprise entre 2,5 et 3 bars.

Principe de fonctionnement en écoulement :

Après les réglages préliminaires de l'espace de mesure (hauteur 105 μ), le yaourt est placé sur le plateau qui monte progressivement jusqu'à la position prédéterminée. On impose ensuite graduellement un couple de rotation C (N.m) et la vitesse angulaire de rotation w (rad.s-1) correspondante est mesurée.

Il apparait en tout point de l'échantillon une contrainte de cisaillement τ et une vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ - constantes (l'angle du cône est inférieur à 5°). Les grandeurs rhéologiques sont respectivement reliées au couple C imposé, et à la vitesse w lue, par les relations :

$\tau = k1 \; C$

$\dot{\gamma} = k2 \; w$

k1 et k2 = facteurs qui dépendent du cône de mesure
(k1 = 0.05968 et k2=14.3)

Le résultat de la mesure est l'obtention d'une courbe d'écoulement ou rhéogramme qui représente la contrainte exprimée en Pascal (Pa) en fonction de la vitesse d'écoulement exprimée en seconde -1 (s-1).
Le rhéomètre est asservi à un logiciel de commande et de traitements de données spécifiques, implanté sur un microordinateur IBM PC type XT équipé d'un disque dur.
Dans le cas de l'écoulement, le logiciel permet l'analyse des données selon plusieurs modèles rhéologiques. Il ajuste les points expérimentaux au modèle choisi et donne les grandeurs rhéologiques caractéristiques du modèle.

L'intérêt supplémentaire d'un rhéomètre piloté par un logiciel d'écoulement à contrainte imposée est qu'il permet la détermination du seuil d'écoulement. En effet, la contrainte maximale imposée est atteinte par augmentation progressive, l'unité d'incrémentation est égale à contrainte maximale/ 200.
Pour chaque nouvelle valeur de la contrainte, la vitesse angulaire est enregistrée. Le seuil d'écoulement est considéré atteint lorsque la vitesse angulaire est égale à 0.001 rad/s ; la valeur du seuil est la contrainte correspondante.

3.2 Mise au point du protocole de mesure

Il dépend de deux types de paramètres :

- les paramètres de la mesure rhéologique elle-même, fixés à l'aide du logiciel, nous les appelerons les "paramètres instrumentaux".

- les "paramètres produits" liés à sa conservation, à son prélèvement et à sa mise en place. Nous pouvons définir :

  - la température de mesure
  - le couple maximal
  - le temps de mise en température du produit
  - le temps de montée en contrainte maximale
  - le temps de descente

N° de facteur	DESIGNATION	UNITE	- 1	0	+ 1	Δ
X1	Prise de l'échantillon	-	Surface	-	Fond	-
X2	Température	°C	10	15	20	5
X3	Couple maxim.	N.m	3 000	6 500	10 000	3 500
X4	Temps d'équilibre	min.	0,5	3.25	6	2.75
X5	Temps de montée	min.	0,5	3.25	6	2.75

TABLEAU 20 : **DOMAINE DE VARIATION DES 5 FACTEURS INSTRUMENTAUX CHOISIS PREALABLEMENT A LA DETERMINATION DU PROTOCOLE DE MESURE EN ECOULEMENT DU YAOURT BRASSE**

Chaque facteur a deux modalités : modalité basse notée -1 ; modalité haute : +1.

La démarche de mise au point du protocole de mesure a consisté à établir ces paramètres, en vérifiant sans cesse la qualité et la répétabilité des rhéogrammes obtenus qui devaient être d'un tracé net, régulier et continu et surtout capables de faire apparaître clairement les caractéristiques rhéologiques du produit.

3.2.1 Les paramètres instrumentaux

La mise au point de leur niveau s'est faite en utilisant la technique des "plans d'expérience" (voir paragraphe II.5.3), les paramètres produits ayant été fixés de la manière suivante : yaourts d'un même lot, âgés de 7 jours ; température de conservation 10°C, sortie immédiate du réfrigérateur avant la mesure ; prélèvement et mise en place de l'échantillon à l'aide d'une petite cuillère rase.

3.2.1.1 plan d'expérience

L'objectif du plan d'expérience était de quantifier l'influence du niveau de 5 facteurs instrumentaux sur la valeur du seuil d'écoulement mesuré par le logiciel. Cette réponse avait été jugée à priori comme la plus sensible.
Nous avons considéré les paramètres qui interviennent dans la méthode proposée par le logiciel d'écoulement : température de mesure, couple maximal, temps d'équilibre, temps de montée en contrainte.
Nous avons ajouté à ce niveau, un paramètre produit important : la hauteur de l'échantillon dans le pot.
Les domaines de variation des 5 facteurs choisis figurent dans le tableau **20.**

Le traitement statistique des résultats a permis de retenir le modèle :

$$\text{Seuil d'écoulement} = 11.55 + 3.78(X1) - 1.94(X2) - 1.46(X5) - 0.94(X1X2)$$

Nous en avons tiré les conclusions suivantes :

1° Le couple maximal appliqué et le temps d'équilibre n'ont pas d'influence significative sur la mesure du seuil d'écoulement, dans la plage de variation choisie.

2° Les actions significatives sont :

- la prise de l'échantillon au fond du pot conduit à un seuil d'écoulement plus élevé que celui obtenu en prenant l'échantillon en surface, la différence est de 7,57 Pa (ce qui représente 66 % de la valeur moyenne 11,5 Pa).
- une augmentation de la température de mesure de 1°C entraine une diminution du seuil de 0,38 Pa.
- si le temps de montée en contrainte augmente de 1 minute, le seuil d'écoulement diminue de 0,44 Pa.
- nous observons une interaction significative entre la hauteur de prise de l'échantillon et la température de mesure :

. une augmentation de 1°C de la température entraine une diminution du seuil de 0,2 Pa pour un échantillon en surface, de 0,57 Pa au fond. L'influence de la température est donc plus importante pour une prise d'échantillon au fond du pot.

. la différence de seuil entre un échantillon pris au fond et un échantillon pris en surface est de 9,45 Pa à 10°C ; de 5,69 Pa à 20°C. L'effet de la hauteur de prise de l'échantillon est moindre à 20°C qu'à 10°C.

3° L'influence du temps de montée en contrainte a été difficile à interpréter, il semble que la sensibilité de l'appareil soit mise en cause, pour des temps très courts de mesure, l'appareil ne peut détecter exactement la contrainte qui provoque l'écoulement (l'incrémentation est trop rapide) : le seuil d'écoulement est donc surestimé. Une expérience complémentaire a été réalisée pour résoudre ce problème.

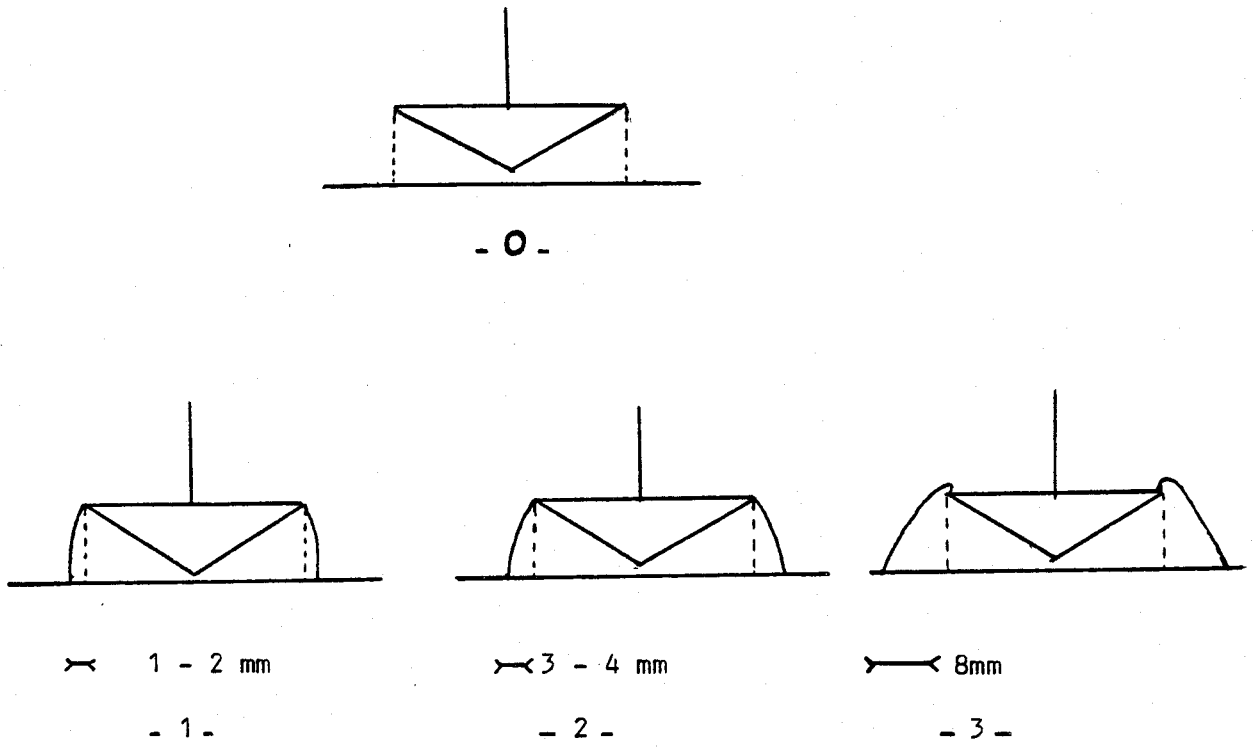


FIGURE 30 : SCHEMATISATION DES DIFFERENTES SITUATIONS DE MISE EN PLACE DU YAOURT ENTRE LE CONE ET LE PLATEAU (la situation idéale est en 0

3.2.1.2. Expérience complémentaire : influence du temps de montée en contrainte.

De nouvelles expériences ont été réalisées avec des temps de montée en contrainte de 0,5 - 1 - 1,5 - 2 - 3 - 4 minutes. L'analyse des résultats a montré que seul le temps de montée en contrainte de 0,5 mn donnait un seuil d'écoulement significativement plus élevé. Dans le domaine de variation 1 mn à 4 mn, le temps de montée en contrainte n'avait pas d'influence significative sur la mesure du seuil d'écoulement.

3.2.1.3 Conclusion

A ce stade, nous avons retenu comme paramètres les valeurs suivantes :

- prise de l'échantillon du yaourt : en surface
- température de mesure : 20°C
- couple maximal : 600 N.m.
- temps d'équilibre : 1 minute
- temps de montée : 2 minutes.

3.2.2 Les paramètres produits

Nous avons vérifié l'influence sur la qualité de la mesure de l'effet de bord, du temps de sortie de l'échantillon du réfrigérateur avant mise en place, d'une homogénéisation préalable du pot de yaourt brassé.

3.2.2.1 Etude de "l'effet de bord"

Il est admis que la quantité de yaourt placée entre le cône et le plateau - et en conséquence la quantité excédentaire - peut influencer sur les résultats de la mesure. Dans le cas de la géométrie cône-plateau, la situation idéale est schématisée par la figure **30.**

Or, il est difficile de déposer sur le plateau la quantité exacte de produit, correctement centrée, qui permet d'obtenir ce résultat.

temps de séjour / grandeur rhéologique	t = 10 sec.	t = 5 min.	t = 10 min.	t = 20 min.	t = 30 min.	t = 60 min.
seuil d'écoulement (Pa)	(4,0) 11,637	(3,4) 11,160	(4,7) 19,98	(5,4) 11,997	(7,7) 11,637	(3,4) 11,877
surface de thixotropie (Pa s -1)	(16,8) 208,2	(0,7) 215,6	(8,4) 210,5	(3,7) 209,0	(11,8) 229,5	(18,9) 240,5
viscosité plastique (m Pa.s)	(6,9) 464,9	(5,0) 478,9	(5,6) 503,6	(4,8) 497,9	(4,5) 479,9	(7,4) 439,0

TABLEAU 21 : **INFLUENCE DU TEMPS DE SEJOUR A TEMPERATURE AMBIANTE (19°C) DU YAOURT BRASSE SUR LES TROIS GRANDEURS RHEOLOGIQUES FONDAMENTALES** (moyenne et écart-type de 3 mesures).

En pratique, il n'est pas envisageable de recommencer indéfiniment une mesure sous prétexte que la situation idéale n'est pas réalisée. Afin de déterminer l'influence de la quantité excédentaire, trois situations ont été réalisées (voir figure **30**). L'analyse des résultats montre que les situations 1, 2 et 3 conduisent aux mêmes résultats pour la mesure du seuil. Cependant, si l'on prend en compte la surface de thixotropie, on constate que la situation 3 est légèrement différente.

En conclusion, la quantité de produit à déposer doit être telle qu'elle corresponde aux cas 1 ou 2.

3.2.2.2 Etude du temps de séjour de l'échantillon avant la mesure

Les temps de séjour de l'échantillon à température ambiante avant la mesure rhéologique que nous avons étudiés étaient de 10 secondes, 5 mn, 10 mn, 20 mn, 30 mn, 60 mn. Trois mesures ont été effectuées pour chaque lot. Une analyse de variance des résultats obtenus a montré que les mesures n'étaient pas significativement différentes -voir tableau **21** - nous n'avons donc pas retenu ce "paramètre produit" comme pouvant influer la caractérisation rhéologique.

3.2.2.3 Etude du mélange préalable du yaourt brassé

La mise au point du protocole de mesure nous a conduit à observer un gradient de texture entre la surface et le fond du pot de yaourt brassé, qui peut apparaitre en particulier du fait du stockage. Ce phénomène peut parfaitement être quantifié par le rhéomètre mais, en première approche, nous avons préféré caractériser le yaourt brassé au moyen d'une valeur globale représentant l'ensemble du pot.

Il nous a donc fallu envisager un système de mélange simple qui ne devait pas changer les valeurs moyennes de texture du yaourt.

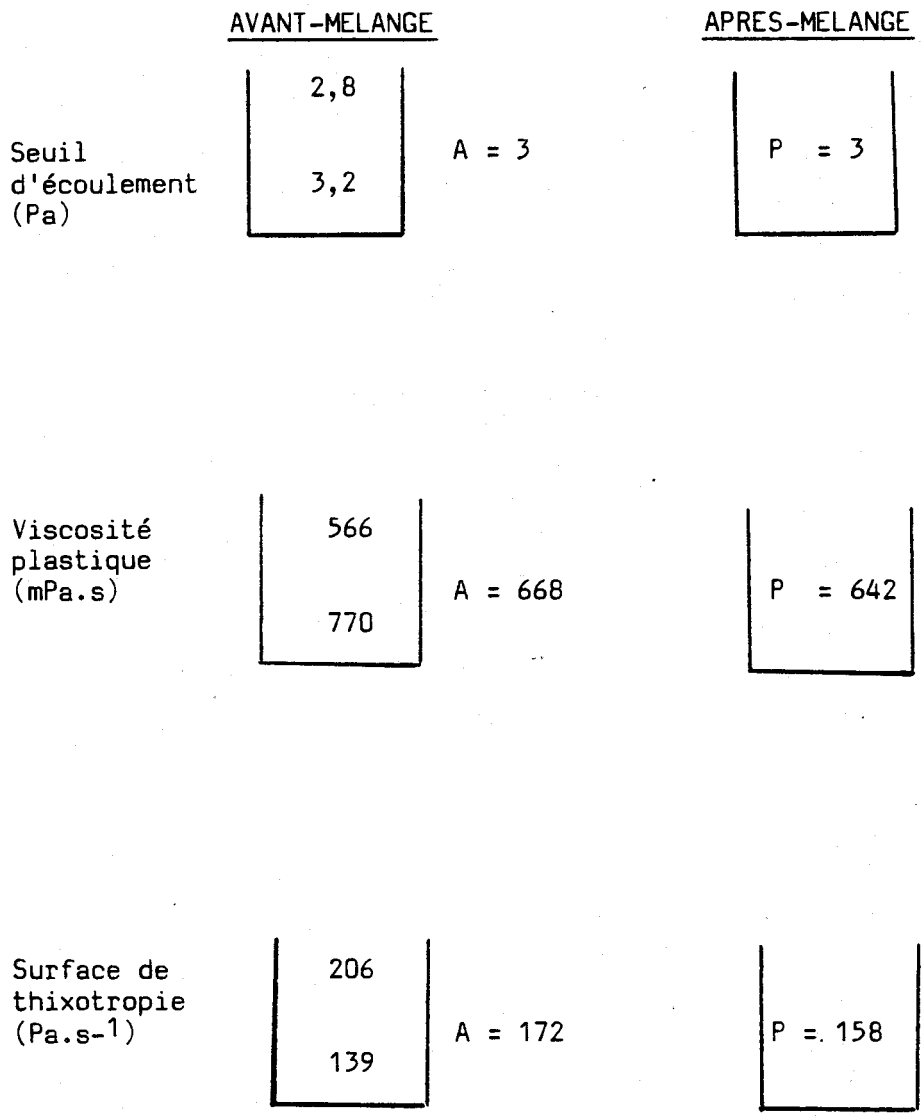
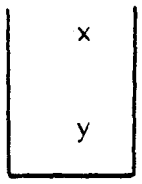


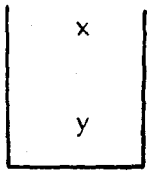
FIGURE 31 : HETEROGENEITE EN POT ET EFFET DU MELANGE PRECONISE SUR DIFFERENTES CARACTERISTIQUES DU YAOURT BRASSE NATURE

Le système retenu a été un mélange manuel régulier, par 4 tours de cuillère maintenue dans un plan vertical, de l'ensemble du yaourt brassé. Nous avons utilisé la démarche schématisée ci-dessous :

AVANT MELANGE



APRES MELANGE



avec :

xa,ya : grandeur rhéologique de surface et de profondeur avant mélange.

xp,yp : grandeur rhéologique de surface et de profondeur après mélange.

A : grandeur rhéologique moyenne du yaourt avant mélange = $\frac{xa + ya}{2}$

P : grandeur rhéologique moyenne du yaourt après mélange = $\frac{xp + yp}{2}$

Le mélange est efficace si yp - xp significativement inférieur à ya - xa

Le yaourt brassé est mélangé si yp - xp est du même ordre de grandeur que l'erreur de mesure.

La texture du yaourt brassé mélangé est préservée si A n'est pas significativement différent de P compte tenu de l'erreur de mesure.

Les résultats obtenus (figure 31) montrent que nous avons effectivement mélangé puisque les valeurs xp et yp n'étaient plus différentes compte tenu de la répétabilité de la mesure, mais égale à une valeur moyenne. De plus, cette moyenne P n'était pas différente de la valeur moyenne A des 2 mesures rhéologiques obtenues avant mélange ; la texture du yaourt est ainsi préservée par notre procédé de mélange.

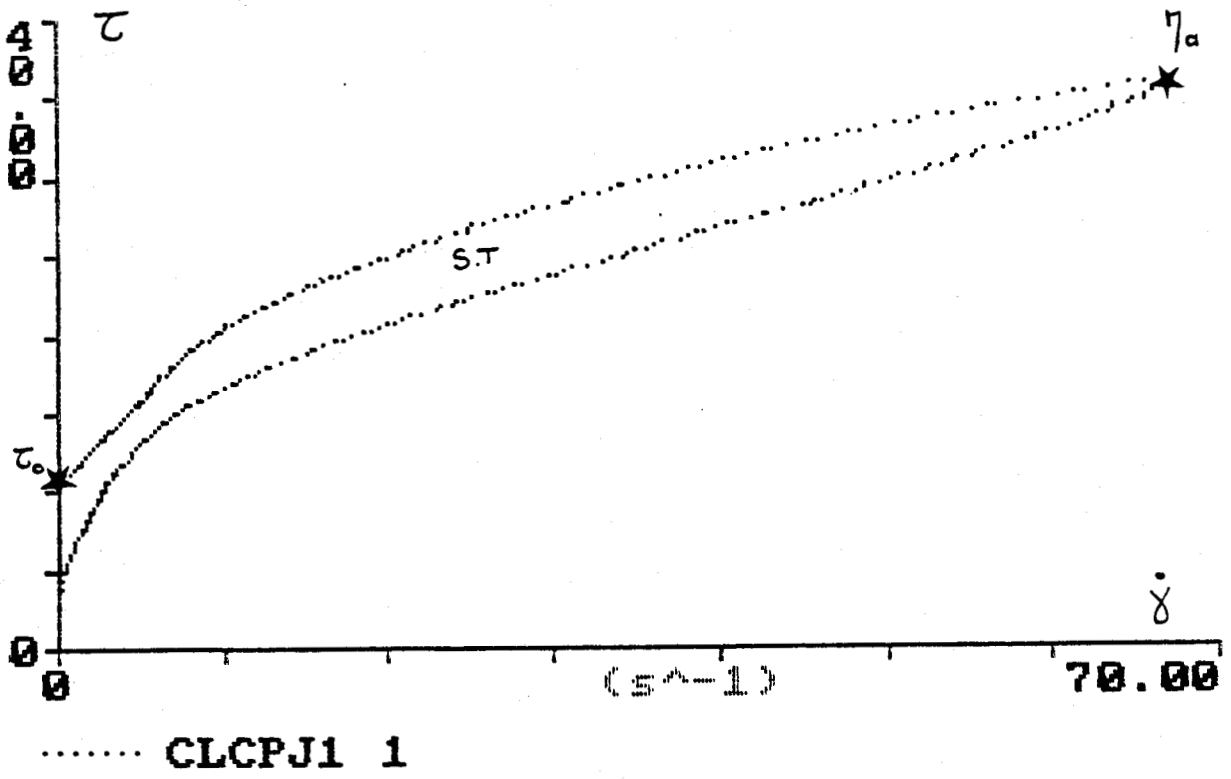


FIGURE 32 : EXEMPLE DE RHEOGRAMME OBTENU POUR UN YAOURT BRASSE NATURE (Fabrication SODIMA - CLCP)

3.2.2.4 Etude d'un yaourt brassé à la pulpe de fruit

Un lot de yaourt brassé YOPLAIT à la pulpe de Fraise de marque CARESSE a été caractérisé à l'aide du rhéomètre CARRIMED. L'allure générale du rhéogramme n'est pas affectée par la présence de pulpe, il n'y a pas d'irrégularité notable sur les courbes "montée" ou "descente". Ceci est valable quelque soit le type de pulpe utilisé à condition que la taille des morceaux de pulpe soit suffisamment petite.

3.3 Le protocole de mesure rhéologique du yaourt brassé

Suite aux travaux exposés dans les paragraphes précédents, nous avons donc utilisé le protocole suivant :

1.- Mélange préalable lent et régulièr du yaourt brassé (4 tours de cuillère par un mouvement vertical).

2.- Prélèvement de l'échantillon plutôt en surface, avec précaution.

3.- Dépôt sur le plateau d'une quantité correcte de produit (1 petite cuillère rase, environ 5 g).

4.- Température de mesure égale à 20°C.

5.- Couple maximal imposé égal à 6.00 N.m. soit une contrainte maximale imposée égale à 35.8 Pa.

6.- Temps d'équilibre (température et tête de mesure).. : 1 mn

7.- Temps de montée à la contrainte maximale..... : 2 mn

8.- Temps de maintien à la contrainte maximale..... : 0 sec

9.- Temps de descente jusqu'à contrainte nulle..... : 2 mn

3.4 Les grandeurs rhéologiques caractéristiques

A l'aide du protocole fixé, nous obtenons pour le yaourt brassé, des rhéogrammes tels que celui représenté sur la figure 32. Tous les rhéogrammes obtenus présentaient une allure comparable.

3.4.1 Les grandeurs fondamentales

Sur ces graphes, nous décidons de retenir dans un premier temps, quatre grandeurs rhéologiques fondamentales caractéristiques du yaourt brassé :

- le seuil d'écoulement observé noté τ_0 ou SEU, exprimé en Pa.
- la "viscosité" obtenue à la contrainte maximale de 35.7 Pa fixée par le protocole, notée η_a ou VAP, exprimée en mPa.s.
- la viscosité plastique, correspondant à la vitesse de cisaillement maximale atteinte par le yaourt brassé, notée η_{pl} ou VPL.
- la surface de thixotropie, notée ST, calculée par le logiciel CARRIMED (voir annexe 1).

3.4.2 Le modèle rhéologique, description globale de l'écoulement du yaourt brassé

Si l'on considére uniquement la courbe aller du rhéogramme (contrainte croissante), nous voyons que la viscosité apparente n'est pas constante. La valeur de viscosité établie à la contrainte maximale pour intéressante qu'elle soit, peut s'avérer insuffisante. Il manque un indicateur qui rende compte globalement du comportement du yaourt. La recherche d'une modelisation rendue possible par le logiciel CARRIMED permet cette appréciation d'ensemble.

Nous avons voulu vérifier que le modèle général de type loi en puissance avec seuil, relevé dans la littérature pour le yaourt brassé s'ajustait expérimentalement le mieux et le plus souvent possible aux lots de yaourt brassé caractérisés.

MODELE ETUDIE	HERSCHELL-BULCKLEY				CASSON			
	COURBE ALLER		COURBE RETOUR		COURBE ALLER		COURBE RETOUR	
	C.C	disp	C.C	disp	C.C	disp	C.C	disp
X	0,992	25	0,99	36	0,986	35	0,986	30
e.t	0,003	11	0,003	11	0,006	15	0,005	10

TABLEAU 22 : **AJUSTEMENT COMPARE DU RHEOGRAMME DU YAOURT BRASSE PAR LES MODELES "HERSCHEL-BULKLEY" ET "CASSON"**

Modèle rhéologique	H.B. COURBE ALLER PARTIELLE		E.P. COURBE ALLER PARTIELLE	
	C.C	disp	C.C	disp
X	0,995	10,7	0,997	10,9
e.t	0,004	6	0,001	3,3

TABLEAU 23 : **AJUSTEMENTS COMPARES DE H.B. ET E.P. SUR LA COURBE ALLER PARTIELLE DU RHEOGRAMME DU YAOURT BRASSE**

Légende : cc : coefficient de corrélation, disp: dispersion

X : moyenne obtenue sur les 11 échantillons.
et : écart-type obtenus sur les 11 échantillons.

3.4.2.1 Choix du modèle rhéologique

Le comportement rhéologique du yaourt brassé pouvait être traduit par les modèles de "CASSON" ou "d'HERSHEL-BULKLEY" (H.B.). L'étude menée sur 17 échantillons différents a conduit au choix du modèle H.B. ajusté par le logiciel sur la courbe aller du rhéogramme (tableau 22).

3.4.2.2 Etude détaillée de la courbe montante

. étude manuelle de rhéogrammes

Si l'on suppose que la courbe est ajustée par le modèle H.B., nous avons : $\tau = \tau_0 + K.\dot{\gamma}^n$

d'où Log $(\tau - \tau_0)$ = Log K + n Log $\dot{\gamma}$ qui est l'équation d'une droite.

Un travail réalisé sur plusieurs rhéogrammes a montré que le début des courbes en coordonnées logarithmiques n'était pas linéaire. La vitesse de cisaillement limite à partir de laquelle l'ajustement linéaire était plus satisfaisant a donc été recherché (FALCONNIER, 1987). L'observation de 11 "courbes montantes" sur des yaourts brassés de différentes fabrications a permis de fixer une valeur limite de la vitesse de cisaillement égale à 6 s^{-1}. Nous avons donc décidé de modeliser par H.B. lescourbes montantes partielles (de 6 s^{-1} à la fin) ; de cette façon, on note une amélioration du C.C. qui passait en moyenne de 0,9763 à 0,9812.

. Utilisation du logiciel CARRIMED pour l'ajustement de la courbe montante partielle

L'utilisation du logiciel pour le calcul des ajustements par H.B. sur la courbe aller partielle a mis en évidence quelques problèmes. Le fait de se placer à $\dot{\gamma}$ = 5,9 s^{-1} ; 6 s^{-1} ou 6,1 s^{-1} ne conduisait pas toujours au même ajustement pour une même courbe. Ceci était lié à l'utilisation du seuil dynamique (calculé à partir d'une régression sur les cinq premiers pourcentages de points de la courbe retenue, ce qui pouvait conduire à des erreurs si parmi eux, il y a un point aberrant) lors du calcul par H.B., et non pas du seuil observé.

PRODUIT : ORIGINE :

DLC :

REFERENCES FICHIERS :

PROTOCOLE

RHEOMETRE CARRIMED

Température de mesure :
Couple/Contrainte maximum :
Temps de mise en température :
Temps de montée en contrainte :
Temps de descente en contrainte :
Type de module :

PRODUIT

Temps de stockage :
Température de stockage :
Homogénéisation :

Lieu de prélèvement :

RESULTATS

Grandeurs rhéologiques élémentaires

Variable	Moyenne	S_m	Unités S.I
Seuil		0.5	Pa
V A P		52	mPa.s
V P L		35	mPa.s
S T		C.V. = 10%	$Pa.s^{-1}$

Modèle rhéologique

Variable	Moyenne	S_m	Unités S.I
K		0.3	Pas^n
n		0.01	

VISCOSITE BROOKFIELD

COMMENTAIRES

FIGURE 33 : FICHE D'IDENTITE RHEOLOGIQUE D'UN YAOURT BRASSE

Une solution envisageable était l'ajustement par une équation en puissance (E.P.) ne faisant pas intervenir le seuil.

C'est ce que nous avons alors entrepris et le tableau 23 reprend les résultats d'ajustement comparés selon H.B et l'équation en puissance sur les courbes aller partielles de 11 échantillons différents - voir rhéogrammes en annexe 2. Ceci montre qu'il est préférable de choisir le modèle d'équation en puissance pour obtenir le meilleur ajustement, le plus souvent.

Remarque : notons que l'indicateur de dispersion de l'ajustement est inférieur à 10, c'est la limite que nous nous sommes fixé pour valider l'ajustement du modèle. Signalons aussi qu'il aurait été souhaitable que l'échantillonnage des points lors de la mesure se fasse en progression géométrique, ce qui n'était pas le cas du logiciel alors utilisé.

3.5 La fiche d'identité rhéologique du yaourt brassé

Le yaourt brassé peut être alors caractérisé par une fiche d'identité rhéologique où sont repris le protocole et les résultats des mesures de texture effectuées par le rhéomètre CARRIMED - voir figure 33. Nous avons donc retenu 4 grandeurs rhéologiques fondamentales :

- le seuil d'écoulement,
- la viscosité mesurée à la contrainte de 35.8 Pa,
- la viscosité plastique correspondante,
- la surface de thixotropie.

Nous y avons ajouté deux indicateurs obtenus grâce à la modelisation par le logiciel selon une équation en puissance de la courbe "montante partielle" à partir de la vitesse de cisaillement de 6 s^{-1}.

- le coefficient constant de la loi en puissance (K),
- l'indice d'exposant de la vitesse de cisaillement (n).

Cette fiche est utilisable pour le yaourt brassé nature ou à la pulpe de fruits.

grandeur rhéologique	étendue du domaine de mesure	ECART-TYPE	DEGRE DE LIBERTE
seuil d'écoulement (Pa)	2 à 20	0,5	44
viscosité apparente (mPa.s)	500 à 1 400	52	38
viscosité plastique (mPa.s)	200 à 1 200	35	38
surface de thixotropie ($Pa.s^{-1}$)	15 à 380	coefficient de variation 10 %	
K ($Pa.s^{n}$) coefficient de consistance	6,5 à 12	0,3	17
n (-) indice d'écoulement	0,3 à 0,5	0,01	17

Tableau 24 : **REPETABILITE DES GRANDEURS RHEOLOGIQUES DU YAOURT BRASSE MESUREES PAR LE RHEOMETRE CARRIMED**

Pour la surface de thixotropie, nous n'avons pas d'écart-type standard de répétabilité, mais il existe une relation :
Ecart-type = 0,0869 x moyenne pour $15 < ST < 380$ $Pa.s.^{-1}$
On exprime alors un coefficient de variation :

$$\frac{\text{Ecart-type}}{\text{Moyenne}} = C.V = 8,7\ \%$$

Cependant, pour plus de sûreté, nous avons choisi de prendre en pratique un coefficient de variation égal à 10 %.

3.6 La répétabilité du protocole de mesure de la texture

Le protocole de mesure précisément défini, nous avons caractérisé sa répétabilité.

Au cours de nos essais, chaque lot homogène de yaourt brassé a fait l'objet de plusieurs mesures rhéologiques. La dispersion entre les mesures dans un lot était imputable à la répétabilité de la mesure par le rhéomètre lui-même. Nous avons vérifié que pour chaque lot, les écarts-types estimant la répétabilité étaient du même ordre de grandeur (test de BARLETT à 95 % - logiciel LUMIERE). Ceci nous a permis d'établir des écarts-types fusionnés standards de répétabilité du protocole, pour chacune des grandeurs rhéologiques élémentaires, voir tableau 24.

4.- EVALUATION SENSORIELLE DU YAOURT BRASSE

La méthodologie de l'évaluation sensorielle du yaourt brassé que nous nous sommes attachés à mettre au point s'est décomposée en deux démarches complémentaires :

- l'établissement d'une fiche d'évaluation sensorielle,
- la constitution d'un "jury entrainé" dont on connait la répétabilité de jugement.

4.1 La fiche d'évaluation sensorielle de la texture

4.1.1 Méthodes de mise au point de la Fiche

Différentes étapes ont été suivies pour établir une fiche d'évaluation qui devait répondre aux caractéristique suivantes :

- claire, schématique, la plus complète possible,
- parlante pour le dégustateur,
- traitement des résultats simple pour l'organisateur.

Afin de mieux caractériser les paramètres de texture du yaourt brassé, nous vous demandons de participer à l'élaboration d'un VOCABULAIRE DE LA TEXTURE.

Voici 6 échantillons de

YAOURT BRASSE NATURE

numérotés de 1 à 6

- Pour chacun d'eux, il s'agit d'apprécier :

. la texture en pot
. la texture en bouche

- Pour chacune de ces 2 opérations, cochez . sur la feuille jointe LE OU LES QUALIFICATIFS QUE DECRIVENT LE MIEUX, selon vous la texture du yaourt.

QUALIFICATION PAR ORDRE ALPHABETIQUE	ABREVIATIONS		TEXTURE DU YAOURT BRASSE											
	EN POT	EN BOUCHE	TEXTURE EN POT						TEXTURE EN BOUCHE					
YAOURTS			Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6
AEREE	AEP	AEB	0	0	0	0	0	8	0	0	1	0	1	2
COLLANTE	COP	COB	0	2	1	1	1	3	0	1	2	0	4	3
COURTE	CUP	CUB	2	1	1	0	3	1	0	1	0	0	1	0
CREMEUSE	CRP	CRB	2	1	1	0	3	1	0	6	5	1	4	3
DELIEE	DEP	DEB	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0
EPAISSE	EPP	EPB	0	13	5	1	13	3	0	4	2	1	6	1
FILANTE	FIP	FIB	3	0	14	2	0	7	0	0	1	0	0	2
FLUIDE	FLP	FLB	5	0	3	4	5	9	2	1	1	1	0	2
"FLOTTARDE"	FTP	FTB	8	0	0	0	0	2	10	0	0	2	0	3
FUISONNEE	FOP	FOB	0	0	0	0	0	2	—	—	—	—	—	—
FONDANTE	FDP	FDB	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	2
GLAIREUSE	GLP	GLB	0	1	1	0	1	0	1	0	3	2	0	2
GLUANTE	GUP	GUB	5	1	1	3	0	2	4	1	0	2	1	3
LEGERE	LEP	LEB	14	0	0	0	0	3	7	0	0	0	0	1
LIQUIDE	LQP	LQB	1	0	4	2	1	1	0	0	0	0	0	1
LONGUE	LOP	LOB	0	10	6	0	4	1	0	6	5	0	7	2
ONCTUEUSE	ONP	ONB	0	1	0	0	6	0	0	2	3	2	2	0
PATEUSE	PAP	PAB	0	0	0	1	0	0	3	3	0	5	0	0
RAPEUSE	RAP	RAB	-	-	-	-	-	-	4	1	1	4	0	0
RECHE	REP	REB	0	2	0	0	2	0	0	3	7	1	5	3
RONDE	ROP	ROB	0	0	1	12	0	0	1	1	1	6	1	1
SABLEUSE	SAP	SAB	0	2	2	0	2	1	0	0	1	1	0	2
SOUPLE	SOP	SOB	0	0	0	1	0	0	0	1	2	0	3	2
VISQUEUSE	VIP	VIB	0	2	1	0	2	0	0	1	1	0	2	0
AUTRES GRANULEUX	GRP	GRB	0	0	1	7	0	3	0	0	1	3	1	1
CORPS EN BPUCHE	-	CPB	-	-	-	-	-	-	0	1	1	0	1	0

FIGURE 34 : LISTE DES TERMES SUSCEPTIBLES DE DECRIRE LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE ET EPREUVE PROPOSEE.

(nous avons reporté sur la fiche les fréquences obtenues par chacun des descripteurs)

1ère étape :

Génération d'üne liste ouverte de descripteurs. Une discussion ouverte a été engagée avec les personnes travaillant au "C.R.I.A.G." qui a permis de retenir la liste des 27 descripteurs (figure **34**).

2ème étape : Test des descripteurs - caractérisation de 6 yaourts brassés

A l'aide de ces descripteurs, nous avons demandé de caractériser 6 yaourts brassés natures de différentes textures :

- 1 yaourt à boire : (Y1)
- 1 yaourt brassé au lait entier YOPLAIT : (Y3)
- 2 yaourts brassés au lait entier d'autres marques : (Y2), (Y5).
- 1 yaourt brassé "maigre" : (Y4)
- 1 "coagulum lactique", prélevé dans la cuve de fermentation industrielle et conditionné manuellement en pot de 125 g (Y6)

Chaque échantillon était conditionné dans des pots identiques, non identifiables à priori. L'épreuve proposée aux 17 personnes du Centre de Recherches est représentée sur la figure - **34.**

3ème étape : Calcul des Fréquences des termes les plus cités

Nous avons réalisé ce travail afin d'avoir une première idée des fréquences de citation de chaque descripteur utilisé pour décrire la texture perçue en pot et en bouche. Les 52 termes sauf un ("corps en pot") ont été utilisés. Les fréquences obtenues sont reportées sur la figure **34.**

4 ème étape : Réduction des descripteurs par l'analyse Factorielle des correspondances (AFC)

Ce tableau de fréquences a servi de base à une Analyse Factorielle des Correspondances (AFC), (MOREAU, 1987). Les lignes des descripteurs constituent les observations sur les "yaourts" ou variables, en colonnes.

1ère étape :

Génération d'üne liste ouverte de descripteurs. Une discussion ouverte a été engagée avec les personnes travaillant au "C.R.I.A.G." qui a permis de retenir la liste des 27 descripteurs (figure 34).

2ème étape : Test des descripteurs - caractérisation de 6 yaourts brassés

A l'aide de ces descripteurs, nous avons demandé de caractériser 6 yaourts brassés natures de différentes textures :

- 1 yaourt à boire : (Y1)
- 1 yaourt brassé au lait entier YOPLAIT : (Y3)
- 2 yaourts brassés au lait entier d'autres marques : (Y2), (Y5).
- 1 yaourt brassé "maigre" : (Y4)
- 1 "coagulum lactique", prélevé dans la cuve de fermentation industrielle et conditionné manuellement en pot de 125 g (Y6)

Chaque échantillon était conditionné dans des pots identiques, non identifiables à priori. L'épreuve proposée aux 17 personnes du Centre de Recherches est représentée sur la figure - 34.

3ème étape : Calcul des Fréquences des termes les plus cités

Nous avons réalisé ce travail afin d'avoir une première idée des fréquences de citation de chaque descripteur utilisé pour décrire la texture perçue en pot et en bouche. Les 52 termes sauf un ("corps en pot") ont été utilisés. Les fréquences obtenues sont reportées sur la figure 34.

4 ème étape : Réduction des descripteurs par l'analyse Factorielle des correspondances (AFC)

Ce tableau de fréquences a servi de base à une Analyse Factorielle des Correspondances (AFC), (MOREAU, 1987). Les lignes des descripteurs constituent les observations sur les "yaourts" ou variables, en colonnes.

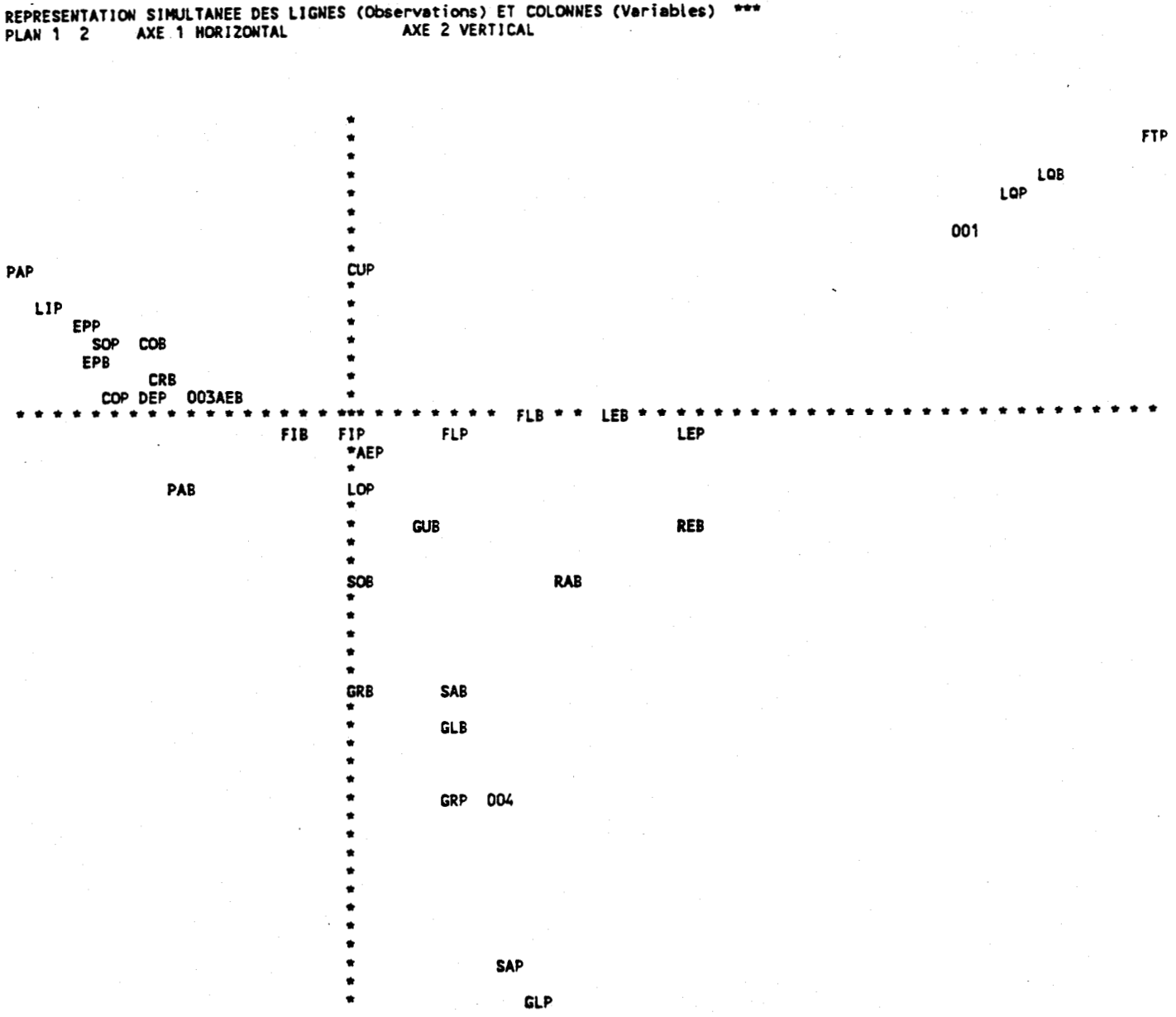


FIGURE 35 : REPRESENTATION PAR ANALYSE FACTORIELLE DES CORRESPONDANCES DE LA PROXIMITE DES DESCRIPTEURS DE LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE

POINT VU : FTP	POINT CACHE : FTB	POINT VU : CUP	POINT CACHE : CRP
POINT VU : SOP	POINT CACHE : FDB	POINT VU : AEP	POINT CACHE : FOP
POINT VU : AEP	POINT CACHE : LOB	POINT VU : EPP	POINT CACHE : FDP
POINT VU : EPP	POINT CACHE : ONB	POINT VU : EPP	POINT CACHE : GUP
POINT VU : CRB	POINT CACHE : ROB	POINT VU : EPP	POINT CACHE : ONP
POINT VU : COB	POINT CACHE : VIB	POINT VU : GLP	POINT CACHE : RAP
POINT VU : LIP	POINT CACHE : LIB	POINT VU : PAP	POINT CACHE : ROP
POINT VU : EPP	POINT CACHE : CPB	POINT VU : GLP	POINT CACHE : VIP
POINT VU : EPP	POINT CACHE : 002	POINT VU : PAP	POINT CACHE : CUB
POINT VU : EPP	POINT CACHE : 005	POINT VU : GLP	POINT CACHE : DEB
POINT VU : FIP	POINT CACHE : 006		

L'ensemble du nuage de points correspondant a été réduit dans un espace à trois dimensions.Aux trois premiers axes étaient respectivement attribués 40,9 %, 29,3 %, et 17,6 % soit 88 % de l'information, le quatrième axe en représentait 8.1 % (voir annexe 3).

- l'axe 1 signifiait la liquidité et/ou l'épaisseur (FTP : 12.2 % ; LQP : 17,7 % ; LQB : 9.4 % ; FTB : 15.2 % ; EPP : 5.9 %). Nous remarquons que les descripteurs "liquide en pot" et "liquide en bouche" sont superposés ainsi que les descripteurs "épais en pot" et "épais en bouche".

- l'axe 2 était un axe de granulométrie (SAP et GRP expliquaient à eux seuls 39.2 % de l'axe tout en lui étant bien corrélés.

- l'axe 3 indiquait plutôt l'aspect aéré du produit (AEP : 26 %).

- l'axe 4 était défini à 30.7 % par le descripteur FIP (Filant en Pot).

Nous avons pu remarquer que le poids du descripteur aéré venait de l'échantillon de yaourt brassé à boire proposé qui était anormalement aéré, sans doute du fait d'un défaut de fabrication.

5ème étape :

Rédaction d'un projet de Fiche d'évaluation sensorielle, réalisation des dégustations puis discussion autour de cette Fiche - avec l'ensemble des juges - sur les résultats obtenus

Le projet de fiche reprenait à ce stade les descripteurs :

. liquide/épais en pot,
. filant en pot,
. aspect sableux et/ou granuleux en pot,
. flottard/épais en bouche,
. onctueux en bouche.

Les trois premier s descripteurs avaient directement pour origine les résultats de l'AFC.

Le descripteur "onctueux en bouche" a été employé car il correspondait à un concept-produit très utilisé, mais nous avions noté qu'il était peu discriminant en AFC (cos2 = 0.77, contribution maximale 3.3 % de l'axe 1).

Les descripteurs flottard/épais en bouche ont été maintenu bien que l'AFC nous ait montré qu'ils étaient superposés aux descripteurs correspondants en pot.

En effet, une dégustation réalisée sur deux yaourts brassés qui différaient par les ferments utilisés et leur teneur en matière grasse avait révélé un classement différent selon que l'on considérait la texture en pot ou la texture en bouche. Ceci indiquait que suivant le facteur de variation de la texture mis en oeuvre, il pouvait y avoir effectivement divergence entre texture épaisse perçue en pot et texture épaisse perçue en bouche. Cela n'était pas le cas lors de l'épreuve proposée pour la génération du tableau de fréquence,

6 ème étape :
Adoption et mise en oeuvre dans sa version définitive de la "Fiche d'évaluation sensorielle

A ce stade, les séances d'évaluations sensorielles de yaourt brassé ont été régulières et hebdomadaires, voire bihebdomadaires. Une discussion générale après 13 séances a permis d'arrêter la fiche d'évaluation sensorielle de la texture du yaourt brassé dans sa forme définitive (figure 37).

Cette discussion a essentiellement porté sur les points suivants :

1°- le descripteur granuleux/sableux était en fait un descripteur binaire ; soit les yaourts brassés étaient hétérogènes (granuleux ou sableux) soit ils étaient homogènes (lisse). Le descripteur était qualitatif.

- Produit qui a en bouche la consistance de la crème.
- Produit à la limite d'être "glaireux".
- Un produit liquide est onctueux.
- Un produit épais est onctueux.
- Un produit hétérogène ne peut pas être onctueux.
- Produit d'écoulement facile, qui glisse en bouche.
- Produit un peu filant.

FIGURE 36 : **DIVERSES DEFINITIONS DE L'ONCTUEUX PROPOSEES PAR LES DEGUSTATEURS**

2°- les autres descripteurs étaient quantitatifs, ils pouvaient être jugés sur des échelles et notés de 1 à 5 points.

3°- le descripteur "onctueux" bien que très souvent employé, semblait revêtir des sens très différents suivant les juges. En effet, lorsque nous avons demandé lors d'une dégustation de le définir, des définitions très diverses (figure 36) ont été simultanément avancées. Ceci nous a fait évolué après la série de dégustation hebdomadaire vers le terme "collant en bouche" (cos2 = 0.42 et contribution égale à 1 %) qui avait une qualité de représentation faible, mais qui présentait l'avantage de correspondre à une définition physique beaucoup plus précise.

En outre, la discussion avec les juges faisait ressortir la nécessité d'un deuxième descripteur pour juger de la texture en bouche.

4°- les appréciations d'acidité et de goût global du yaourt brassé devaient être maintenues sur la fiche en cas d'interactions éventuelles avec la texture mais surtout du fait de l'objectif même de la fiche puisqu'il s'agissait en définitive non seulement de caractériser mais encore d'améliorer la texture sans altérer les autres caractéristiques du yaourt.

4.1.2 Choix des échelles

Chaque descripteur quantitatif de la texture pouvait être évalué à l'aide de trois échelles d'intensité de 1 à 5 points : semi-structurée, non structurée, structurée à 9 barreaux. Une dégustation comparative utilisant les 2 dernières échelles (les plus performantes au niveau de la discrimination et de la répétabilité) a permis de choisir une échelle structurée à 9 barreaux pour sa simplicité de dépouillement, car elle ne donnait pas de moins bons résultats que l'échelle non structurée (MOREAU, 1987).

4.1.3 Version retenue de la fiche d'évaluation sensorielle de la texture du yaourt brassé

La fiche d'évaluation sensorielle que nous avons retenue est donc utilisable au stade recherche, elle a pour objectif la description du yaourt brassé selon une méthode de type profil. Elle doit permettre de traduire l'influence de tel ou tel paramètre de fabrication sur les différents descripteurs de la texture du produit, sans oublier d'indiquer les effets extrêmes du point de vue acidité et/ou préférence gustative. Elle se compose de deux "volets" :

- le "mode opératoire", (figure 37 - A) qui, pour chaque descripteur, propose un protocole de dégustation qui indique comment prélever l'échantillon, comment percevoir et analyser la sensation.

- la fiche d'évaluation proprement dite (figure 37 - B). La distinction est faite entre texture perçue en pot et texture perçue en bouche. La fiche retenue dans sa dernière version utilise des échelles structurées à 9 barreaux sauf pour l'appréciation du caractère lisse ou hétérogène.

4.2 Le jury : instrument de mesure

4.2.1 Méthode d'approche de la répétabilité du jury

Une difficulté préalable importante consistait à estimer la répétabilité dans le temps d'un jury sur des produits qui eux mêmes variaient du fait de l'aléa de fabrication. La démarche utilisée a donc consisté à décomposer les sources de variance, sur un cycle de 12 dégustations hebdomadaires(MOREAU, 1987). Il s'agissait de connaitre la répétabilité du jugement de chaque juge pour chaque descripteur de la Fiche d'évaluation sensorielle puis d'établir la répétabilité de l'ensemble du jury du Centre de Recherches. La démarche suivie est rappelée en annexe 4.

Voici des échantillons de yaourt brassé . Nous vous demandons de comparer leur texture puis leur acidité et leur goût selon le mode opératoire défini ci-dessous :

1) Texture en pot

3 caractéristiques complémentaires sont à évaluer :

. liquide/épais : A évaluer par un brassage, 4 tours cuillère maintenue verticale du produit (qui simulerait par exemple le mélange de sucre en poudre)

. filant/non filant : A évaluer en levant la cuillère à la verticale du pot par des mouvements alternatifs ascendants/descendants. Un yaourt très filant formera un fil comme du gruyère fondu .

. Hétérogène/homogène : A évaluer par l'examen visuel de la pâte et la présence éventuelle de gros ou de petits grains.

2) Texture en bouche

. flottard/très épais : perception de la vitesse d'écoulement. Evaluer en cours de compression dans la bouche, la vitesse d'écoulement du yaourt dans toute la cavité buccale.

. collant/pas collant : perception de l'adhésivité au palais. Comprimer complètement le produit entre la langue et le palais et évaluer la force requise pour décoller la langue du palais.

3) Acidité

Classement des produits selon l'acidité perçue.

4) Goût

a) Ceci doit permettre d'écarter les produits à mauvais goût.
b) Puis, il s'agit d'indiquer une préférence quant au goût du produit.

FIGURE 37(A) : **MODE OPERATOIRE DE L'EVALUATION SENSORIELLE DE YAOURT BRASSE**

Voici échantillons de yaourt brassé. Nous leur demandons de les positionner sur les barreaux des échelles ci-dessous :

I - TEXTURE EN POT

liquide — très épais

très filant — non filant

Observations : Notez en particulier les yaourts ayant des grumeaux.

N° échantillon	hétérogène (grumeaux ou grains)	lisse
-		
-		
-		

II - TEXTURE EN BOUCHE

flottard — très épais

collant — pas collant

III - ACIDITE

très acide — doux

IV - GOUT - PREFERENCE

je n'aime pas — j'aime beaucoup

Notez les défauts : amertume, gout de plastique, de rance, autre...

FIGURE 37 (B) : FICHE D'EVALUATION SENSORIELLE DE LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE

IDENTIFICATION DU JUGE	ECART-TYPE SUR LES DESCRIPTEURS				
	TEP	FIL	TEB	ACI	GOUT
B.L.R.	0.19 (7)	0.68 (7)	0.53 (8)	0.95 (8)	0.52 (8)
C.P.	0.36 (5)	0.95 (5)	0.94 (7)	0.60 (6)	0.52 (6)
I.D.	0.59 (7)	0.65 (7)	0.99 (8)	0.65 (6)	0.70 (6)
D.C.	0.50 (7)	0.74 (7)	0.39 (8)	0.47 (8)	0.82 (8)
F.S.	0.14 (2)	0.88 (1)	0.58 (2)	0.79 (3)	0.64 (3)
V.F.	0.40 (4)	0.31 (4)	0.61 (5)	0.83 (4)	0.75 (6)
J.J.	0.44 (7)	0.60 (6)	0.50 (7)	1.07 (7)	0.71 (7)
P.P.	0.48 (8)	0.72 (6)	0.79 (8)	0.90 (8)	0.87 (8)
P.R.	0.14 (3)	0.47 (3)	0.51 (4)	1.50 (3)	0.50 (5)
P.D.	0.43 (3)	0.39 (2)	0.55 (3)	1.04 (3)	0.89 (3)
J.P.P.	0.22 (3)	0.42 (3)	0.73 (4)	0.41 (5)	0.64 (4)
T.B.	0.27 (3)	0.85 (1)	0.70 (4)	0.78 (4)	0.32 (3)
V.P.	0.21 (3)	0.37 (5)	0.40 (2)	0.57 (5)	0.54 (4)
C.C.	0.49 (3)	1.06 (2)	0.58 (4)	1.20 (3)	0.88 (4)
V.D.	0.47 (6)	0.47 (6)	0.67 (6)	0.81 (6)	0.79 (7)
$\bar{V}_r$ ECART-TYPE DE REPETABILITE DE L'ENSEMBLE DU JURY	0.43	0.67	0.68	0.81	0.67

TABLEAU 25 : CARACTERISATION DU JURY DU C.R.I.A.G. D'EVALUATION SENSORIELLE DE LA TEXTURE

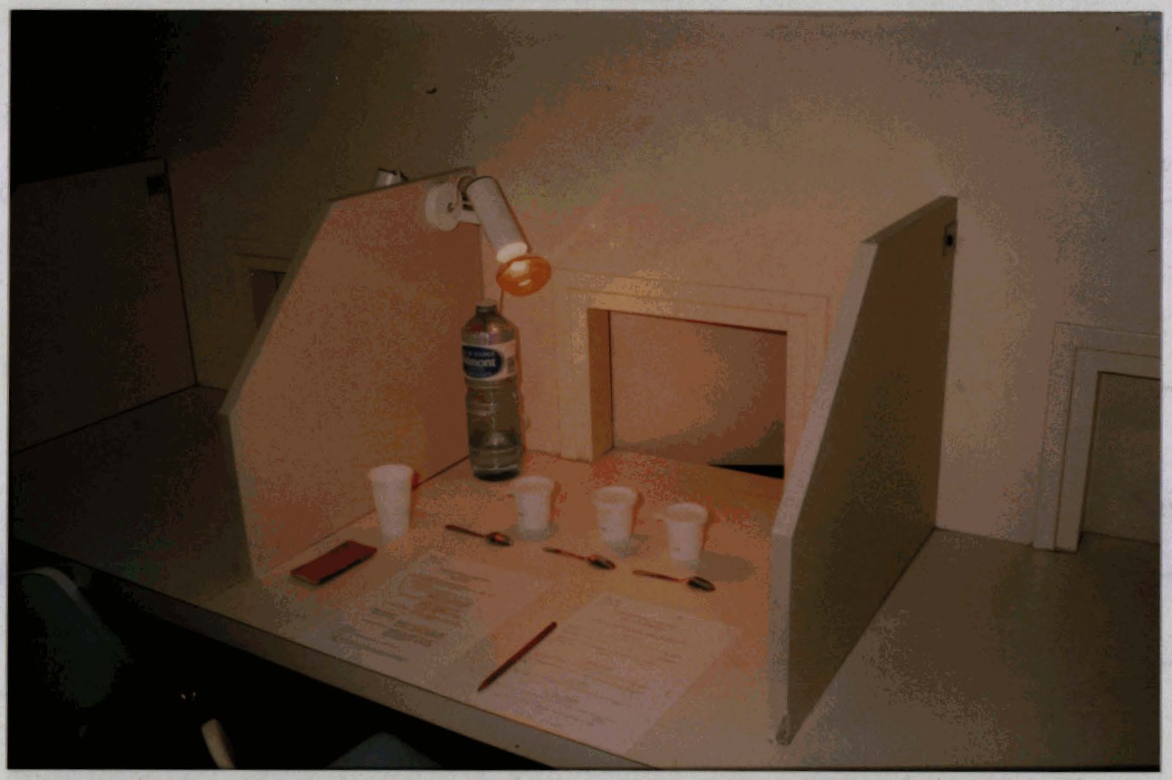


FIGURE 38 : LOCAL D'EVALUATION SENSORIELLE DU YAOURT BRASSE

4.2.2 Apprentissage et Animation du jury

Bien que le jury soit constitué d'un ensemble de personnes travaillant dans le domaine des produits laitiers frais au Centre de Recherches, un apprentissage succinct a été entrepris au cours des toutes premières séances d'évaluation, par-exemple sur le descripteur "filant", un yaourt de référence extrêmement filant, fabriqué au laboratoire, a pu servir de témoin.

Du point de vue animation, une brève discussion était organisée avant et surtout après la dégustation, elle permettait de lever les anomalies dans les réponses des dégustateurs, d'améliorer leurs performances et de dévoiler le codage des produits.

4.2.3.Caractérisation du jury

Les résultats font apparaitre l'écart-type de chaque juge (tableau 25) puis de l'ensemble du jury pour les descripteurs texture en pot (TEP) ; aspect filant (FIL) ; texture en bouche (TEB) ; acidité perçue et goût.

En définitive, l'écart-type retenu pour chaque critère est donné pour un jury de 15 personnes travaillant au C.R.I. Il a été montré que l'absence de 2 ou 3 personnes parmi le jury ne modifie pas la valeur de l'écart-type global de répétabilité du jury.

4.3 L'épreuve d'évaluation

Les produits à caractériser étaient toujours présentés codés, en emballage neutre, à température équivalente (environ 10°C). Les principales caractéristiques de l'épreuve d'évaluation sont reportées sur une fiche de compte-rendu de séance d'évaluation sensorielle (voir annexe 5).

La figure 38 présente le local où avait lieu l'épreuve d'évaluation sensorielle.

4.4 Traitements statistiques des résultats de l'évaluation sensorielle

Il est réalisé par analyse de variance grâce au logiciel de statistiques LUMIERE (voir paragraphe II.5.2).

5.- LES METHODES STATISTIQUES

5.1 Statistiques de base

La moyenne (x) de n individus (Xi) définie par $\bar{x} = \frac{\sum xi}{n}$ et l'écart-type(s) entre ces n individus défini par : $s = \sqrt{\frac{\sum (xi-\bar{x})^2}{n-1}}$ permettent d'établir le coefficient de variation (C.V.) égal à s/x exprimé en %. Cette dernière grandeur a été utilisée pour établir les aléas dus au protocole de mesure et/ou à la variabilité des procédés de fabrication.

Les tests de FISHER et de STUDENT ont été mis en oeuvre pour comparer respectivement deux écarts-types et deux moyennes. Le test de BARTLETT a été utilisé pour juger si les différents écarts-types étaient du même ordre de grandeur, ce qui permet d'obtenir un écart-type fusionné (s*).
Ces test sont réalisés par le logiciel LUMIERE version 1.1. Ce logiciel donne le niveau de confiance sur l'hypothèse H1 à savoir "les grandeurs testées sont significativement différentes". Sauf indication contraire, nous avons toujours retenu un seuil de confiance de 95 % (risque α = 5 %).

5.2 L'analyse de variance et la typologie des moyennes

L'analyse de la Variance a été utilisée pour étudier l'influence de facteurs de variations qualitatifs sur une ou plusieurs réponses. Elle s'applique en particulier à l'analyse des résultats d'une épreuve d'évaluation sensorielle où le yaourt brassé constitue le facteur de variation (p modalités), les réponses étant les notes d'évaluation (n répétitions dues aux différents juges). L'analyse de variance est alors à simple entrée. Le logiciel LUMIERE 1.1 procède de la manière suivante :

- test de la variation due au facteur par rapport à la variance résiduelle (tableau d'analyse de la variance) , on obtient le niveau de confiance sur l'hypothèse : "il existe un effet significatif du facteur sur la réponse analysée",

- calcul de l'écart-type fusionné intramodalités,

- test de FISHER entre l'écart-type intra-modalités et l'écart-type inter-modalités.

Dans le cas où l'on veut établir la variation due au jury de dégustation, l'analyse de Variance sera alors à double entrée et l'effet des facteurs juges et yaourt sera estimé soit par rapport à l'interaction s'il n'y a pas de répétition, soit par rapport à l'erreur de mesure due à la répétition du même yaourt pour le même dégustateur.

Si l'effet du facteur est significativement supérieur à l'écart-type résiduel, le logiciel LUMIERE 1.1 donne une typologie des moyennes correspondant aux différentes modalités du facteur étudié. Cette typologie est basée sur le calcul de la plus petite différence significative entre deux moyennes (P.P.D.S.), exprimée par

$$P.P.D.S. = t\ crit \times s^* \times \frac{1}{n1} + \frac{1}{n2}$$

t crit = t de STUDENT correspondant à s*.

s* = écart-type fusionné intra-modalités, avec $(n1-1)+(n2-1)$ ddl

n1 = nombre d'observations pour la moyenne 1.

n2 = nombre d'observations pour la moyenne 2.

5.3 La régression linéaire multiple

La Régression Linéaire Multiple a été utilisé pour établir une relation linéaire entre un ou plusieurs facteurs ou variables quantitatives indépendantes (Xi) et une réponse quantitative (Y). Cette technique a été utilisée par exemple pour établir des relations entre grandeurs instrumentales et sensorielles de la texture du yaourt brassé.

Mise en oeuvre par le logiciel LUMIERE 1.1, elle procède par 5 étapes successives.

1°- vérification de l'indépendance des facteurs. Ceci est possible grâce à la matrice des corrélation qui donne le coefficient de corrélation r entre chaque variable.

2°- calcul du modèle de variation de Y de la forme : $Y = ao + a1X1 + a2X2 + a3X3 + \ldots aiXi$
avec ao : effet constant, ai : effet respectif des facteurs Xi.

3°- test de la validité globale du modèle ; 2 tests sont réalisés :

. un test intrinsèque où l'on compare la Variance Expliquée (VE) par le modèle à la Variance Résiduelle (VR) : le modèle est explicatif si VE est significativement plus grand que VR.

. un test extrinsèque où l'on compare la variance résiduelle (VR) à l'erreur de mesure (sm) déterminée par ailleurs. Le modèle sera retenu si VR est du même ordre de grandeur que sm.

4°- test de la validité individuelle des coefficients ai.

L'effet d'un coefficient (ai) est significatif si $ai > tx\ s\ (ai)$
avec t : t de STUDENT
s(ai) : écart-type sur le coefficient ai

5°- détermination de l'intervalle de confiance de la valeur calculée de la réponse Y, ce qui permet d'utiliser le modèle pour faire de la prévision et de valider la linéarité du modèle.

5.4 Les méthodes multidimensionnelles

Deux méthodes géométriques ont été utilisées : l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) et l'Analyse en Composante Principale (ACP).

Ces deux méthodes sont des techniques descriptives, de représentation d'un ensemble de données dans un espace réduit. Elles ont pour origine un tableau de résultats où les colonnes sont représentées par les variables et les lignes par les individus.

L'Analyse Factorielle des Correspondances AFC s'applique à des tableaux où les données sont sous forme de fréquences, de pourcentages ou de dénombrements, ce qui est le cas de l'étude sur la réduction des descripteurs sensoriels et l'Analyse en Composante Principale (ACP) s'applique à des données quantitatives, nous l'avons utilisé pour les recherches de corrélation entre mesures instrumentales et notes sensorielles.

5.4.1 L'Analyse en Composante Principale (ACP)

Il s'agit de projeter l'ensemble du nuage de données dans un espace à 2 dimensions.

On place le centre du repère au centre de gravité du nuage, et l'on calcule de nouveaux axes, tels que :

- le premier axe soit l'axe le long duquel la dispersion du nuage est la plus grande.
- le second axe et les suivants lui soient tous orthogonaux et le soient entre eux.

On appelle ces axes, axes d'inertie. Ils sont des combinaisons linéaires de variables.La distance utilisée pour permettre cette projection est la distance euclidienne normée. On défini alors le plan principal de projection comme étant celui qui passant par le centre de gravité du nuage, possède la plus grande inertie. L'inertie étant entendue comme la somme des carrés des distances par rapport à un plan.

Mise en oeuvre de l'analyse :

La mise en oeuvre de l'analyse est réalisée par le logiciel LUMIERE version 1.1 qui donne successivement les informations suivantes :

- la matrice des corrélations sur laquelle repose le calcul des "valeurs propres" et des "vecteurs propres".

- le tableau des valeurs propres qui donne les pourcentages de la variance totale expliqués par chaque axe principal.

- le tableau des coordonnées des variables (voir annexe 6).

Il permet de connaitre les variables participant le plus à la constitution de l'axe : pour chaque axe, la 1ère colonne donne la coordonnée de la variable sur l'axe, la 2ème colonne donne le cosinus^2 de l'angle que fait la variable avec le plan de projection. Une variable sera donc bien représentative de l'axe si le cosinus^2 est proche de 1 et si les coordonnées de la variable correspondante sont élevées.

- le Cercle de Corrélation : c'est une représentation commode des variables, sur le plan formé par les axes de plus grande inertie. Le logiciel LUMIERE 1.1 trace en outre le cercle intérieur correspondant à un coefficient de corrélation cumulé de 0.707. Ceci signifie :

. qu'une variable interne à ce cercle est mal représentée.

. que deux variables bien représentées et diamétralement opposées sont anticorrélées.

. que deux variables bien représentées et situées à angle droit sont indépendantes.

. des variables bien représentées et superposées sont identiques.

. des variables bien représentées et éloignées sont différentes.

CARACTERISTIQUES DES YAOURTS		YAOURT BRASSE CLCP J1	Sm	C.V (%)
Ferment		NI	-	-
E.S.T/M.G (g/kg)		150.2/32	-	-
Acidité (°D) /note/5 37%		127.7/3.88	2/0.81	1.6/21
VISCOSITE BROOKFIELD		9666	500	5.2
RHEOLOGIE	SEUIL D'ECOULEMENT (N. m^{-2} = Pa)	10	0.5	5
	VISCOSITE APPARENTE mPa.s	544	52	9.5
	VISCOSITE PLASTIQUE mPa.s	373	35	9.3
	SURFACE THIXOTROPIE (N.m^{-2}. s^{-1})	242	21	8.7
	MODELE RHEOLOG -K	10	0.3	3
	MODELE RHEOLOG n	0.304	0.01	3
EVAL SENS. POT	EPAIS/5	2.67	0.43	16
POT	FILANT/5	3.65	0.67	18
POT	HET/LISSE	4.02	-	-
BOUCHE	EPAIS/5	3.52	0.68	19
BOUCHE	COLLANT/5	4.15	A.D	-
BOUCHE	GOUT/5	3.17	0.67	21

TABLEAU 26 : **FICHE D'IDENTITE DE TEXTURE A J + 1 D'UN YAOURT BRASSE NATURE (CLCP J1) FABRIQUE A LA C.L.C.P. (atelier ROUSSEAU)**

5.4.2 L'Analyse Factorielle des correspondances

Les principes de la méthode sont identiques à ceux de l'ACP mais le tableau de données est ici un tableau de fréquences, de plus, l'AFC permet de visualiser sur le même plan l'ensemble des variables ET l'ensemble des individus.

La mise en oeuvre de l'analyse a été réalisée par le logiciel STATITCF, lors de l'étude concernant la réduction du nombre de descripteurs générés par les membres du jury (voir paragraphe II.4).

III.- RESULTATS ET DISCUSSIONS

1.- CARACTERISATION DE LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE

1.1 Caractéristiques d'un lot de fabrication

Nous avons utilisé un lot de 30 yaourts brassés natures (DLC : 11.04.87) provenant de la fabrication de "l'atelier ROUSSEAU" de la "Coopérative Laitière Centrale de Paris".

Les yaourts ont été prélevés en sortie de la machine de conditionnement puis refroidis dans une chambre froide ventilée, et stockés dans un réfrigérateur à 10°C. Trois pots de yaourts ont été prélevés au hasard dans le lot pour les mesures rhéologiques ; 12 pour l'évaluation sensorielle.

Les différences individuelles entre les pots sont du même ordre de grandeur que les erreurs de mesures des deux méthodes précédemment définies. La "viscosité BROOKFIELD", les caractéristiques rhéologiques et sensorielles moyennes mesurées à J+1 figurent sur la fiche d'identité de texture ci-contre (tableau 26). Le rhéogramme complet d'un échantillon du lot (référence : CLCP J1) est représenté sur la figure 32.

CARACTERISTIQUES DES YAOURTS		YAOURT BRASSE	Sp	C.V (%)
Ferment		variable	-	
E.S.T/M.G (g/kg)		150.3/34.6	2.9/2	1.2/3.5
Acidité (°D) /note/5		124.6/3.3	5/0.4	4/12
VISCOSITE BROOKFIELD		9374	1541	16.4
RHEOLOGIE	SEUIL D'ECOULEMENT (N. m^{-2} = Pa)	7.4	3.5	47
	VISCOSITE APPARENTE mPa.s	637	152	30
	VISCOSITE PLASTIQUE mPa.s	499	101	20
	SURFACE THIXOTROPIE ($N.m^{-2}. s^{-1}$)	197	69	35
	MODELE RHEOLOG -K	8.4	1.7	20
	MODELE RHEOLOG n	0.35	0.04	11
EVAL SENS. POT	EPAIS/5	2.81	0.37	13
POT	FILANT/5	3.32	0.65	19
POT	HET/LISSE	3.85	0.65	17
BOUCHE	EPAIS/5	3.22	0.31	9.6
BOUCHE	COLLANT/5	3.92	0.34	8.7
BOUCHE	GOUT/5	3.33	0.40	12

TABLEAU 27 : **CARACTERISTIQUES MOYENNES ET VARIABILITE DU YAOURT BRASSE NATURE PRODUIT A LA C.L.C.P. atelier ROUSSEAU PENDANT 13 SEMAINES (un prélèvement hebdomadaire)**
(sp = écart-type entre les 13 moyennes)

L'ajustement de la courbe des contraintes croissantes par un modèle rhéofluidifiant est représenté en annexe 2.

1.2 Caractéristiques de 13 fabrications hebdomadaires de yaourt brassé nature

Nous avons prélevé chaque mercredi pendant 13 semaines dans les conditions décrites ci-dessus des lots de yaourts brassés natures. La Fiche d'identité de texture établie sur le tableau 27 donne les caractéristiques moyennes, l'écart-type inter-lots et les coefficients de variation qui rendent compte de la variabilité de la production industrielle estimée sur 13 fabrications. Tous les rhéogrammes obtenus ont une allure comparable à celui présenté figure 32.

Rappelons que pour cette étude de suivi de 13 fabrications industrielles de yaourt brassé, la Fiche d'évaluation sensorielle utilisée comportait encore le descripteur "onctueux" et l'échelle structurée pour juger de l'aspect lisse.

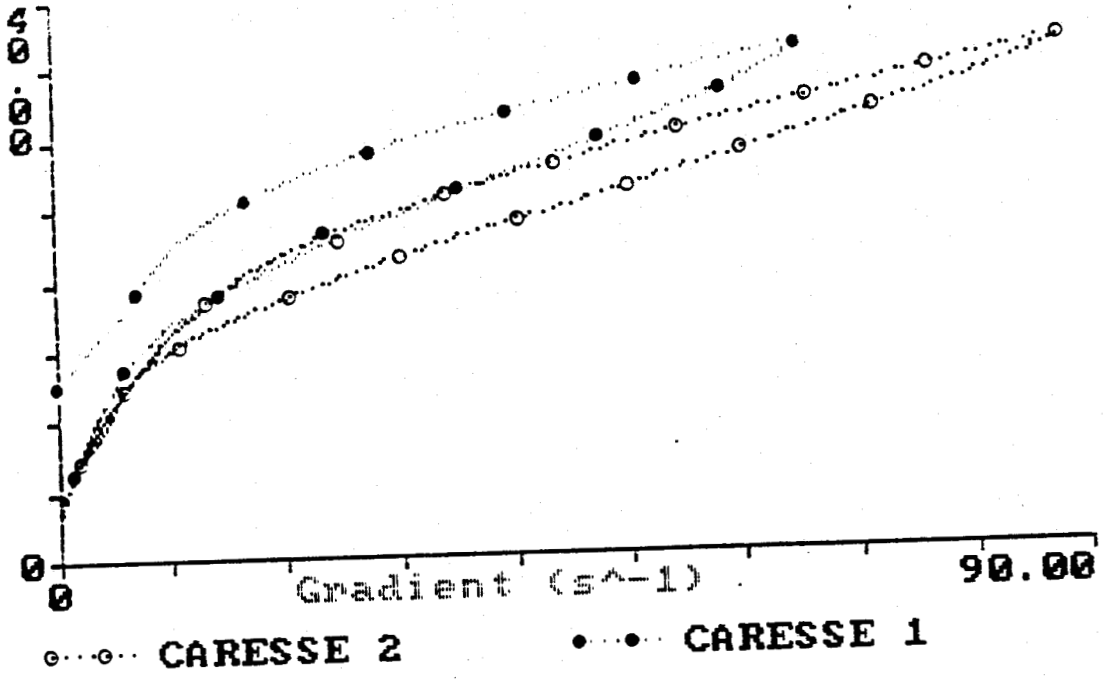
1.3 Discussion

1.3.1 Caractéristiques du yaourt brassé

. les grandeurs rhéologiques fondamentales

L'examen des rhéogrammes obtenus en contrainte croissante montre nettement que la viscosité apparente du yaourt brassé n'est pas constante, elle diminue pour atteindre une valeur moyenne de 637 mPa.s en moyenne à la contrainte maximale fixée par le protocole de mesure à 35.8 Pa. Cette valeur est à rapprocher des viscosités apparentes comprises entre 400 et 2500 mPa.s obtenus par HELLINGA (1986) pour une contrainte de 50 Pa.

Les viscosités apparentes, calculées par l'ajustement du modèle rhéofluidifiant, à la vitesse de cisaillement de 10 s-1 valent en moyenne 1720 mPa.s. DE KEE (1983) et HELLINGA (1986) avaient obtenu respectivement 3300 mPa.s et 4000 mPa.s sur le yaourt brassé, DERVISOGLU et KOKINI (1986) ont trouvé 2200 mPa.s pour du "tomato ketchup".



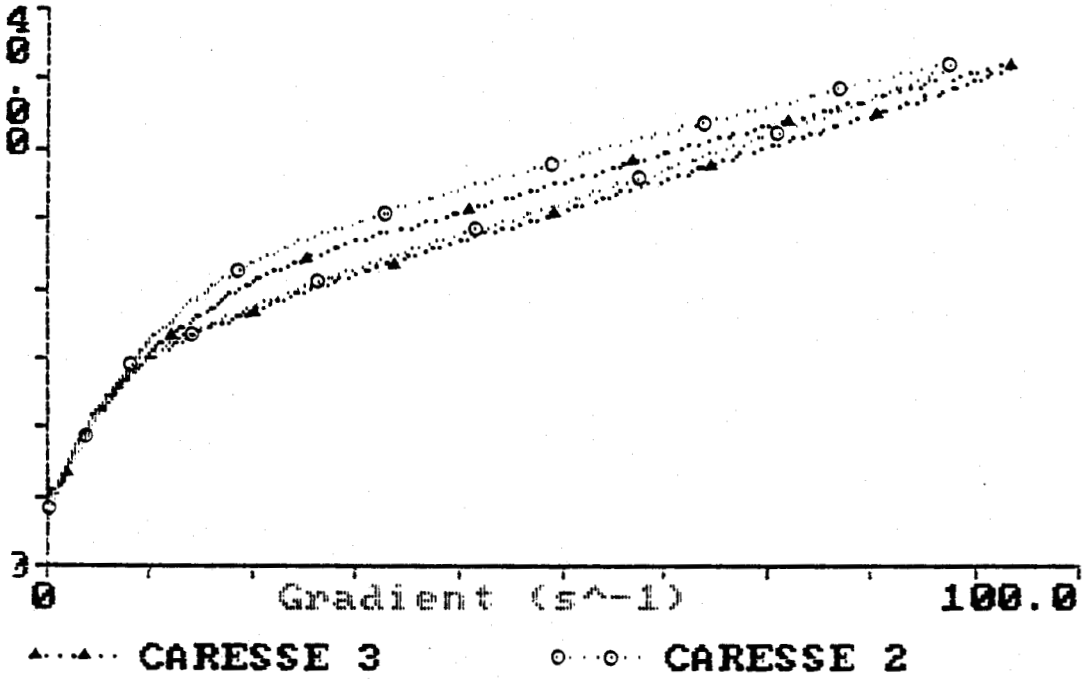


FIGURE 39 : **NOTION DE THIXOTROPIE DU YAOURT BRASSE NATURE**
(●—● essai 1; ○—○ essai 2, après 5 mn ;
▲—▲ essai 3, 15 mn après la fin de l'essai 2).

Commentaire : après 5 mn de repos, le yaourt brassé ne retrouve pas sa texture initiale, un repos de 15 mn permet une reprise partielle.

D'autre part, les rhéogrammes mettent en évidence que l'écoulement du yaourt brassé n'apparait qu'au delà d'un niveau de contrainte moyen de 7.4 Pa. Le yaourt brassé présente donc un seuil d'écoulement, caractéristique d'un comportement viscoplastique. Ce seuil d'écoulement est néanmoins relativement faible comparé à celui de 40 Pa signalé par DE KEE (1983) sur du yaourt brassé ou à ceux du lait condensé sucré compris entre 12.5 et 100 Pa (SONE, 1972). Il est là aussi à rapprocher de la valeur de 8 Pa, déterminée par DERVISOGLU et KOKINI (1983) sur du "tomato ketchup". JACQUIN (1986) sur des yaourts analogues relevait des valeurs comprises entre 7 et 15 Pa. L'existence de ce seuil d'écoulement nous amène à définir le yaourt brassé comme un produit de type viscoplastique, la viscosité plastique moyenne des 13 lots de fabrications contrôlés valait environ 500 mPa.s à la contrainte de 35.8 Pa.

Enfin, le protocole utilisé met en évidence une surface de thixotropie estimé en moyenne à environ 200 Pa.s-1, la variabilité de la mesure de cet indicateur a été estimée par un coefficient de variation de 10 % à peine supérieur à ceux relatifs aux autres grandeurs.

Le yaourt brassé semble donc présenter un comportement thixotrope au moins partiel, que nous avons voulu vérifier en faisant un nouvel essai sur le même échantillon après 10 minutes et 30 minutes de temps de repos. Un temps plus important entre deux essais consécutifs sur le même échantillon n'était pas possible du fait d'un phénomène d'évaporation. Les résultats sont reportés sur la figure 39.

. modelisation du comportement rhéologique

Rappelons que la plupart des rhéogrammes mettent en évidence une partie linéaire de la contrainte jusqu'à des valeurs de vitesses de cisaillement voisines de 6 s-1, puis un comportement nettement rhéofluidifiant qui peut être modelisé par un ajustement de type loi en puissance, avec un coefficient de dispersion inférieur à 10.

Nous pouvons donc proposer le modèle suivant qui décrit globalement le yaourt brassé nature produit pendant 13 semaines par l'usine C.L.C.P. du groupe SODIMA.

$$\tau = 8.4 (\dot{\gamma})^{0.35}$$

Il faut remarquer içi que l'ajustement partiel utilisé entraine à considérer le coefficient K comme la viscosité correspondant à une vitesse de cisaillement de 7 s-1.

. conclusion

Le comportement du yaourt brassé peut être modelisé directement par un logiciel d'écoulement selon une loi en puissance. La comparaison des grandeurs définies sur une ensemble de fabrications industrielles de yaourt brassé avec celle relevées dans la littérature sur d'autres yaourts brassés situe notre produit dans des domaines de viscosité, de plasticité légèrement inférieurs.

Rappelons que l'objectif de ce travail n'est pas l'étude rhéologique du produit en elle-même, mais la définition de grandeurs rhéologiques fondamentales descriptives du comportement du yaourt. Le yaourt brassé apparait donc être un produit de nature rhéofluidifiante (n environ 0.35), viscoplastique (τ_0 environ 7 Pa), doué d'un caractère thixotropique au moins partiel (ST = 200 Pa.s-1).

1.3.2 Profil sensoriel du yaourt brassé

Le tableau 27 représente aussi le profil sensoriel moyen des 13 lots de yaourts jugés selon la fiche et le protocole d'évaluation précédemment définis. Les yaourts brassés de ces productions sont donc jugés moyennement épais en pot (2.8/5) un peu plus en bouche (3.2/5), plutôt peu filant en pot (3.3/5) et onctueux en bouche (3.9/5).

1.3.3 Variabilité de la texture du yaourt brassé

Nous considérons ici seulement les caractéristiques instrumentales.

Source de variation Texture	variabilité due au protocole de mesure utilisé (C.V) m	variabilité due au procédé de fabrication industrielle (C.V) p	(C.V) p / (C.V) m
viscosité Brookfield	5.2 %	15 %	3
seuil d'écoulement	5 %	36 %	7
viscosité plastique	8 %	18 %	2
surface de thixotropie	10 %	33 %	3
coefficient de consistance	3 %	18 %	6
indice d'écoulement	3 %	11 %	4

TABLEAU 28 : **VARIABILITE INDUSTRIELLE DE LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE**

Les variabilités sont exprimés par le coefficient de variation ; le coefficient de variation uniquement du à la répétabilité du procédé industriel est calculé grâce à la connaissance de l'écart-type correspondant, la formule $(s\ total)^2 = (s\ mesure)^2 + (s\ procédé\ seul)^2$. Rappelons que s total et s mesure sont donnés respectivement par les tableaux 26 et 27.

Nous remarquons que les coefficients de variations des caractéristiques rhéologiques varient de 11 % à 36 %, ces variations sont imputables à la variabilité des productions industrielles, les aléas dus au protocole de mesure étant toujours inférieur à 10 %.

Suivant la caractéristique instrumentale considéré, la variabilité due au procédé de fabrication va être différente (tableau 28).

Nous retiendrons parmi les grandeurs rhéologiques fondamentales :

- le seuil d'écoulement est particulièrement sensible au procédé de fabrication.
- la viscosité plastique et la surface de thixotropie sont moins influencées, leur variation est de l'ordre de grandeur de celle enregistrée par la "viscosité Brookfield".

Pour les descripteurs du comportement rhéologique : la variabilité du procédé de fabrication semble affecter plus le coefficient de consistance (K) que l'indice d'écoulement (n). Ces différences de variation selon la grandeur rhéologique considérée apparaissent comme autant de données statistiques qui ne pourront trouver un début d'explication qu'à la lumière du chapitre III où nous étudions les causes de variation de la texture.

De façon générale, nous constatons la grande irrégularité de la texture du yaourt brassé en fonction du procédé de fabrication .

2.- RELATIONS ENTRE LES NOTES SENSORIELLES ET LES CARACTERISTIQUES INSTRUMENTALES

2.1 Description du tableau des données utilisées

Toute l'étude a été réalisée sur 53 yaourts caractérisés sensoriellement et instrumentalement selon les méthodes définies au paragraphe II.

ABREVIATION	VARIABLE	UNITES	DOMAINE DE VARIATION EXPERIMENTAL		ERREUR DE MESURE
BRK	Viscosité Brookfield	cpoB	3366	18600	500
SEV	Seuil d'écoulement	(Pa)	0,9	14.2	0,5
VAP	Viscosité apparente	(mPas)	1.59	3149	52
VPL	Viscosité plastique	(mPas)	51	2639	35
ST	Surface de thixotropie	$Pa.s^{-1}$	0	975	50
K	Coefficient de consistance (de 6 $s.^{-1}$ à $\dot{\gamma}$ max)	$Pa.s^{n}$	1.3	16	0.3
n	Indice d'écoulement (de 6 s^{-1} à $\dot{\gamma}$ max)	-	0.27	0.47	0.01
V10	Viscosité calculée pour $\dot{\gamma}$ = 10 s^{-1}	mPa.s	398	3420	-
V50	Viscosité calculée pour $\dot{\gamma}$ = 50 s^{-1}	mPa.s	170	1324	-
TEP	Texture en pot	note/5	1.2	4.47	0.43
FIL	Texture filante en pot	note/5	1.95	4.42	0.67
LISSE	Texture lisse en pot	note/5	2.12	5	0.68
BEP	Texture en bouche	note/5	1.06	4.67	0.67
BON	Texture onctueuse en bouche	note/5	2.22	4.63	0.67

TABLEAU 29 : RAPPEL DES VARIABLES RETENUES POUR LES ETUDES DE CORRELATIONS ET DE LEUR DOMAINE DE VARIATION

REF SERIE D'ESSAIS	TITRE DE L'ESSAI	CAUSE DE VARIATION DE LA TEXTURE	NOMBRE DE YAOURTS ANALYSES
Série 1	Suivi yaourt NATURE CLCP et CLARA	- ferments - répétabilité du procédé de fabrication	23
Série 2	Evolution de la texture observée en suivant le procédé de fabrication du yaourt nature (CLCP)	- différents traitements mécaniques pompe, échangeur - température de refroidissement	6
Série 3	Influence du taux sucre sur la texture	- taux de sucre ajouté avant fermentation	6
Série 4	Fabrication pilote CRI	- taux de matière grasse - extrait sec dégraissé	6
Série 5	Etude pilote CRI Influence de 3 facteurs	- ferment - matière grasse, extrait sec dégraissé	12

TABLEAU 30 : REFERENCE DES YAOURTS ANALYSES POUR L'ETUDE DES CORRELATIONS

Nous y avons ajouté deux variables supplémentaires : la viscosité apparente calculé par le modèle d'ajustement expérimental à la vitesse de cisaillement de 10 s-1 (V 10), et la viscosité apparente correspondant à la vitesse de cisaillement de 50 s-1 (V50). L'introduction de ces deux variables supplémentaires a été jugé importante compte tenu des études de SHAMA et SHERMAN (1973) - voir chapitre I, paragraphe II.5.

Le tableau 29 rappelle les variables retenues et leurs domaines de variation. Les échantillons sont soit des yaourts brassés nature de la C.L.C.P., soit des fractions de coagulum lactique prélevées à différents niveaux du procédé de fabrication, soit des yaourts brassés fabriqués sur matériel pilote. Ils sont sucrés ou non. Ils proviennent de 5 séries d'essais différents, voir tableau **30.** Le fichier général, annexe 7, comporte donc 53 lignes et 14 colonnes correspondant aux 5 variables sensorielles, aux 8 variables rhéologiques et à la "viscosité Brookfield".

Le principe des traitements statistiques utilisés est le suivant :

1ère étape : une Analyse en Composante Principale qui permet de visualiser les variables instrumentales et sensorielles proches dans l'espace, afin d'orienter ensuite les analyses par régression multiple.

2ème étape : régressions linéaires en recherchant des modèles : variable sensorielle = fonction de grandeur(s) rhéologique (s).

Le modèle sera retenu à deux conditions :

- si le pourcentage d'explication de la variable sensorielle est supérieur à 95 %.
- si l'erreur résiduelle sur le modèle est du même ordre de grandeur que l'erreur de mesure sur la variable sensorielle à expliquer.

Le cas de la viscosité Brookfield a été traité séparément.

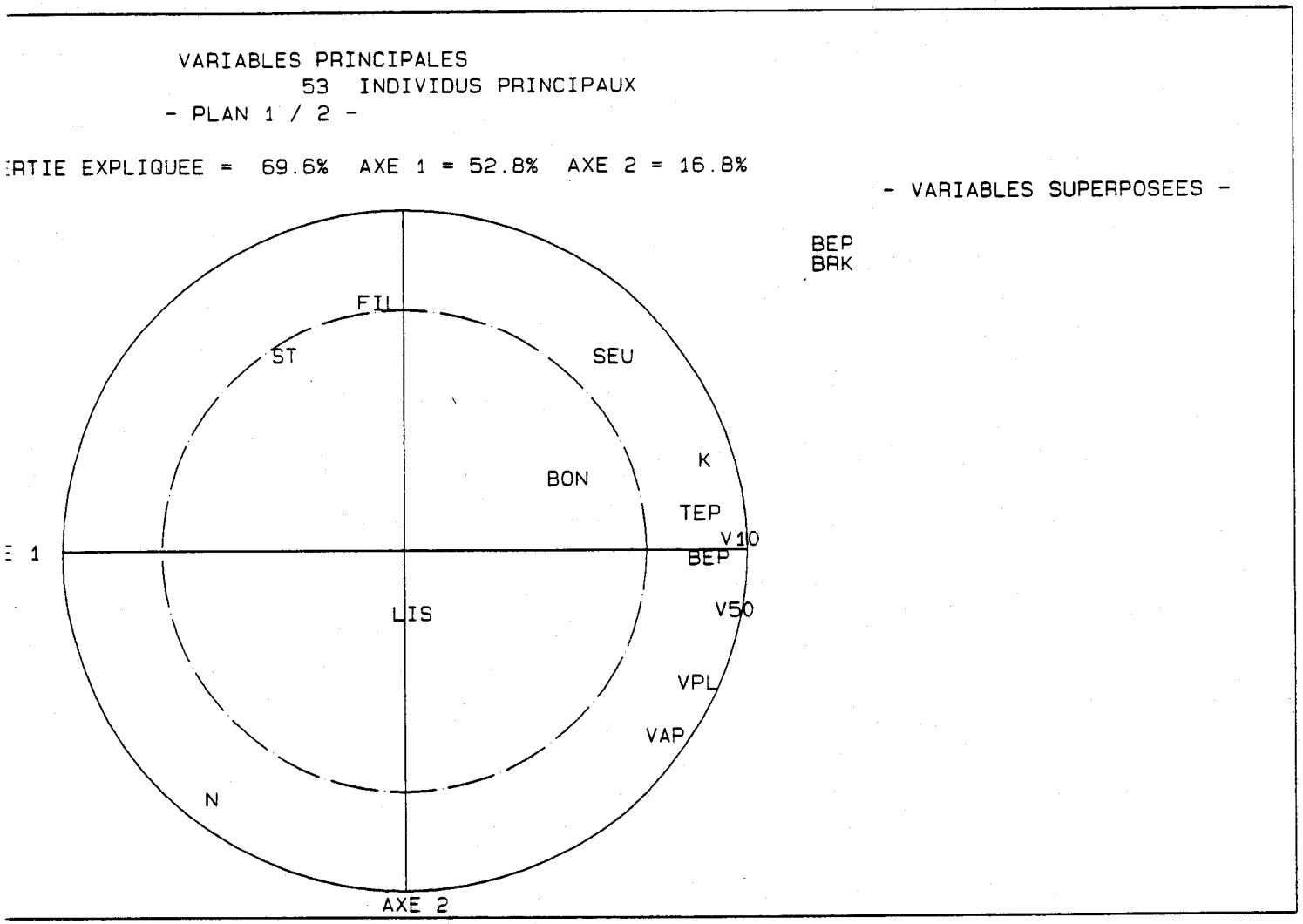


FIGURE 40 : **ETUDE DES RELATIONS ENTRE VARIABLES SENSORIELLES ET INSTRUMENTALES DESCRIPTIVES DE LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE- représentation par l'A.C.P.**

2.2 Résultats de l'analyse des correspondances

Les variables sont codées comme indiqué sur le figure **29.** Le tableau des valeurs propres indique que les trois premiers axes représentent successivement 52.7 %, 16.8 % et 8.8 % soit 78.4 % de l'inertie totale du nuage.

2.2.1 Description des axes

L'étude des vecteurs propres des 14 variables, toutes considérées principales, permet (voir annexe 6) d'avancer les idées suivantes :

- l'axe 1 correspond à un axe d'aspect épais, de viscosité.
- l'axe 2 correspond à un axe d'aspect filant.
- l'axe 3 est bien décrit par l'aspect lisse.

2.2.2 Relations entre variables

La visualisation des cercles de corrélations (figure **40**) nous indique :

- sur les axes 1/2 et 1/3 :

Il existe des corrélations fortes entre les variables rhéologiques de viscosité VAP, VPL, V50, V10, le coefficient de consistance K, les notes sensorielles TEP et BEP et la "viscosité Brookfield". Toutes ces variables sont descriptives de l'axe 1. Globalement, elles peuvent donc être considérés comme redondantes. Les variables les mieux corrélées à l'axe seraient respectivement V10 (0.96), V50 (0.93), K (0.85), BRK (0.80), BEP (0.70), TEP (0.75).

- sur les axes 1/2 et 2/3 :

. les variables FIL et n semblent anticorrélées et de très bons descripteurs de l'axe 2.

. le "seuil d'écoulement" bien que moins lié à l'axe 2 peut aussi être considéré comme anticorrélé à "n". Il serait assez proche des variables sensorielles "TEP" et "BEP".

CES CORRELATIONS SONT CALCULEES SUR LES 53 INDIVIDUS PRINCIPAUX.

NOMBRE DE VARIABLES PRINCIPALES : 14

MATRICE DES CORRELATIONS

	VAP	VPL	N	TEP	FIL	LIS
VAP	1.00					
VPL	.87	1.00				
N			1.00			
TEP		.73		1.00		
FIL					1.00	
LIS						1.00
BEP	.66	.73		.83		
BON						
SEU			-.74			
ST						
K		.70	-.76	.76		
BRK		.82		.76		
V10	.71	.85		.82		
V50	.81	.93		.80		

	BEP	BON	SEU	ST	K	BRK
BEP	1.00					
BON		1.00				
SEU			1.00			
ST				1.00		
K	.74		.73		1.00	
BRK	.77				.78	1.00
V10	.82				.96	.87
V50	.83				.85	.89

	V10	V50
V10	1.00	
V50	.97	1.00

TABLEAU 31 : MATRICE DES CORRELATIONS SIMPLES ENTRE VARIABLES SENSORIELLES ET RHEOLOGIQUES (avec r crit = 0.7)

. la variable "FIL" est indépendante des variables TEP et TEB (axe 1/2) indépendante aussi de l'aspect lisse (axes 1/3), par ailleurs indépendant lui aussi de TEP et BEP.

2.2.3 Variables isolées

. l'aspect lisse descriptif de l'axe 3 n'est relié à aucune grandeur instrumentale.

. la surface de thixotropie isolée est plutôt reliée à l'axe 2, bien que globalement peu significative.

. "l'aspect onctueux", isolé est très peu significatif de la dispersion du nuage.

2.2.4 Vérification

Ces premiers éléments obtenus, nous avons repris une ACP en ne gardant que 9 variables principales.- BON et ST peu discriminantes ont été éliminées ; N très corrélée à FIL ainsi que VAP et TEP corrélées aux autres variables de viscosité et d'aspect épais l'ont été également. La nouvelle ACP ainsi réalisée confirmait les résultats déjà obtenus.

2.3 Résultats obtenus par régression multiple

L'option prise a été d'expliquer les variables sensorielles par des variables instrumentales. Nous avons auparavant considéré la matrice des corrélations simples.

2.3.1 Observations préalables tirées de la matrice des corrélations

La matrice des corrélations linéaires deux à deux (voir tableau **31**) a été traduite en retenant un coefficient de corrélation égal à 0,7 afin de selectionner les corrélations les plus significatives (r crit à 50 ddl = 0.36 ; α =1%).

variables rhéologiques / variables sensorielles	K	VPL	V10	V50
TEP	0.76	0.73	0.82	0.80
TEB	0.74	0.73	0.82	0.83

TABLEAU 32 : **RELATION ENTRE LES VARIABLES RHEOLOGIQUES DE VISCOSITE ET LES VARIABLES SENSORIELLES D'EPAISSEUR**

FACTEUR explicatif	CONFIANCE dans l'explication	sr	sm	AJUSTEMENT linéaire du modèle
K	100 %	0.41	0.43	OUI
VPL	100 %	0.43	0.43	OUI
K + VPL	100 %	0.37	0.43	OUI
SEUIL	99,99 %	0.54	0.43	NON
V10	100 %	0.37	0.43	OUI
V50	100 %	0.38	0.43	OUI
K + ST	100 %	0.408	0.43	OUI

TABLEAU 33 : **VARIABLES RHEOLOGIQUES EXPLICATIVES DE LA PERCEPTION DE L'ASPECT EPAIS EN POT** (sr : écart-type résiduel de la régression et sm : erreur de mesure sur la réponse)

L'on peut retenir :

1°) TEP et BEP sont bien corrélées (r = 0.83) autrement dit dans l'ensemble les appréciations de la texture épaisse en pot (TEP) et en bouche (BEP) varient dans le même sens.

2°) La texture épaisse en pot et l'aspect filant ne sont absolument pas corrélés (r = 0.0). Ce sont deux descripteurs indépendants.

3°) le coefficient K et le seuil d'écoulement sont assez bien corrélé s (0.73).

4°) Le coefficient K et l'indice n sont anti-corrélés (-0.76).

5°) Les viscosités apparentes mesurées à 10 s-1 sont mieux corrélées aux descripteurs sensoriels de l'aspect épais que ne le sont les indicateurs K et VPL (tableau 32).

6°) Remarquons que les corrélations K / V10 et K / V50 valent respectivement 0.96 et 0.85.

2.3.2 Etude de l'aspect épais

La démarche utilisée a été la suivante :

- compte tenu de la corrélation fortement positive liant TEP et BEP sur les individus analysés, nous avons considéré uniquement TEP dans un premier temps, comme descripteur global de l'aspect épais.

- nous avons cherché à expliquer l'aspect épais (TEP) par les variables rhéologiques compte tenu des indications fournies par l'ACP et la matrice des corrélations. Le tableau 33 indique la qualité d'ajustement des différents modèles essayés. Nous pourrions donc retenir comme facteur explicatif les indicateurs V50, V10 puis K + VPL ; enfin K et K + ST.

- les variables K et VPL étant corrélées, elles ne peuvent pas être considérées comme simultanément et indépendamment explicatives.

ANNEXE 7 B

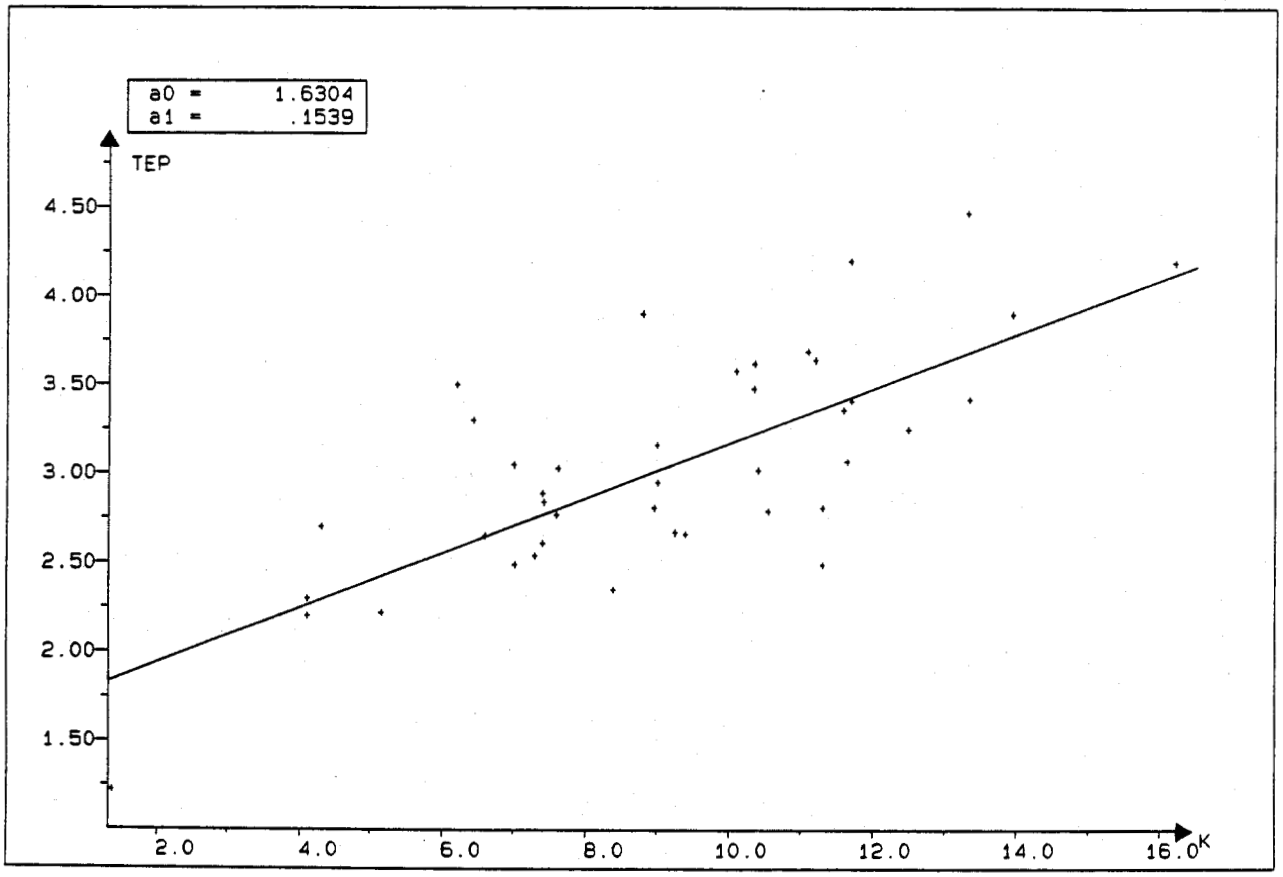


FIGURE 41 : **RELATION ENTRE L'ASPECT EPAIS EN POT ET LE COEFFICIENT K** (ANNEXE 7 B)

- les meilleurs ajustements sont obtenus par V50 et V10, mais ces deux variables sont des variables calculées, or, pour la variable V50, il peut arriver qu'un yaourt brassé soit tellement épais qu'il n'atteigne pas la vitesse de cisaillement de 50 s-1 à la contrainte maximale du protocole de 35.8 Pa. Ceci présente un inconvénient si nous voulons utiliser la relation dans tout le domaine de texture possible du yaourt brassé. Pour la variable V10, nous avons vérifié que sa contribution à l'explication de BEP était très satisfaisante, ce qui confirmait les travaux de SHAMA et SHERMAN (1973).

Cette valeur ponctuelle de la viscosité du yaourt brassé pouvait donc être retenue comme explicative de l'épaisseur du yaourt brassé mais, outre la raison indiquée plus haut, nous avons préféré choisir le coefficient de consistance K qui donne une indication globale de l'écoulement du yaourt brassé.

L'explication de l'aspect épais amenée par K est en effet très satisfaisante, ceci avait été signalé dans des conditions expérimentales moins bien définies par SCHELLHASS (1985).

L'adjonction de la surface de thixotropie renforce très légèrement la qualité de l'ajustement, mais par souci de simplification et du fait de l'erreur de mesure encore trop importante sur la détermination de ST, nous n'avons pas voulu entrer les deux variables, ce qui risquait de compliquer l'utilisation du modèle pour faire de la prévision.

Nous avons donc vérifié que le coefficient K était explicatif pour la texture épaisse, appréciée en bouche et l'examen des deux modèles nous donne le droit d'écrire:

Note"d'Aspect EPAIS"= 1.63 + 0.154 (K)

. Plus le coefficient K sera élevé, plus le yaourt brassé sera jugé épais tant en pot qu'en bouche, la figure 41 visualise cette relation.

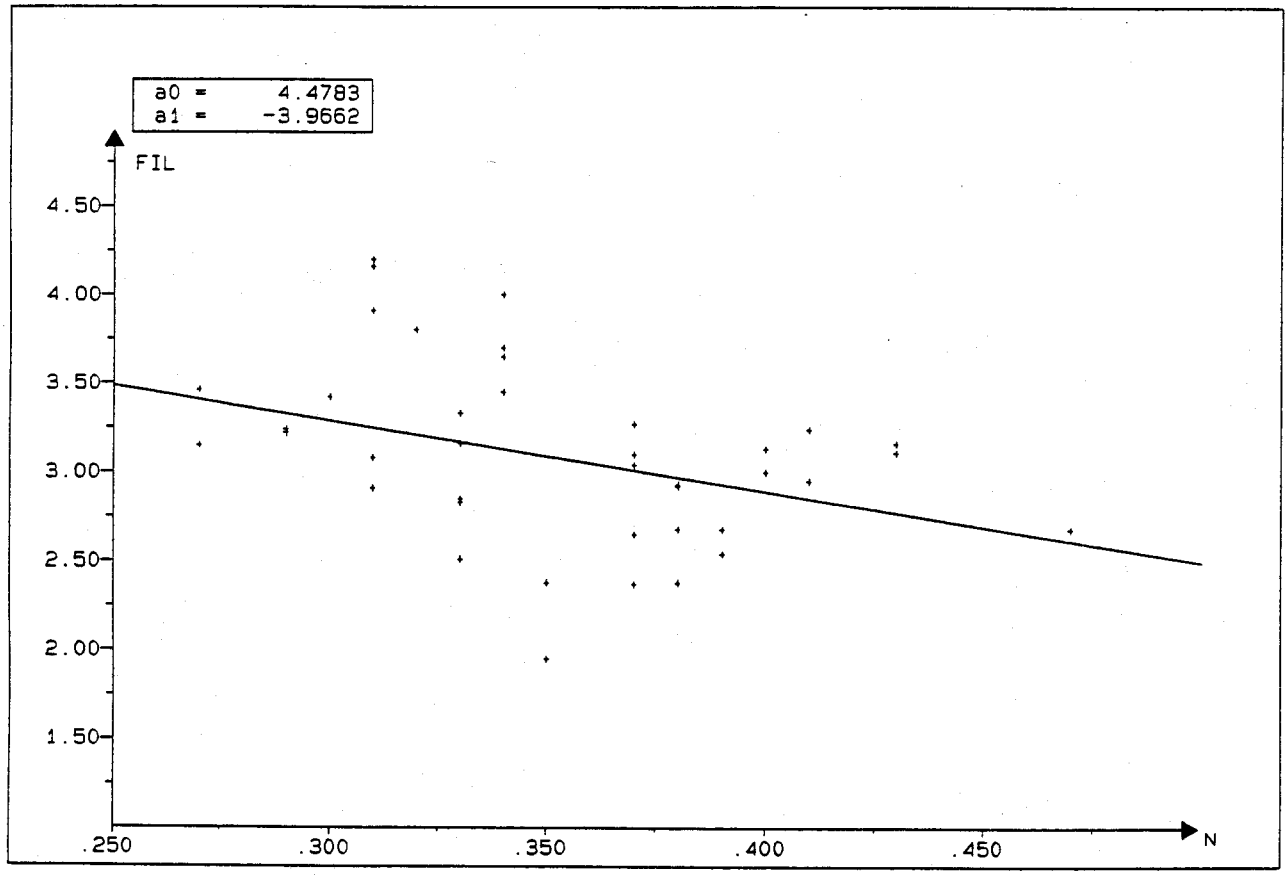


FIGURE 42 : **RELATION ENTRE L'ASPECT FILANT EN POT ET L'INDICE D'ECOULEMENT n** (ANNEXE 7 C)

2.3.3 Etude de l'aspect filant

L'explication de la variation de FIL par différentes variables rhéologiques, nous conduit à retenir le modèle suivant qui est significativement explicatif (confiance du test intrinsèque : 97 % ; sr = 0.42, sm = 0.67).

$$FIL = 4.47 - 3.96\ (n)$$

L'introduction de la variable K diminue la variation résiduelle mais ne peut être retenue compte tenu de la corrélation n/K égale à -0.76. La note filante peut donc être expliquée par l'indice d'écoulement n caractéristique de l'écoulement de type rhéofluidifiant du yaourt brassé. Plus n sera petit, plus l'écoulement sera rhéofluidifiant, moins le yaourt sera filant, la figure 42 visualise cette relation (rappelons que la note filante varie de 1 = très filant à 5 = non filant).

. Une relation de ce type avait été avancé par SZCEZNIAK et FARKAS (1962) qui avait relié l'aspect gluant de diverses solutions de polysaccharides à l'exposant n de la loi en puissance et WOOD (1974) qui, pour décrire l'aspect visqueux de soupes épaissies, de viscosité apparente égale à 200 mPa.s à 50 s-1, utilisait une relation du même type.

La relation établie ici, bien qu'elle semble significative, peut n'être qu'une relation indirecte : l'on pourrait penser en effet que l'aspect filant, compte tenu en particulier du protocole d'évaluation sensorielle utilisé pour le juger, serait plutôt lié à une grandeur instrumentale obtenue par des techniques élongationnelles ; celles ci restent à mettre en oeuvre.

De plus, il est aussi possible qu'un produit très peu filant ne soit pas moins rhéofluidifiant mais qu'il se détruise beaucoup plus au cours du cisaillement. Ceci signifierait alors qu'il y aurait un changement de niveau de structure pendant la mesure rhéologique.

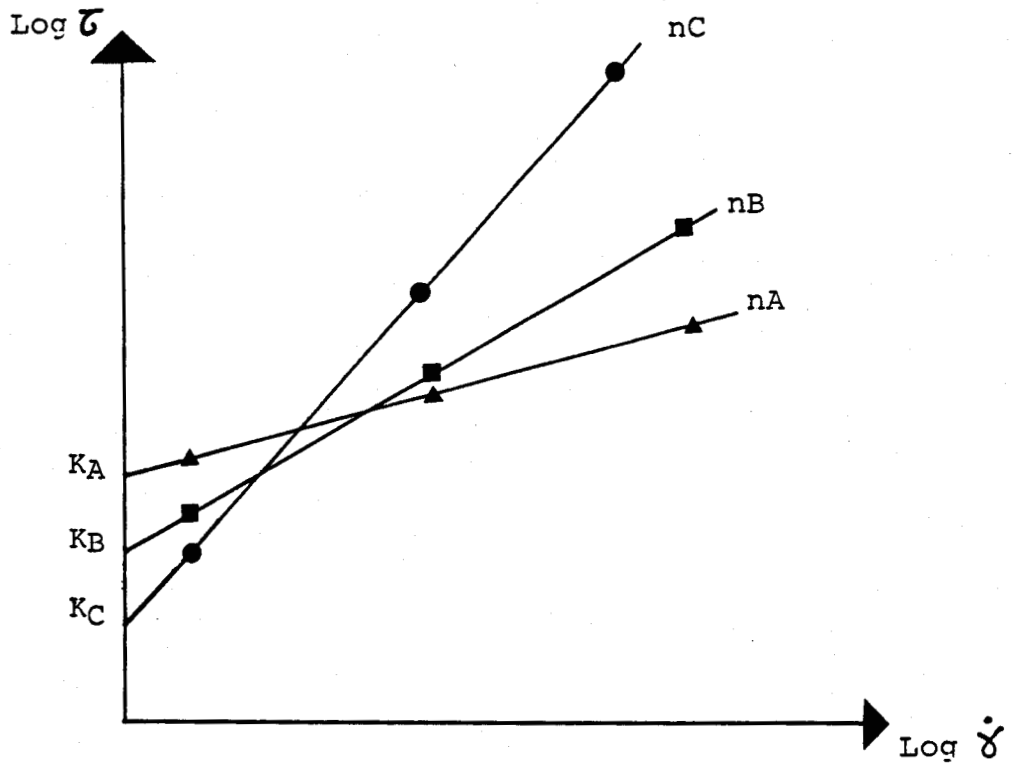


FIGURE 43 : EXPLICATION SCHEMATIQUE DES EVOLUTIONS COMPAREES CONSTATEES DE n ET K SUR LES YAOURTS BRASSES ANALYSES

Yaourt A Yaourt B Yaourt C

Gardons en effet à l'esprit qu'une valeur rhéologique est fonction du niveau de structure du produit qui peut changer pendant le cisaillement. L'indicateur n ne serait plus seulement une caractéristique du yaourt mais également la conséquence du changement de structure due au cisaillement.

. Commentaires sur les anti-relations

n/SEUIL : r =-0.74 n/K : r =-0.76

Cela signifie que des yaourts à seuil d'écoulement ou à coefficient de consistance élevés (ces deux grandeurs augmentent le plus souvent ensemble) se caractérisent par des valeurs de n faibles, voir figure **43.**

. Commentaire sur la perception de l'aspect filant

Il faut mentionner la confusion potentielle toujours possible qui peut se produire entre l'aspect filant et l'aspect fluide sans effort d'apprentissage du jury. Ce phénomène peut contribuer à opposer ponctuellement et artificiellement filant et épais. Ceci avait déjà été signalé par JACQUIN (1986). Rappelons que l'étude a montré l'indépendance de ces deux descripteurs.

2.3.4 Etude de l'aspect lisse

Aucune grandeur rhéologique ne permet d'expliquer de façon satisfaisante l'aspect lisse du produit. Cela signifie simplement que le descripteur lisse n'est pas un descripteur rhéologique à proprement parler. Il n'est pas utile de faire de la rhéologie pour juger de l'aspect plus ou moins lisse d'un yaourt. Cet élément est venu renforcer la décision de noter l'aspect lisse de façon qualitative, ce qui avait été demandé à l'issue des 13 séances d'évaluation sensorielle.

2.3.5 L'aspect onctueux

Aucune combinaison linéaire entre les variables rhéologiques ne permet d'expliquer les variations de la note d'onctuosité mise par le jury.

n / VPL (mPa.s)	0.2	0.5
100	9 040	3 300
500	11 040	5 300

TABLEAU 34 : **VISCOSITES BROOKFIELD (cpoB) EN FONCTION DE L'INDICE D'ECOULEMENT (n) ET DE LA VISCOSITE PLASTIQUE (VPL) DU YAOURT BRASSE**

Ceci tient sans doute au fait que la notion d'onctuosité se traduit par des définitions très différentes suivant la personne interrogée (voir figure **36**). Le "descripteur onctueux" n'est donc pas un terme uni-dimensionnel, c'est un terme hédonique, il doit résulter lui-même d'une combinaison entre plusieurs descripteurs sensoriels.

2.4 Cas de la "viscosité Brookfield"

2.4.1 Relations avec des grandeurs rhéologiques

Nous avons obtenu le modèle ci-dessous, compte-tenu d'une erreur de mesure de 500 cpoB.

VISCOSITE BROOLFIELD = 12370 + 5(VPL)-19130 (n)

Cette relation n'est pas satisfaisante pour expliquer toutes les variations observées de "Viscosité Brookfield" (l'erreur résiduelle vaut 1740 cpoB).
Cela signifie néanmoins que la mesure de "viscosité Brookfield" dépend SIMULTANEMENT de la viscosité plastique et de l'indice d'écoulement. Elle ne permet pas de différencier la composante épaisse ou filante, elle donne donc une indication globale de la texture.

L'analyse du modèle permet en outre de comprendre pourquoi la valeur de "Viscosité Brookfield" peut être dans certains cas insuffisante pour caractériser la texture épaisse du yaourt.

En effet, la traduction du modèle permet de dire (tableau **34**) :

- A indice d'écoulement équivalent, plus la viscosité plastique du yaourt brassé est élevée, plus la valeur de "viscosité Brookfield" est forte.

- A viscosité plastique équivalente, plus l'indice d'écoulement n est fort (aspect plus filant du yaourt) plus la "viscosité Brookfield" est faible.

Ce phénomène peut expliquer que la mesure de "viscosité Brookfield" n'est pas toujours corrélée avec l'augmentation de l'aspect épais.

2.4.2 Viscosité Brookfield et variables sensorielles.

Nous avons obtenu le modèle suivant compte tenu d'une erreur de mesure de 500 cpoB.

$$BRK = 3580(TEP) - 2120$$

La variation inexpliquée (sr = 1800) est largement supérieure à l'erreur de mesure. Cela signifie que la mesure de "viscosité Brookfield" augmente en même temps que la note d'aspectépais mais que cela est insuffisant pour expliquer correctement les variations constatées.

2.5 Conclusions

L'emploi simultané de différentes techniques statistiques de traitement des données sensorielles et instrumentales sur 53 yaourts brassés différents et le recoupement des résultats obtenus permet d'avancer les éléments suivants :

- l'aspect épais en pot et l'aspect épais en bouche du yaourt brassé sont corrélés, ils peuvent être prévus à partir de la connaissance du coefficient de consistance K, grandeur rhéologique calculée à partir du rhéogramme du produit. Nous avons en effet l'équation :

$$ASPECT\ EPAIS = 1.63 + 0.154\ (K)$$

- l'aspect Filant en pot du yaourt brassé est lié à son indice d'écoulement (n), déterminé à partir du rhéogramme du produit. Nous avons aussi l'équation :

$$ASPECT\ FILANT = 4.47 - 3.96\ (n)$$

- le descripteur lisse, très discriminant, n'est lié à aucune grandeur rhéologique.

- le descripteur onctueux s'est avéré être très peu discriminant pour les yaourts brassés étudiés.

- la "viscosité BROOKFIELD", même si elle semble assez souvent proche de la "l'aspect épais" (ACP) peut ne pas en rendre compte, de plus, elle ne permet pas de différencier la composante épaisse de la composante filante. Elle s'avère donc insuffisante pour une bonne caractérisation de la texture du yaourt brassé.

IV.- CONCLUSION : GRANDEURS RETENUES POUR CARACTERISER LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE.

1. L'utilisation d'un rhéomètre à contrainte imposée et la mise au point d'un protocole de mesure adapté (contrainte maximale égale à 35.8 Pascal en 2 minutes) nous a permis de décrire les propriétés d'écoulement d'un ensemble de fabrications industrielles de yaourt brassé nature. Ce produit laitier frais présente un comportement rhéofluidiant marqué, il possède un seuil d'écoulement moyen de 7.4 Pascal, la viscosité plastique est de 500 mPascal.s en moyenne à la contrainte maximale, il est thixotrope, la surface de thixotropie donnée par le logiciel CARRIMED est égale à 200 Pa.s-1.
Un modèle rhéologique expérimental :

$$\text{Contrainte} = 8.4\ (\text{vitesse de cisaillement})^{0.35}$$

permet de décrire l'évolution de la viscosité du yaourt brassé à partir d'une vitesse de cisaillement de 6 s-1.

Dans cette équation de type loi en puissance, le coefficient 8.4 est assimilable à un coefficient de consistance et l'indice 0.35 est assimilable à un indice d'écoulement. Ces 5 grandeurs rhéologiques ont été retenues dans la suite de notre travail.

Le recours à un jury expérimenté composé de 8 à 10 personnes travaillant au Centre de Recherches, dont la répétabilité de jugement a pu être approchée, et l'élaboration d'une épreuve sensorielle de notation par intervalle nous a permis de définir 4 descripteurs sensoriels caractéristiques de la texture du produit : la texture épaisse en pot, l'aspect filant en pot, la texture épaisse en bouche, l'aspect collant en bouche et de pouvoir établir un profil sensoriel moyen caractéristique d'un ensemble de fabrications industrielles.

La mise en oeuvre de techniques statistiques d'Analyse en Composante Principale et de Régressions Multiples sur 53 lots de yaourts, fabriqués selon des conditions expérimentales définies nous permet d'avancer les données suivantes :

- 3 descripteurs indépendants caractérisent le yaourt brassé en évaluation sensorielle : l'aspect épais, l'aspect Filant, l'aspect lisse.

- les descripteurs "texture épaisse en pot" et "texture épaisse en bouche" sont corrélés mais il faut signaler que les ferments mis en oeuvre avaient des caractéristiques assez proches (ferments référencés).

- l'augmentation de l'aspect EPAIS de la texture se traduit par une augmentation du coefficient de consistance (K).

- l'augmentation de l'aspect FILANT de la texture se traduit par une augmentation de l'indice d'écoulement (n).

- le seuil d'écoulement et la surface de thixotropie ne semblent pas avoir de correspondances sensorielles dans cette étude.

La "Viscosité BROOKFIELD" relativementproche de l'aspect épais constitue un niveau d'appréciation insuffisant de la texture d'un tel produit.

2. La caractérisation de la texture réalisée dans ce chapitre ne fait appel qu'à des mesures de cisaillement par écoulement. La mise en oeuvre de techniques rhéologiques de fluage ou encore harmoniques devraient permettre d'avancer dans la mise en évidence d'éventuelles propriétés élastiques. N'oublions pas non plus les techniques de déformations élongationelles. Ces dernières pourraient être particulièrement intéressantes à mettre en relation avec certaines grandeurs sensorielles. Serait-ce la voie à suivre pour mieux expliquer l'aspect filant ou encore pour différencier la texture en pot de la texture en bouche qui peuvent, sous l'influence de facteurs de variations spécifiques tels les ferments, être quand même relativement indépendantes ?

Les travaux restent donc à entreprendre pour développer les premiers résultats que nous avons obtenus.

Par ailleurs, la technique d'évaluation sensorielle mise en oeuvre dans cette étude comporte le risque constant de la perte ou de la dérive du produit de référence pour chaque descripteur. Elle est sujette à la disponibilité des personnes travaillant au Centre de Recherche, ce qui rend très difficile l'indispensable entretien d'un jury de dégustation. Cependant, elle s'avère très précieuse lorsqu'il s'agit de décrire comparativement plusieurs yaourts brassés dans le même laps de temps.

3. La Variation de la texture uniquement due aux aléas de fabrication est très importante. Elle fluctue en effet de 11 % à 36 % selon le critère rhéologique considéré. D'autre part, si l'on prend appui sur les relations établies entre grandeurs rhéologiques et les appréciations sensorielles, il semble que l'aspect épais (coefficient de variation égal à 20 %) varie bien plus que l'aspect filant (coefficient de variation égal à 11 %).

Le problème de la maîtrise du procédé de fabrication du yaourt brassé est donc posé. Il convient donc d'engager l'étude concernant les causes de variation des différents critères rhéologiques et sensoriels, c'est-à-dire la quantification des effets des matières premières, des ferments et des paramètres du procédé de fabrication sur les composantes de la texture maintenant définies. C'est l'objet du chapitre III.

CHAPITRE III

ETUDE DE FACTEURS BIO-TECHNOLOGIQUES QUI INFLUENCENT LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE

I.- INTRODUCTION

Le chapitre précédent a permis de mettre en évidence quelquesoit le critère d'évaluation retenu, la grande variabilité de la texture du yaourt brassé, produit laitier frais vivant résultant d'une production industrielle en grande série. Ceci est confirmé si l'on examine les données obtenues sur 1 année de contrôle des "Viscosités BROOKFIELD" des yaourts brassés natures produits par la C.L.C.P. (figure 44 et tableau 35).

L'étude bibliographique a mis en évidence de nombreux facteurs de variations potentiellement responsable de cette variabilité du procédé de Fabrication. Notre travail vise à quantifier plus précisement l'influence de certains facteurs du procédé de fabrication afin de maitriser leurs effets.

Dans un premier temps, nous décrivons les matériels et méthodes de fabrication, en particulier, les procédés microbiologiques et bio-technologiques de fabrication du yaourt brassé, les méthodes de contrôles ayant été pour l'essentiel définies dans le deuxième chapitre.

Puis, nous essayons de quantifier de façon relative les effets de 7 facteurs de variation dans l'objectif de dégager rapidement les facteurs les plus importants.

Ensuite, une série d'études plus précises, menée dans les paragraphes III-2, III-3 et III-4, quantifie l'influence de certains facteurs du procédé choisis dans l'optique de maîtrise industrielle de leurs effets.

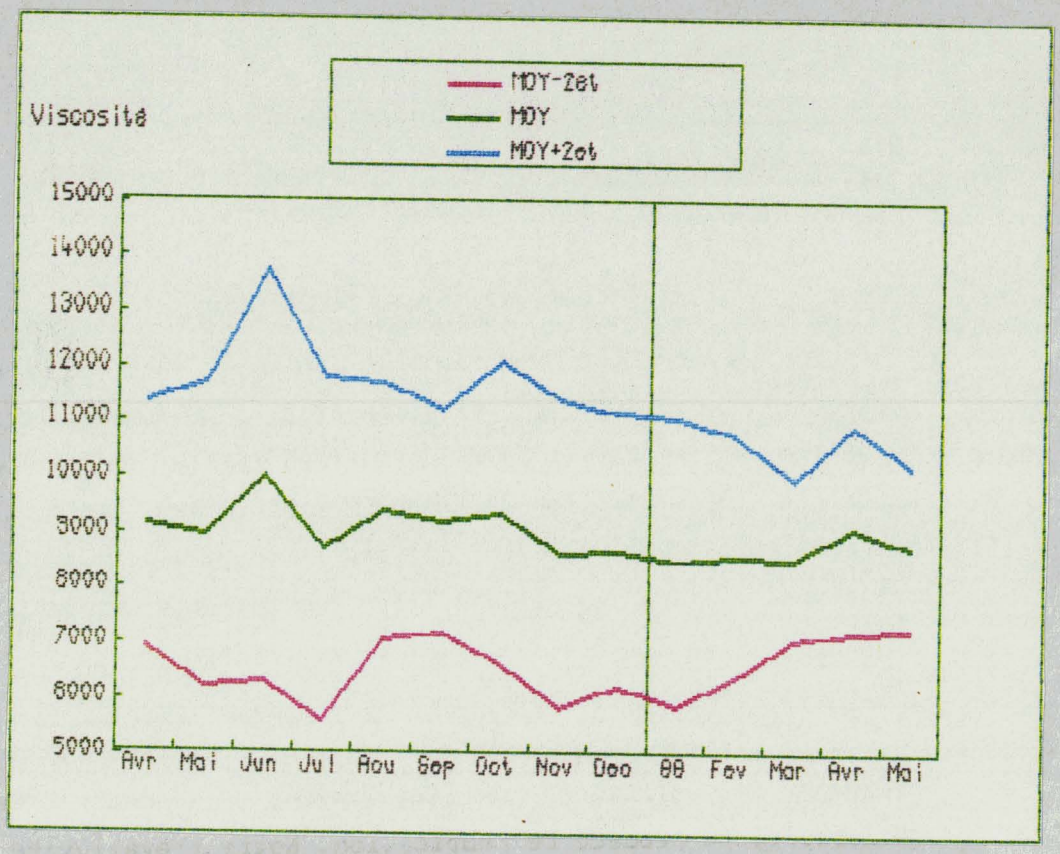


FIGURE 44 : **RELEVE MENSUEL (AVRIL 1987 A MAI 1988) DES MOYENNES ET DES ECART-TYPES DE "VISCOSITE BROOKFIELD" DES YAOURTS BRASSES NATURES FABRIQUES A LA C.L.C.P. L'écart-type fusionné représentatif de la variation annuelle vaut 1236 cpoB, le coefficient de variation est égal à 13.8 %**
sp+m = écart-type de procédé et de mesure.

Mois	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	JANV	FEV	MARS	AVR	MAI
Moyenne	9155	8960	10030	8696	9390	9211	9360	8615	8670	8491	8571	8525	9082	8765
Ecart-type de procédé et de mesure (sp+m)	1099	1373	1852	1553	1151	1009	1363	1390	1232	1298	1095	721	932	737

TABLEAU 35: **RELEVE MENSUEL (AVRIL 1987 A MAI 1988) DES MOYENNES ET DES ECART-TYPES DE "VISCOSITE BROOKFIELD" DES YAOURTS BRASSES NATURES FABRIQUES A LA C.L.C.P. L'écart-type fusionné représentatif de la variation annuelle vaut 1236 cpoB, le coefficient de variation est égal à 13.8 %**
sp+m = écart-type de procédé et de mesure.

Pour ces études, nous nous sommes efforcés de prendre appui sur la réalité industrielle, pour ensuite, reproduire les effets des facteurs de variation étudiés dans des conditions beaucoup mieux contrôlées à l'échelle laboratoire ou à l'échelle pilote.

Enfin, la complexité du problème microbiologique posé est abordée dans le paragraphe III-5 qui étudie la variabilité de la synthèse d'un polysaccharide texturant par les bactéries du yaourt et met en évidence sont rôle texturant.

II.- MATERIELS ET METHODES

1.- FERMENTS ET SOUCHES UTILISEES

1.1 Définitions préalables

Dans ce rapport, nous appelerons :

Yaourt : le produit issu de la base laitière fermentée correspondant à la définition légale du yaourt en France.

Levain : le lait, inoculé par le ferment, qui est l'étape industrielle préalable souvent nécessaire à la fabrication du yaourt.

Ferment : un ensemble de souches bactériennes constitué des deux espèces S. thermophilus et L. bulgaricus, prêtes à être utilisées pour la fabrication du levain.

Souche : une population bactérienne, isolée d'un ferment, appartenant à une espèce bactérienne définie.

Clone : un individu isolé d'une souche, différent d'un autre individu de cette même souche.

Remarque : une souche peut aussi être définie par l'existence en son sein de clones différents pour un ou plusieurs caractères donnés.

ESPECE	S. thermophilus		L. bulgaricus		S. thermophilus L. bulgaricus
SOUCHES	3	12	C	M	KA68
LACTOSE	+	+	+	+	+
GLUCOSE	+	+	+	+	+
SACCHAROSE	+	-	-	-	+
FRUCTOSE	-	+	+	+	-
MANNOSE	-	+	+	+	-
TREHALOSE	-	+	-	-	-
NAc GLUNH 2	-	+	-	-	-

FIGURE 45 : **PROPRIETES FERMENTAIRES DES FERMENTS SODIMA 3C, 12M, KA 68** (Galeries API CH 50 après 24 h de culture)

1.2 Ferment utilisé

Sauf indications contraires, nous avons utilisé pour nos expériences aux stade pilotes et industriels, les ferments SODIMA 3C, 12 M (constitué par l'association d'une souche de S. thermophilus et d'une souche de L. bulgaricus) et KA68 (constitué par l'association de plusieurs souches de S.thermophilus et de plusieurs souches de L. bulgaricus).

Les propriétés fermentaires de ces trois ferments sont données dans la figure **45.** Les ferments 3C et KA68 étaients considérés comme les ferments de référence pour le groupe SODIMA mais le ferment 3C, devenu très sensible à la contamination phagique, a du être remplacé en cours d'étude par le ferment 12M de caractéristiques très proches.

1.3 Souches et clones utilisés

Les études concernant le pouvoir texturant de S. thermophilus ont été menées sur des clones isolés à partir des souches S2, S3, S7, S12, S13, S22 par le laboratoire de génétique microbienne de l'université de CAEN. Les études relatives à la nature du caractère épaississant de Streptococcus thermophilus ont été effectuées à partir des clones de type C14 et C17 isolés par le laboratoire de génétique microbienne de l'Université de CAEN (GANCEL, 1988).

2.- METHODES GENERALES DE CULTURE DES SOUCHES ET DE FABRICATION DU YAOURT BRASSE

2.1 Cultures au stade laboratoire

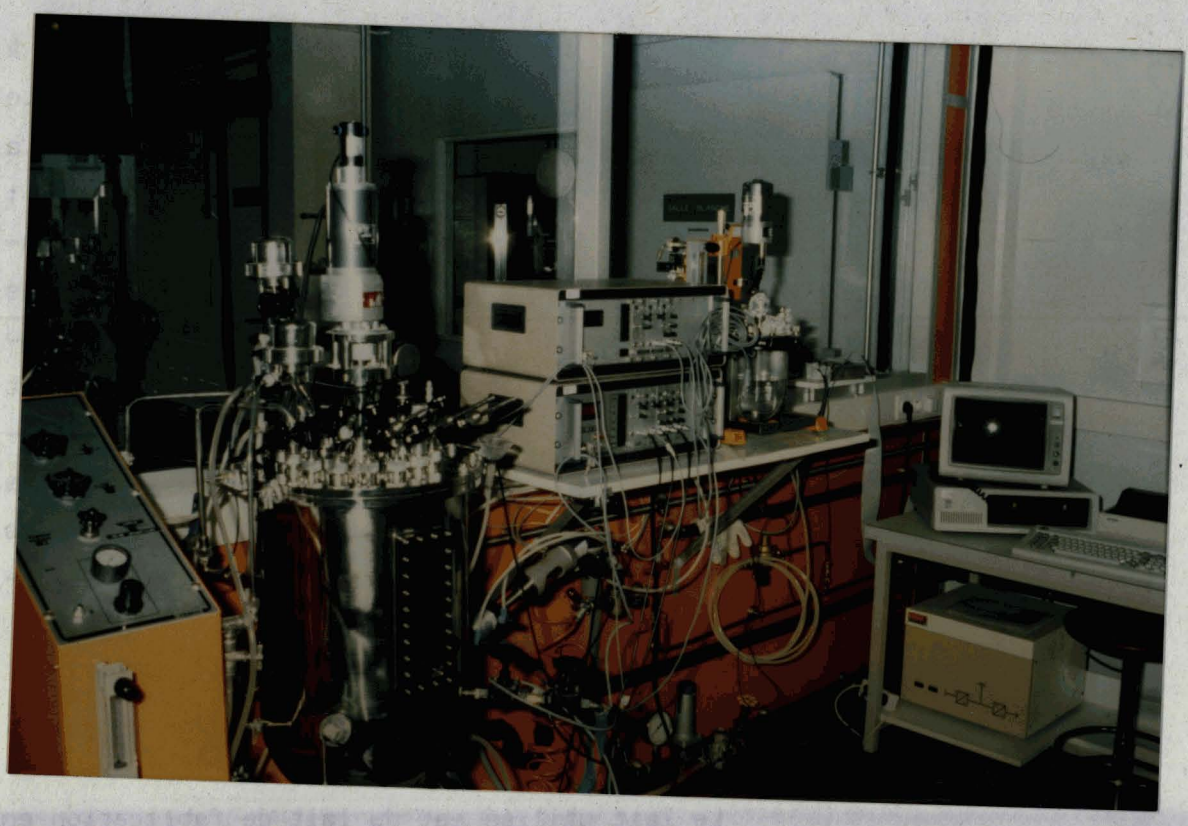
Les ferments 3C, 12 M et KA68 lyophilisés sont réhydratés 5 à 20 minutes à 20°C dans 10 ml de lait écrémé stérile avant utilisation. Les clones isolés par CAEN étaient préalablement incubés à 43°C dans 10 ml de lait écrémé stérile jusqu'à coagulation du lait dans le tube.

. Les levains sont réalisés à partir de lait écrémé reconstitué à 130 g / litre d'eau distillée, stérilisé 10 minutes à 110°C. Le pourcentage d'inoculation du ferment est de 0.1 g/l de levain. La fermentation a lieu en flacon de 1 litre au bain marie à 43°C ; sauf indication contraire, elle est arrêtée quand l'acidité finale du levain atteint un pH égal à 4.7. Les levains sont alors placés en chambre froide à 7°C avant utilisation qui, sauf mention spéciale, a toujours lieu à J + 1. L'acidité du levain est contrôlée avant son utilisation. Pour certaines études spécifiques telle l'influence de la température de fermentation, les levains étaient réalisés dans un Fermenteur SETRIC de 2 litres équipé d'une régulation de la température interne et d'un enregistrement en continu du pH.

2.2 Fabrication de yaourt à l'échelle laboratoire

Le lait utilisé est du lait de fabrication en provenance des usines C.L.C.P. ou U.C.A.L.M. de la SODIMA. Il est au besoin, poudré par un lot contrôlé de "poudre de lait écrémé", il peut être sucré par du saccharose sous forme cristallisée. Il est pasteurisé 15 minutes à 90°C en autoclave.

Le levain est ensemencé à raison de 38 g/litre de lait à la température de fabrication du yaourt. Un mélange adéquat du levain dans le yaourt est réalisé avant culture en bain marie dans des bechers de 1 à 3 litres équipés en permanence d'une sonde de pH Ingold à double pont. L'arrêt de la fermentation est effectué, sauf mention particulière, à pH voisin de 4.5, soit environ 100 à 110° Dornic. Les yaourts sont alors passés au travers d'une lisseuse de laboratoire de type GUERIN ALM, équipée d'une tête de lissage C190. Ce traitement a pour but de simuler les traitements technologiques subis par le coagulum. Ils sont ensuite conditionnés en pots blancs de 125 g qui sont refroidis dans une chambre ventilée. Le lendemain de la fabrication, les pots de yaourts brassés sont stockés en chambre froide à 7°C.



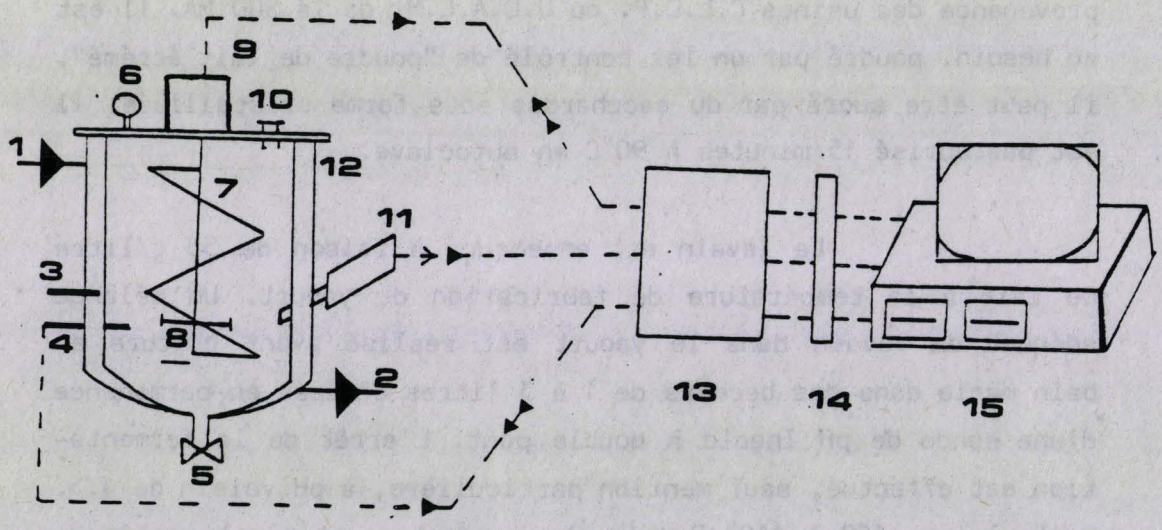


FIGURE 46 : FERMENTEUR SETRIC ET SYSTEME DE REGULATIONS UTILISE POUR LA FABRICATION DU YAOURT A L'ECHELLE PILOTE

1 : entrée vapeur, sortie eau
2 : sortie vapeur, entrée eau
3 : sonde température
4 : sonde température
5 : vanne de soutirage
6 : manomètre
7 : serpentin
8 : pales
9 : agitation
10 : virole d'ensemencement
11 : capteur pH
12 : double paroi
13 : module acquisition-régulation
14 : interface
15 : logiciel et microordinateur

Tous les yaourts brassés décrits dans les prochains paragraphes comme étant réalisés à "l'échelle laboratoire", l'ont été suivant ce protocole.

2.3 Fabrication de yaourt à l'échelle pilote

Le yaourt est fabriqué dans un fermenteur pilote SETRIC de 35 litres muni d'une double enveloppe et d'un serpentin interne de circulation d'eau. Ce fermenteur est asservi à un logiciel SETRIC de commande et de traitements des données, implanté sur IBM.PC, voir figure **46.**

Le lait, éventuellement poudré et/ou sucré, est pasteurisé dans le fermenteur 10 minutes à 90°C suivant un traitement thermique consigné dans le logiciel et reproductible pour chaque essai. L'ensemencement a lieu 1 à 2°C au dessus de la température de fermentation du yaourt à raison de 38 g/l, l'agitation lente du mélange est alors programmée par le logiciel pendant 30 minutes.

Pendant la phase de fermentation, la température est enregistrée et régulée par une circulation d'eau à la fois dans le serpentin et dans la double enveloppe ; le pH est suivi au moyen d'une sonde INGOLD type 776 - P rétractable et stérilisable en place, préalablement étalonnée. Lorsque la valeur finale du pH désiré est atteinte, le coagulum lactique est soutiré par une vanne de fond, soit à la température de culture, soit après un refroidissement programmé dans la cuve, grâce à une pompe MOUVEX type S2 à raison de 200 l/h.

Une pompe péristaltique type LAB D 01 MASTERFLEX a certaines fois été utilisée, la vitesse était alors de 100 rpm et le débit de 120 l/h. Le yaourt peut être soit conditionné à chaud, soit préalablement refroidi au travers d'un échangeur à plaque APV JUNIOR, type PARAFLOW, équipé de 3 passes à 13,20 et 31 canaux. Le refroidissement est assuré par de l'eau glacée à 2°C ou de l'eau de ville. Les pots sont ensuite placés en chambre froide ventilée puis stockés le lendemain à 7°C.

Le procédé ainsi décrit constitue le "stade pilote" de fabrication du yaourt brassé.

Ces conditions générales étant décrites, les conditions particulières seront mentionnées lors des résultats correspondants dans les légendes des tableaux et figures.

3.- METHODES DE CONTROLE MISES EN OEUVRE

3.1 Numération et contrôles microbiologiques

Les dénombrements de Streptococcus thermophilus sont effectués sur milieu M17 (TERZAGHI et SANDINE, 1975) et les dénombrements de Lactobacillus bulgaricus sur milieu MRS (DE MAN et coll., 1960).

3.2 Contrôles physico-chimiques

. L'Extrait Sec Total des yaourts a été mesuré par étuvage à 103°C + ou - 2°C, la pesée a lieu après 15 H, selon la norme AFNOR NF V04 -207.

. Le taux de matière grasse est mesuré par la méthode acido-butyrométrique (dite de GERBER) où le yaourt est attaqué par l'acide sulfurique puis centrifugé en présence d'alcool isoamylique (AFNOR NF V04 - 210).

. L'acidité est mesurée par titrage à l'hydroxyde de sodium (N/9) en présence de phenolphtaléine à 1 % dans l'éthanol à 95 %. La prise d'échantillon est de 10 g et l'on rajoute 3 à 4 gouttes de phénolphtaléine jusqu'au virage au rose du produit. La lecture de la descente de burette évaluée en 1/10ème de millilitres correspond à l'acidité de l'échantillon. 1 Degré Dornic est équivalent à 0.1 g d'acide lactique présent dans un litre de yaourt.

3.3 Mesures rhéologiques

Le protocole de mesure mis au point sur le rhéomètre CARRIMED CS - 50 et décrit dans le chapitre précédent a été utilisé pour caractériser les différentes grandeurs rhéologiques des yaourts brassés fabriqués à l'échelle laboratoire, pilote ou industrielle.

3.4 Evaluation sensorielle

La texture a été jugée selon la méthodologie déjà décrite. Les dégustateurs jugeaient simultanément outre la texture, l'acidité perçue et la présence éventuelle de goûts indésirables sur les différents yaourts brassés.

3.5 Méthodes statistiques d'expérimentation et de traitements des résultats

Les techniques d'analyses de la Variance et de Régression Multiple ont déjà été décrites dans le paragraphe 5 du 2 ème chapitre. Nous détaillerons simplement içi la méthode des "Plans d'Expériences" qui est un cas particulier de la régression multiple :

Cas particulier des plans d'expérience

Il s'agit d'établir l'influence de plusieurs facteurs (Xi) sur une réponse (Yi). Chaque facteur possède deux modalités, l'une haute, notée (+), l'autre basse, notée (-). La séquence expérimentale consistera à faire varier de manière indépendante l'ensemble des modalités des facteurs. Un plan expérimental spécifique est alors entrepris. Ceci permet de calculer et de tester des modèles linéaires avec interaction de la forme.

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_i X_i \ldots + a_{12} X_1 X_2 \ldots + a_{ij} X_i X_j$$

Si, par exemple, deux facteurs de variations sont étudiés, la matrice d'expérience est constitué de 2^2 soit 4 essais, non compris les essais de vérification au centre du domaine expérimental. Si p facteurs sont étudiés, la matrice d'essais complète comportera 2^p essais. Le logiciel "LUMIERE" traite alors la matrice expérimentale de la manière suivante :

Abréviation	Désignation du facteur	Unité	Niveau -1	Niveau 0	Niveau +1	Type de facteurs
X1	Taux de matière grasse	%	0		3,8	"qualitatif"
X2	Extrait sec dégraissé	g/kg	102,5	112,5	122,5	"quantitatif"
X3	Nature du ferment	-	12 M	-	KA 68	"qualitatif"
X4	Température de fermentation du yaourt	°C	39	41	43	"quantitatif"
X5	Acidité finale de soutirage du yaourt	pH	4.61	4.45	4.28	"quantitatif"
X6	Température de soutirage et de traitement mécanique	°C	20	30	40	"quantitatif"
X7	Type de traitement mécanique mis en oeuvre	-	faible brassage	-	fort lissage	"qualitatif"

TABLEAU 36 : **QUANTIFICATION PRELIMINAIRE DE L'EFFET DE 7 FACTEURS DE VARIATIONS - PRESENTATION DES MODALITES ET DU DOMAINE EXPERIMENTAL - DOMAINE EXPERIMENTAL**

La structure des expériences mises en oeuvre fait que les effets principaux s'ils sont séparés entre eux sont néanmoins superposés aux interactions suivantes :
X1 superposé à X2 X4, X3 X5, X6 X7
X2 superposé à X1 X4, X3 X6, X5 X7
X3 superposé à X1 X5, X2 X7, X4 X7
X4 superposé à X1 X7, X2 X3, X4 X5
X5 superposé à X1 X3, X2 X7, X4 X6
X6 superposé à X1 X7, X2 X3, X4 X5
X7 superposé à X1 X6, X2 X5, X3 X4

- calcul du modèle par l'algorithme de YATES.
- calcul de la validité globale du modèle estimée par l'introduction de so qui est l'erreur expérimentale au centre du domaine choisi.
- sélection des coefficients significatifs, l'effet (ai) d'un facteur Xi est significatif si $ai \geqslant t \times \frac{so}{\sqrt{2^p}}$

avec t de STUDENT correspondant à so.
- utilisation du modèle pour faire de la prévision. On vérifie alors que la moyenne expérimentale ($\bar{Y}$) des valeurs observées au centre est non significativement différente de la valeur calculée par le modèle ($\hat{Y}$).

Remarque : Des plans fractionnaires peuvent être réalisés, dans ce cas, il s'agit de superposer l'effet d'un facteur avec l'interaction de deux autres facteurs judicieusement choisis. On réalise ainsi des aliases.

III.RESULTATS ET DISCUSSIONS

1.- QUANTIFICATIONS PRELIMINAIRES DES FACTEURS VARIANT DE FACON INDEPENDANTE ET SIMULTANEE

1.1 Méthodologie et matériel utilisé

7 facteurs de variation différents ont été étudiés préalablement sous forme d'un plan d'expérience fractionnaire (2^{7-4}). Les modalités de variation et le domaine expérimental sont présentés dans le tableau 36. Le choix de ces 7 facteurs a été guidé par le données bibliographiques et la pratique des usines de SODIMA.

Le matériel pilote et les conditions opératoires générales utilisés sont celles définies précédemment. Le lait mis en oeuvre pour chaque essai est un lait entièrement reconstitué soit à partir de poudre de lait écrémé, soit à partir de poudre de lait entier à 3,8 % de M.G. Les acidités et les "Viscosités Brookfield" ont été mesurées à J + 15.

Facteurs de variation	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	REPONSES MESUREES	
								VISCOSITE BROOKFIELD (cpoB)	ACIDITE DORNIC (OD)
- Modalités +	0 3,8	102 122	12M KA68	39 43	4,6 4,28	20 40	B L		
F5	0	102	12M	43	4,28	43	B	7 860	143,5
F6	3,8	102	12M	39	4,6	43	L	7 700	135
F7	0	122	12M	59	4,28	20	L	5 900	167
F8	3,8	122	12M	43	4,28	20	B	19 500	152
F9	0	102	KA68	43	4,6	20	L	5 600	142
F10	3,8	102	KA68	39	4,28	20	B	12 400	163,5
F11	0	122	KA68	39	4,61	43	B	16 300	159
F12	3,8	122	KA68	43	4,28	43	L	20 100	172
C1	3,8	112	12M	40,7	4,44	30	B	17 530	157,50
C2	3,8	112	12M	40,7	4,44	30	B	17 200	159
C3	0	142	12M	40,7	4,44	30	B	22 930	180
C4	0	142	12M	40,7	4,44	30	B	21 730	186

ABLEAU 37 : **QUANTIFICATION PRELIMINAIRE DE L'EFFET DES 7 FACTEURS DE VARIATION SUR L'ACIDITE DORNIC ET LA "VISCOSITE BROOKFIELD" DES YAOURTS OBTENUS (J+ 15)**
MATRICE D'EXPERIENCES ET RESULTATS

1.2 Résultats et Discussion

. Ils sont reportés sur le tableau 37 qui représente la matrice des 8 essais réalisés, plus les essais servant à déterminer la validité du modèle obtenu par la connaissance de la répétabilité du procédé de fabrication. Celle-ci vaut 610 cpoB pour la "Viscosité Brookfield" et 3° Dornic pour l'acidité. Ceci permet de déterminer les effets significatifs Xi et de valider les deux modèles expérimentaux suivants :

"Viscosité Brookfield" = 11920 + 3000(**X1**) + 3530(**X2**) + 1680(**X3**)+ 1340(**X4**) - 350(X5) + 1070(**X6**) - 2090(**X7**)

Acidité Dornic = 154,25 + 1,37(X1) + 8,25(**X2**) + 4,87(**X3**) - 1,87(X4) + 7,25(**X5**) - 1,8(X6) - 0,25(X7)

Les modèles ainsi définis sont utilisables pour prévoir les valeurs expérimentales obtenues aux points C1, C2 et C3,C4. En effet, les valeurs calculées sont conformes aux valeurs expérimentales. La quantification comparée de l'effet de chacun des 7 facteurs, compte tenu de leurs modalités respectives, peut alors se faire de la manière suivante :

Effet du taux de matière grasse :

Le yaourt à 0 % de matière grasse a une viscosité inférieure de 6000 cpoB au yaourt à 3,8 % de matière grasse.

Le taux de matière grasse n'a pas d'influence significative sur l'acidité titrable du yaourt (°D).

Effet de l'extrait sec dégraissé

Une augmentation de 10 g/kg d'E.S.D. augmente de 3500 cpoB la viscosité mais aussi, en même temps, de 9°D l'acidité Dornic.

Effet de la nature du ferment

Par rapport au ferment 12 M, le ferment KA 68 permet de gagner autant de viscosité (3360 cpoB) que l'ajout de 9,6 g/kg de poudre de lait. Il augmente aussi la postacidification d'environ 10°D après 15 jours.

Effet de la température de fermentation

Ce facteur doit être parfaitement contrôlé. En effet, le passage de 39°C à 43°C permet de gagner 2680 cpoB en moyenne pour les 2 ferments. Il n'a pas d'effet significatif sur l'acidité du produit.

Effet de l'acidité au soutirage

Un décaillage à pH 4,28 plutôt qu'à 4,6 n'augmente pas de façon significative la viscosité mais il entraine une élévation d'acidité de 14°D.

Effet de la température pendant le traitement mécanique

Le traitement de la pâte à la température de 20°C plutôt qu'à 40°C fait chuter la viscosité de 2000 cpoB, il n'a pas d'effet significatif sur la post-acidification.

Effet du traitement mécanique

Dans ces conditions, la mise en oeuvre d'un lissage comparée à un brassage a entrainé une chute de viscosité de 4200 cpoB, équivalente à une baisse de 12 g/kg d'E.S.D.

En première approche, cette étude préalable quantifie donc, dans un domaine et des conditions expérimentales définies, les effets respectifs des 7 facteurs sur la "Viscosité Brookfield", et l'acidité Dornic après 15 jours, du yaourt brassé.

Cependant, compte tenu des nombreux effets superposés et malgré un bon ajustement des modèles linéaires obtenus aux valeurs expérimentales, ces éléments sont à prendre comme des indications qui permettent de se faire une première idée du poids respectif des différents facteurs de variation sur la "viscosité Brookfield" du yaourt compte tenu de la postacidification.

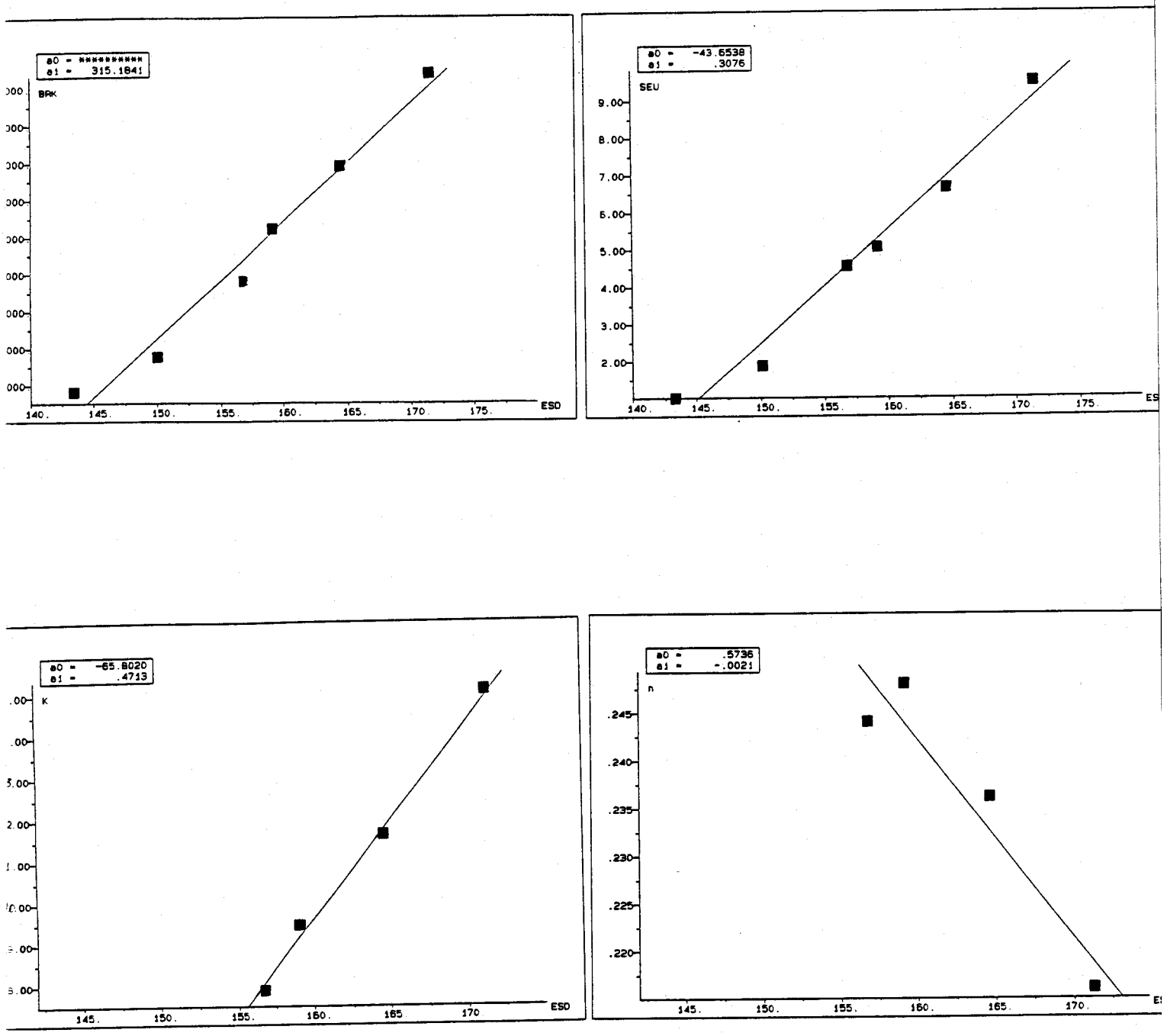


FIGURE 47 : **VARIATIONS LINEAIRES DE VISCOSITE BROOKFIELD, DU SEUIL D'ECOULEMENT, DU COEFFICIENT K ET DE L'INDICE N DU YAOURT BRASSE EN FONCTION DU TAUX D'E.S.D. OBTENU PAR AJOUT DE POUDRE DE LAIT ECREME.**

(a_0 = ordonnée à l'origine, a_1 = pente de la régression).

2.- INFLUENCE DES MATIERES PREMIERES ET DE LEUR PREPARATION

2.1 Effet de l'extrait sec dégraissé (E.S.D.)

L'influence de ce facteur a été étudiée ici sous l'angle de la quantité de poudre de lait écrémé ajoutée avant fermentation à un lait entier, sucré à 8 % au stade laboratoire. Le levain était réalisé avec le ferment KA68. 6 taux de poudre croissants ont été utilisés, les 6 yaourts ont été refroidis à l'acidité finale de 110°D, puis caractérisés après 7 jours de stockage. Les résultats sont reportés en annexe 8. Nous observons pour tous les indicateurs une variation linéaire et proportionnelle au taux d'E.S.D. Dans le domaine expérimental étudié, l'augmentation de 10 g/kg d'E.S.D. entraine donc des augmentations moyennes importantes du seuil d'écoulement (+ 3Pa), de la viscosité plastique (+ 272 mPa.s), du coefficient K(+4,7Pa)voir figure 47, de la viscosité Brookfield (+3150 cpoB) qui est du même ordre de grandeur que la variation de 3500 cpoB obtenuedans le plan d'expérience préliminaire. La diminution de la surface de thixotropie est aussi très sensible (- 634 mPa.s^{-1}). Par-contre, la diminution de l'indice d'écoulement est significative mais d'importance nettement moindre (-0,02), figure 47.

L'augmentation de viscosité ainsi quantifiée confirme les travaux de PUHAN (1978) qui observait une augmentation quasi-linéaire de la viscosité en fonction du pourcentage de poudre de lait ajouté. Par ailleurs, la perception de la différence d'aspect épais du fait de l'augmentation de 1 % du taux de PLE semble être significative, ce que ne relevait pas SALJI (1985) mais cet auteur travaillait à des concentrations plus faibles.

En résumé, l'ajout de poudre de lait écrémé au lait avant fermentation augmente les caractéristiques de viscosité et de plasticité du yaourt brassé, la surface de thixotropie est nettement diminuée mais l'écoulement du yaourt brassé tend à devenir un peu plus rhéofluidifiant. Sensoriellement, le produit est perçu plus épais.

Référence du yaourt	0	1	2	3	4	5
Taux de sucre %	0	4,5	4,5	6,3	8,2	12,4
Temps de fermentation	2 H45	2 H50	2 H55	3 H15	3 H20	5 H30
Acidité finale °D	112	115	107	110	116	71

TABLEAU 38 : **TEMPS DE FERMENTATION DU YAOURT BRASSE EN FONCTION DU TAUX DE SUCRE AJOUTE A LA BASE LAITIERE**

Alea de répétabilité sm+p	taux de sucre du yaourt (%)	0 %	4,5 %	4,5 %	6,3 %	8,2 %	12 %	Différences significatives confiance = 10%	Variation pour 1 % de sucre	% de la valeur à 63 %
	E.S.T.(g/kg)	150.7	187.8	188.5	206	222	260	OUI	-	-
753	BROOKFIELD "cpoB"	12833	13566	12500	11000	9266	10066	OUI	- 322	- 3 %
1,6	SEUIL (Pa)	15,7	17,8	15,5	13,4	13,2	11,7	OUI	- 0.41	- 3 %
200	VPL (mPa.s) viscosité plastique	184	486	202	141	121	117	NON	NS	-
564	ST (mPa.s $^{-1}$) surface de thixotropie	15080	14659	13860	23895	28650	35595	OUI	+ 1984	+ 8 %
1,1	K (Pa.s)	16.7	19.5	17.9	16.3	16.3	14.4	NON	NS	-
0,012	n	0.163	0.167	0.149	0.151	0.146	0.159	NON	NS	-
0,25	TEP texture épaisse en pot	3.3	3.07	2.72	2.45	2.26	2.4	OUI	- 0.08	- 3 %
0,17	FIL /5 texture filante en pot	4.57	4.15	3.9	3.6	3.7	4.06	NON	NS	-
0,68	BEP /5 texture épaisse en bouche	2.85	3.02	2.05	2.02	1.98	1.9	OUI	- 0.08	- 4 %
1.76	ACIDITE (°D)	146.5	145.2	142.7	145	137.5	100.5	OUI	-	-
0,17	N Act /5 Note d'acidité	1.7	2.18	2.57	2.93	2.95	4.21	OUI	-	-
0.04	Note sucrée/5	1.16	1.94	2.00	2.94	3.67	4.71	OUI	-	-

TABLEAU 39 : **INFLUENCE DU TAUX DE SACCHAROSE SUR LES CARACTERISTIQUES DU YAOURT BRASSE MESUREES A J + 8**

Rappelons que l'ajout de poudre de lait écrémé signifie en fait ici ajout de matières azotées (environ 30 g pour 100 g de poudre) qui sont ainsi disponibles pour entrer dans la constitution du réseau protéique, et aussi ajout de lactose (environ 50 g pour 100 g de poudre) qui va augmenter la concentration de la phase aqueuse. Les effets rhéologiques de l'adjonction de matière azotée protéique seule serait intéressant à quantifier afin de préciser les travaux décrits par GENNIP (1973).

2.2 Effet du taux de saccharose

2.2.1 Méthode utilisée

L'étude de l'effet du taux de sucre ajouté en quantités croissantes à la base laitière avant traitement thermique a été réalisée à l'échelle laboratoire. Le ferment 3C a été utilisé, les temps de maturation reportés dans le tableau **38**, indiquent nettement que l'incorporation de saccharose augmente le temps de fermentation de la base laitière ; à la concentration de 12,4 %, il y a pratiquement ihnibition de croissance car l'acidité de la base laitière n'atteint que 71°D après 5 H30 de fermentation. Pour tous les autres yaourts, la fermentation à 43°C a eu lieu jusqu'à 110°D.

2.2.2 Résultats et Discussion

Les résultats sont reportés dans les tableau **39**. L'étude rhéologique montre qu'un taux de saccharose croissant augmente fortement la surface de thixotropie (figure **49**) et diminue de façon moindre mais significative le seuil d'écoulement. Par-contre, les variations de l'indice n ne peuvent pas être imputées aux taux de saccharose (risque α = 20 %), ce qui est aussi le cas du coefficient de consistance K et de la viscosité plastique qui ne sont pas significativement affectés.

Une étude par régression montre la relation linéaire qui existe entre le taux de saccharose et les caractéristiques rhéologiques dont la variation est significative (figure **48**).

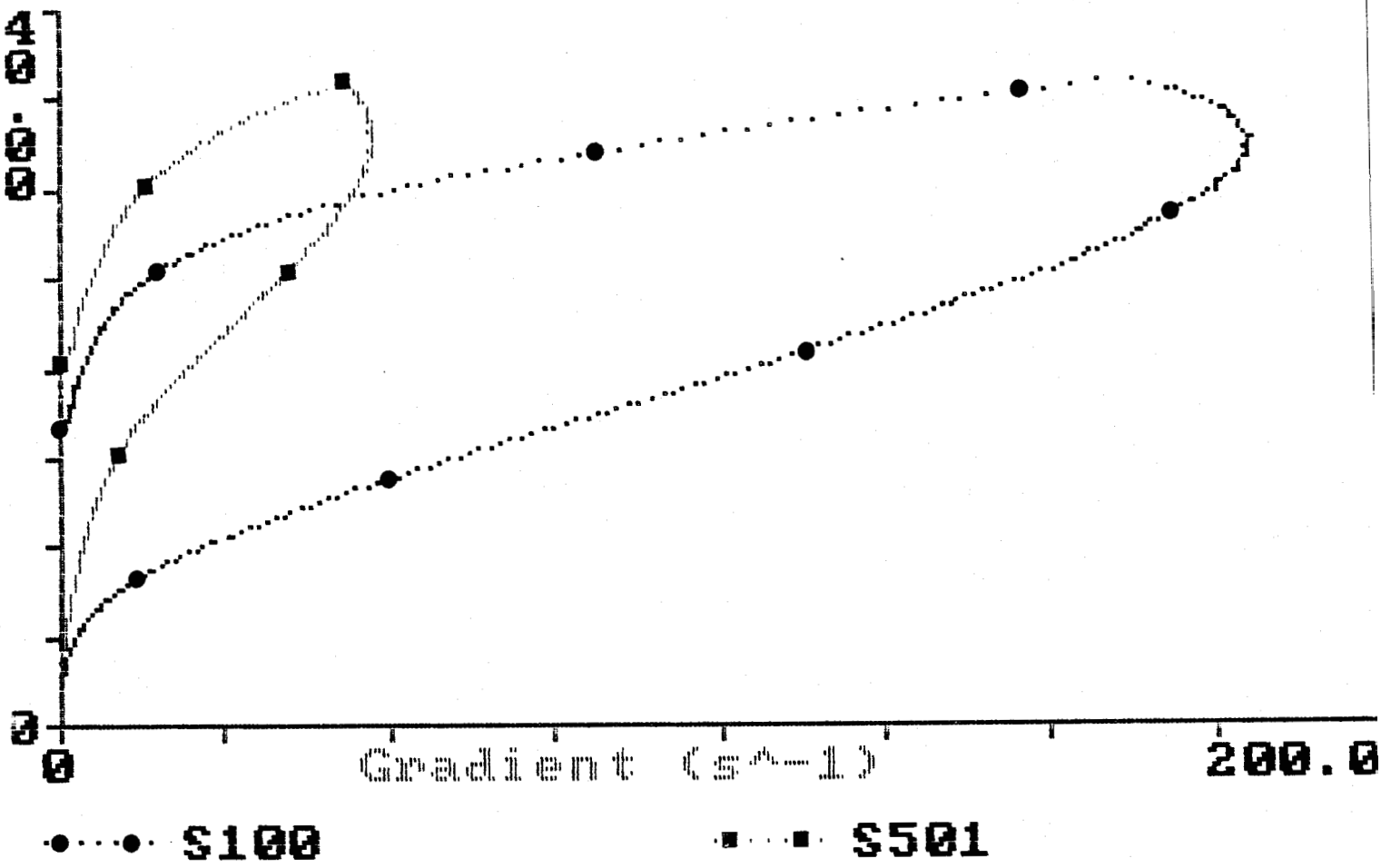
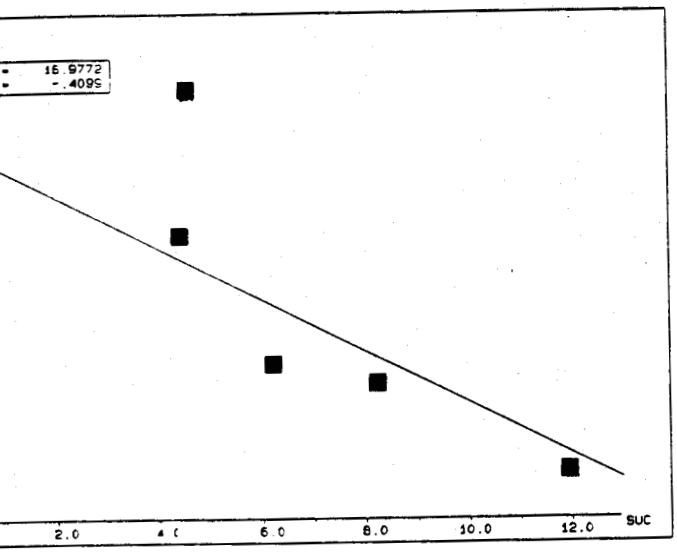
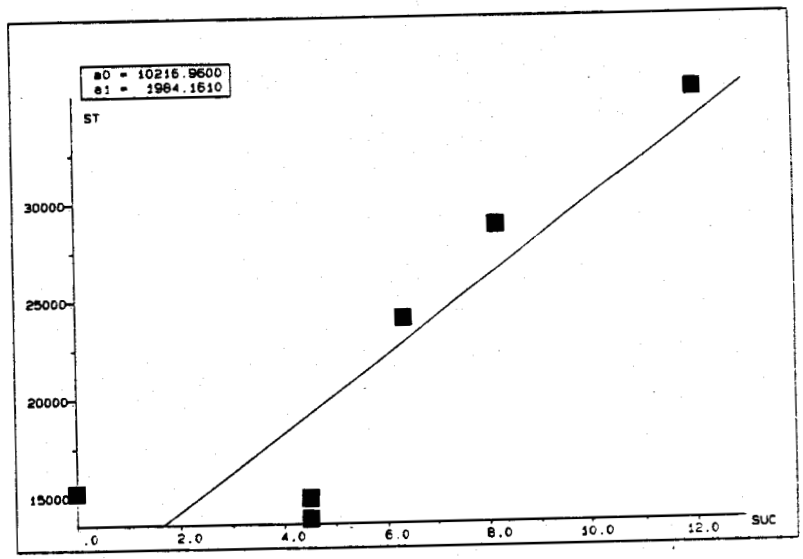
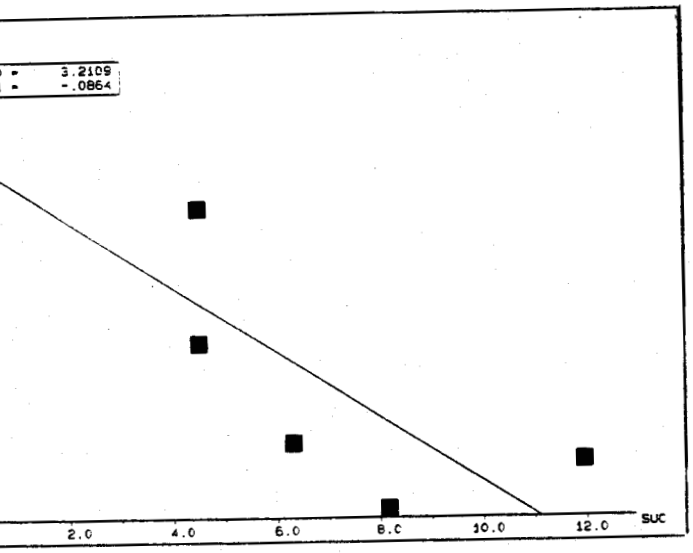


FIGURE 49 : COMPARAISON DE DEUX RHEOGRAMMES DE YAOURT BRASSE DONT LES TAUX DE SUCRE VALENT RESPECTIVEMENT 4,5% (S501) ET 8,2 % (S100)







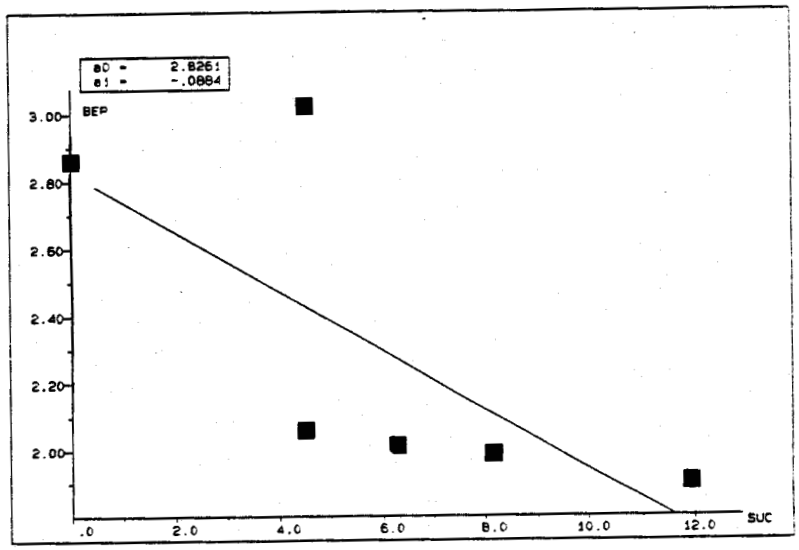


FIGURE 48 : INFLUENCE DU TAUX DE SACCHAROSE SUR LE SEUIL D'ECOULEMENT, LA SURFACE DE THIXOTROPIE, LA TEXTURE EPAISSE PERCUE EN POT ET EN BOUCHE DU YAOURT BRASSE

Ainsi, tout se passe comme si l'incorporation croissante de sucre fragilisait proportionnellement le caillé lactique obtenu, d'une part parce que sa structure, en absence de cisaillement, serait moindre, d'autre part et surtout parce que la destructuration serait plus facile pour une même contrainte appliquée.

Les propriétés plastiques et surtout thixotropes du yaourt brassé seraient donc beaucoup plus affectées que les propriétés intrinsèques d'écoulement. Les données bibliographiques nous ont manqué pour discuter de ce résultat.

Pour sa part, l'évaluation sensorielle indique que le yaourt sucré est perçu nettement moins épais tant en pot qu'en bouche. Cependant, pour cette dernière sensation, il convient de prendre en compte l'interaction avec la saveur sucrée qui était bien entendu plus élevée (KOKINI, 1987). L'aspect filant n'est pas significativement modifié du fait de l'ajout de sucre.

2.3 Effet du taux de matière grasse

L'effet d'une élévation du taux de matière grasse peut être rapidement discutée si l'on reprend les données quantitatives du tableau 40, issues de 3 études préliminaires réalisées sous forme de plans d'expériences (paragraphe III.1 et annexe 9).

Variation du taux de matière grasse (g/kg)	Commentaire	CARACTERISTIQUE DE TEXTURE						
		BRK (cpoB)	K ($Pa.s^n$)	n (-)	SEU Pa	ST $Pa.s^{-1}$	TEP BEP/5	FIL /5
36/0	.lait reconstitué .effet de la matière grasse confondue avec interactions	+ 6000	AD	AD	AD	AD	AD	AD
36/25	.effet indépendant	+ 600	+0.9	-0.008	NS	NS	NS	NS
32/12	.effet indépendant	+ 3400	AD	AD	AD	AD	+0.5/s environ	NS

TABLEAU 40 : ANALYSE DES EFFETS DU TAUX DE MATIERE GRASSE SUR LES CARACTERISTIQUES RHEOLOGIQUES DU YAORT BRASSE

Facteur de Variation	Viscosité Brookfield (cpoB)	Coefficient de consistance ($Pa.s^n$)	Indice d'écoulement (-)
E.S.D = +1 %	+ 3000 environ	+ 4 environ	- 0.02 environ
Sucre : + 5%	- 1500 environ	NS	NS
M.G. : + 1 %	+ 1700 environ	+ 1 environ	NS

TABLEAU 41 : **SYSTEME D'EQUIVALENCE SIMPLIFIE ETABLI A PARTIR DES RESULTATS DES EFFETS DES MATIERES PREMIERES SUR LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE**

NS : effet non significatif.

Ainsi, il semble bien qu'un taux de matière grasse plus élevé augmente la "Viscosité Brookfield" du yaourt brassé, ainsi que le coefficient de consistance K. La sensation "d'épais en pot" et "en bouche" est aussi plus forte.

Cependant, l'aspect filant n'est pas affecté, l'indice d'écoulement n bien qu'en légère diminution, varie de façon non significative. Ces observations peuvent être rapprochées des analyses des travaux de MARTENS, 1972, tableau 12 , qui permettent d'établir que le taux de matière grasse affecte moins une "mesure d'écoulement" du yaourt brassé - (Ecoulement = 28 + 3.7 (M.G.)) - qu'une "mesure de pénétration" - (Pénétration = 10.8 - 5,7 (M.G.)).

2.4 Conclusion

L'objectif des travaux décrits ci-dessus était de permettre une quantification comparée de l'influence des trois principales matières premières qui interviennent dans la préparation de la base laitière, sur la texture du yaourt brassé.

Nous avons vu que le taux de poudre de lait écrémé ajouté augmente de façon quasi-linéaire, les caractéristiques de viscosité, de plasticité, d'aspect épais, ainsi que la capacité de résistance à la destructuration ; par-contre, ces mêmes caractéristiques et surtout le phénomène de résistance, diminuent lorsque l'on augmente le taux de saccharose pour un extrait sec non sucré équivalent.
Le taux de matière grasse, quant à lui, semble modifier les caractéristiques de consistance plutôt que d'écoulement. En effet, il augmente surtout la consistance, la perception épaisse, la "Viscosité Brookfield". Il n'a pas d'effet sur l'indice n.

Le comportement rhéofluidifiant du yaourt brassé, caractérisé par l'indice n, serait peu accentué sous l'effet d'un extrait sec croissant mais ne serait pas du tout affecté par une augmentation du taux de sucre.
D'un point de vue pratique, le tableau 41 propose un système d'équivalences expérimentales simplifiées.

1. LAIT DE MELANGE, entier, poudré
   E.S.T. = 153,9 g/kg
   M.G. = 38,25 g/kg

2. PASTEURISATION
   T° sortie = 44°C

3. CUVE DE MATURATION (1000 litres)
   T° non régulée

4. ENSEMENCEMENT
   4 % levain J + 1 - acidité contrôlée

5. DECAILLAGE A 100°D

6. SOUTIRAGE

7. REFROIDISSEMENT A T° FIXEE

8. CUVE DE STOCKAGE 2 H

9. CONDITIONNEMENT

10. PRELEVEMENT DES YAOURTS

11. REFROIDISSEMENT PARTICULIER
    Chambre froide CLCP

12. STOCKAGE DES PRODUITS A 7°C

FIGURE 50 : **PROCEDE MIS EN OEUVRE DANS L'ATELIER MOLIERE DE LA C.L.C.P. AFIN D'ETABLIR L'EFFET DU FERMENT SUR LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE**

3.- INFLUENCE DES CONDITIONS DE FERMENTATION

3.1 Mise en évidence de l'effet propre au ferment utilisé

Les études préliminaires réalisées mettaient en évidence une différence significative de texture des yaourts brassés fabriqués au stade pilote, du fait d'un changement de ferment.

Les augmentations ont été respectivement estimées à + 3300 "cpoB" pour KA68 par rapport à 12M et à + 1200 cpoB pour KA68 par rapport au ferment 22P dans une seconde série d'essais (annexe 9), cette dernière variation n'étant pas significative. Nous avons repris à l'échelle industrielle, une étude de comparaison entre le ferment KA68 et un ferment (F), propre à la C.L.C.P. afin d'établir si l'effet sur la texture du changement de ferment était à lui seul significatif, compte tenu des nombreux autres facteurs de variation du procédé industriel. Le procédé industriel mis en oeuvre dans des conditions étroitement contrôlées est schématisé sur la figure - 50. Les contrôles de "Viscosité Brookfield" et d'évaluation sensorielle (texture épaisse et filante) du yaourt brassé nature ont été réalisés après 15 jours de fabrication. L'aléa du procédé industriel estimé expérimentalement par une répétition, réalisé avec le ferment F, était égal à 730 cpoB pour la "Viscosité Brookfield".

Les résultats obtenus figurent sur le tableau 42 et indiquent toute chose étant égale, par ailleurs et compte tenu des aléas de procédé et de mesure que l'utilisation industrielle du ferment KA68 entraine une augmentation de plus de 2000 cpoB de la viscosité du yaourt brassé. La texture épaisse perçue en pot du yaourt brassé augmente d'environ 1,0 point/5 quand on remplace le ferment traditionnel de la C.L.C.P. par le ferment KA68. Cet effet positif est du même ordre de grandeur que l'effet d'une élévation de 6°C de la température en sortie du refroidisseur.

	FERMENT	TEMPERATURE DE SOUTIRAGE	BRK	TEP	FIL	ACI
E1	CLCP	12°C	7633	1.21	1.98	2.32
E2	CLCP	20°C	8800	2.78	1.94	1.21
E3	KA68	12°C	9366	2.58	1.85	1.71
E4	KA68	20°C	11100	3.40	1.58	1.58

TABLEAU 42 : INFLUENCE DU FERMENT UTILISE SUR LA VISCOSITE BROOKFIELD (cpoB) LA TEXTURE EPAISSE, FILANTE ET L'ACIDITE DU YAOURT BRASSE NATURE APRES 15 JOURS DE FABRICATION EN CONDITIONS INDUSTRIELLES

FERMENT / TEMPERATURE REFROIDISSEMENT	KA 68	F
12 °C	9366	7633
20°C	11100	8800

TABLEAU 43 : INFLUENCE DU FERMENT ET DE LA TEMPERATURE DE SOUTIRAGE SUR LA VISCOSITE BROOKFIELD (cpoB) DU YAOURT BRASSE NATURE APRE 15 JOURS DE FABRICATION EN CONDITIONS INDUSTRIELLES

La variation de l'aspect filant n'est pas significative, l'augmentation n'est que de 0,2 points/S lorsque l'on remplace le ferment C.L.C.P. par le ferment KA68.
Par ailleurs, la variation de l'acidité est, elle aussi, très peu sensible (+ 0.12 points/s).

Ces travaux réalisés au stade pilote puis en conditions industrielles, quantifient et confirment que le choix du ferment lactique joue un rôle important sur les caractéristiques de texture du yaourt brassé. Cela avait été en particulier, nettement montré mais à l'échelle laboratoire par BOUILLANNE et DESMAZEAUD (1980) qui obtenaient des rapports de viscosité de 1 à 8 selon le type de souche de Streptococcus thermophilus.

Dans nos essais, l'augmentation comprise entre 2000 et 3000 cpoB de la viscosité Brookfield, du fait de l'emploi du ferment KA68, est à rapprocher des variations de 3000 cpoB due à la variation de 1 % d'E.S.D. La mise en évidence de l'importance de ce facteur biologique est donc le premier pas d'une étude qui cherchera à essayer de comprendre le pourquoi de cette manifestation "d'un pouvoir texturant" propre au ferment, donc aux souches bactériennes utilisées. Ce sera l'objet du paragraphe III.5.

3.2 Effet de la température de fermentation

Dans un premier temps, nous avons étudié l'influence de faibles variations de température afin de ne pas remettre trop en cause les conditions industrielles de production, puis dans une deuxième approche, nous avons comparé les températures de 30°C et 43°C afin de nous situer dans des conditions de production de mucus nettement différentes (SCHELLHASS, 1983). Par ailleurs, ces températures pouvaient aussi être utilisées au stade industriel moyennant un allongement important du temps de fabrication.

	X1=T° levain (TLE)	X2= T° yaourt (TYA)	Temps F	BRK	ACI	Seuil	VPL	ST	K	N
	39	39	(mn)	cpoB	OD	Pa	mPa.s			
	43	43								
E1 1	-	-	247	7000	133	79.7	100.6	18755	AD	AD
E3 2	+	-	230	7360	148	11,1	86	15890	AD	AD
E2 3	-	+	160	7600	149	10,15	167	6122	AD	AD
E4 4	+	+	160	6533	152	8,6	178	5189	AD	AD
EC1 -	0	0	196	8320	145,5	12,2	166	6467	AD	AD
EC2 -	0	0	200	8400	143,5	12,6	208	9297	AD	AD
Répétabilité sp m			3	57	2	0,25	29,6	2000	-	-

TABLEAU 44 : EFFET DES TEMPERATURES DE FERMENTATION, STRUCTURE DES ESSAIS REALISES ET RESULTATS OBTENUS
(AD = absence de données ; temps F = temps de fermentation)

3.2.1 Variation de 39 à 43°C

Suite au plan d'expérience à 7 facteurs de variation, deux séries d'essai ont été mené à l'échelle laboratoire afin de confirmer l'effet de la température de fermentation au stade yaourt sur la texture.

Dans la première série, les températures respectives de 39°C, 41°C et 43°C ont été choisies pour la fermentation de la base laitière par un levain réalisé à 43°C avec un ferment 3C.

Dans la deuxième série, les températures de 41°C, 43°C et 45°C, avaient été mise en oeuvre dans les mêmes conditions. Les résultats obtenus ne montraient aucune différence significative entre les différents lots. L'idée a alors consisté à faire varier de façon indépendante les températures de fermentation dès le stade levain puis au stade yaourt.

3.2.1.1 Méthode utilisée

Nous avons utilisé le ferment 3C pour une étude à l'échelle pilote sous forme d'un plan d'expérience où les 2 facteurs de variations étaient la température de fermentation du levain (X1) et la température de fermentation du yaourt (X2) (tableau **44**). Tous les autres paramètres étaient soit maintenus constants, soit inclus dans la répétabilité du procédé. 2 essais de répétabilité ont été effectués.

Le temps de fermentation des yaourts est relevé ; l'acidité, la "Viscosité Brookfield" et les mesures rhéologiques ont été effectuées après 7 jours de stockage.

3.2.1.2 Résultats

La structure des essais réalisés et les résultats obtenus sont présentés sur le tableau **44.**

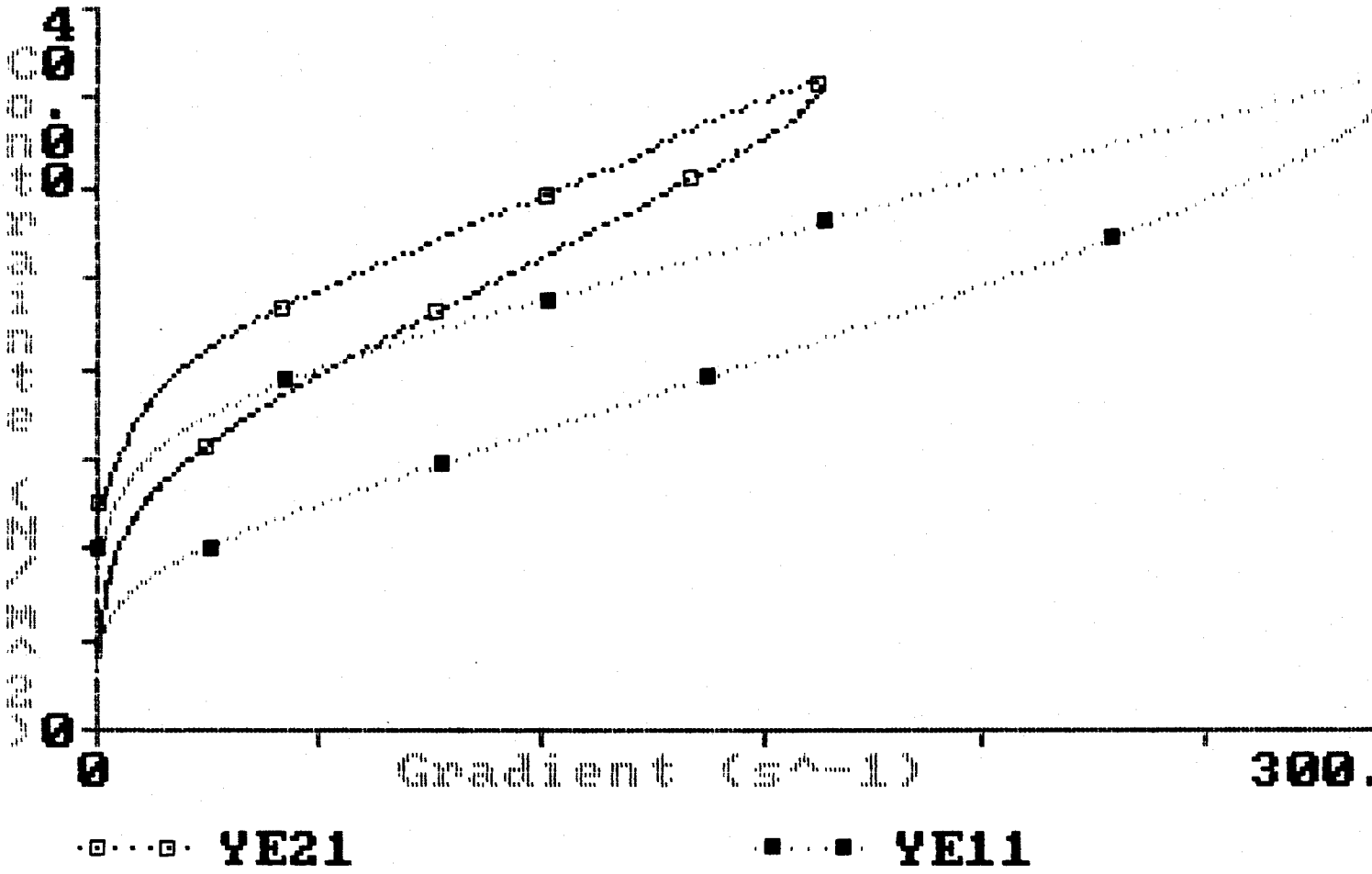


FIGURE 51 : RHEOGRAMME COMPARES DE 2 YAOURTS DONT LA TEMPERATURE DE CULTURE VAUT RESPECTIVEMENT 39°C (YE11) ET ET 43°C. (YE21). LE LEVAIN ETAIT FERMENTE A 39°C

Effet des températures sur la "Viscosité Brookfield"

L'expression des Viscosités Brookfield par le calcul et le test du modèle : BRK = 7123 - 356 (TLE x TYA) nous apprend que l'interaction des 2 températures levain et yaourt a beaucoup plus d'importance que les températures en elles mêmes, et surtout qu'il n'y a pas d'effet linéaire de l'augmentation de température sur la viscosité ; en effet, la prévision par les modèles de la viscosité à 41°C est inexacte (valeur prévue à J+ 7 = 7123 alors que la valeur réelle = 8360 cpoB).

Effet des températures sur les caractéristiques rhéologiques

- seuil d'écoulement

Les variations de cette grandeur sont significatives et les yaourts maturés à 41°C à partir d'un levain à 41°C ont un seuil d'écoulement nettement supérieur comparés aux yaourts fabriqués selon les 4 autres conditions (par exemple, + 4 Pa environ par rapport aux températures de 43°C). Les modèles linéaires ne sont donc pas utilisables.

- viscosité plastique

Compte tenu de la variation de cette grandeur due à la simple répétition du procédé, les effets des températures du levain et du yaourt ne sont pas significatifs.

La tendance est néanmoins à l'augmentation de la viscosité plastique quand la température de culture du yaourt augmente.

- surface de thixotropie

Le modèle obtenu : (ST = 11489 - 5833 (TYA) signifie que seule la température au stade yaourt est significative, il prévoit bien la valeur de la surface de thixotropie à 41°C.

En conséquence, une maturation à 43°C (par rapport à 39°C) produirait un yaourt dont la surface de thixotropie est nettement plus faible, (- 11600 Pa.s) il aurait donc tendance à se destructurer moins rapidement (figure 51).

CARACTERISTIQUES DES YAOURTS		S_p	ESSAI (30°C)	TEMOIN (43°C)	% de confiance "d'affirmer la différence est significative"
Ferment		-	KA68	KA68	-
E.S.T/M.G (g/kg)		-	155.9/36	155.4/36	-
Acidité (°D) /note/5		2/0.5	127/3.2	134.5/2.9	/21%
VISCOSITE BROOKFIELD		560	17800	26000	99.5%
RHEOLOGIE	SEUIL D'ECOULEMENT ($N.m^{-2}$ = Pa)	0.35	16.9	21.6	99.5%
	VISCOSITE APPARENTE mPa.s	866	1962	4967	99.5%
	VISCOSITE PLASTIQUE mPa.s	293	1032	1948	91%
	SURFACE THIXOTROPIE ($N.m^{-2}.s^{-1}$)	10	106	55	96%
	MODELE RHEOLOG -K	-	18.8	AD	-
	MODELE RHEOLOG n	-	0.220	AD	-
EVAL SENS. POT	EPAIS/5	0.33	3.2	4.25	99%
	FILANT/5	0.32	3.9	4.6	92%
	HET/LISSE	-	lisse	lisse	-
BOUCHE	EPAIS/5	0.37	2.9	3.8	96%
	COLLANT/5	0.68	4.1	3.3	58%
	GOUT/5	0.63	3.6	3.1	21%
NUMERATION BACTERIENNE					
St($\times 10^6$)g/ml		170	430	540	53%
Lb($\times 10^6$)g/ml		7	300	535	100%
St/Lb		-	1.4	1	-
Polysaccharide (mg/l)		5.8	56	41.8	96%

TABLEAU 45 : **COMPARAISON DES CARACTERISTIQUES DE DEUX YAOURTS BRASSES (J + 7) FERMENTES A 2 TEMPERATURES DIFFERENTES**

Le dosage de Polysaccharide a été effectué en triple par le Laboratoire de Chimie Biologie de LILLE. (DOCO et FOURNET, communication personnelle)

3.2.2 Comparaison de fermentation à 30°C et à 43°C

3.2.2.1 Méthode utilisée

Le levain issu d'un ferment KA68 est ensemencé sur la même base laitière, à raison de 4 % pour le yaourt fermenté à 43°C et à 0.5 % pour le yaourt fermenté à 30°C. La fermentation a été stoppée à pH 4.55, après 3 H30 pour le yaourt à 43°C et après 20 H pour le yaourt à 30°C. La fermentation à 43°C a été répétée afin de déternminer l'aléa de fabrication (sp). Toutes les autres conditions sont conformes aux conditions générales. A J + 1, des échantillons (environ 125 g) de chacune des 3 fabrications ont été congelés puis expédiés au laboratoire de Lille, pour quantification du polysaccharide produit. Le dosage a été effectué en triple.

L'acidité Dornic, la viscosité Brookfield, les mesures rhéologiques et les évaluations sensorielles ont été effectuées après 7 jours de stockage.

3.2.2.2 Résultats

Ils sont reportés sur le tableau 45. Celui-ci fait apparaitre qu'à 30°C, la quantité de polysaccharide est significativement supérieure à celle produite à 43°C. Les températures basses favorisent donc la production de polysaccharide par le ferment KA68. Ceci avait été observé par SCHELLHASS, 1985 sur des ferments épaississants isolés de yaourts.

Cette production supérieure ne se traduit pas par une texture renforcée du yaourt brassé, quelquesoit le critère instrumental ou sensoriel considéré, alors même que le pH final des 2 fabrications était identique et égal à 4.5.

Au contraire, le yaourt fabriqué à 30°C présente une plasticité, une viscosité plastique, et des notes d'aspect épais nettement inférieures. La mesure de "Viscosité Brookfield" varie nettement dans le même sens, ce qui confirme les travaux de SCHELLHASS (1985).

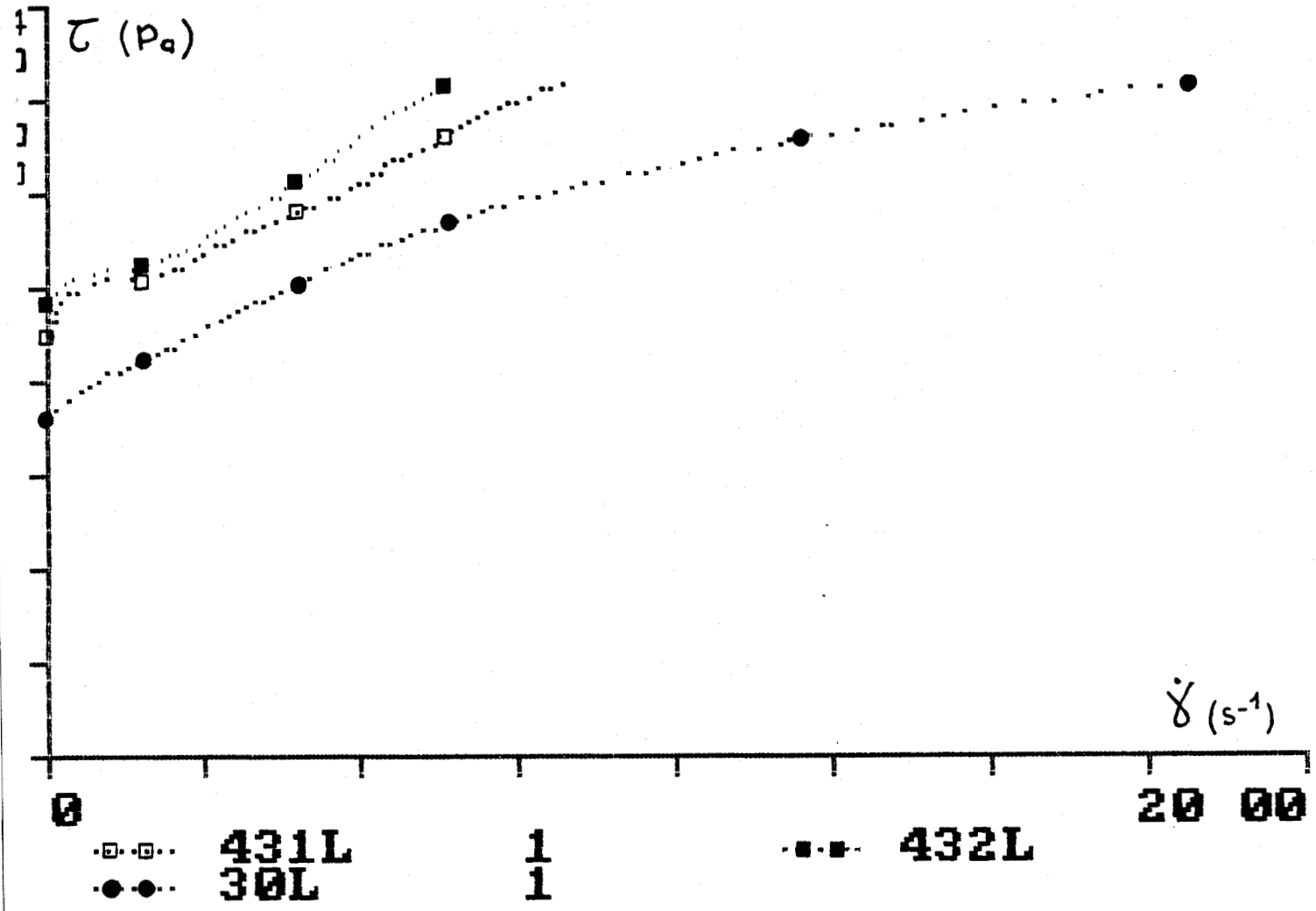


FIGURE 52 : RHEOGRAMMES COMPARES D'UN YAOURT FERMENTE A 30°C (30 L) ET D'UN YAOURT FERMENTE A 43°C (431L et 432L)

"Viscosité Brookfield" / température de fermentation	30°C	43°C
Avant lissage	19400	30800
Après lissage	17800	26000
Perte de texture %	8 %	15.5 %

TABLEAU 46 : ESTIMATION DE LA VISCOSITE BROOKFIELD AVANT ET APRES LISSAGE DE 2 YAOURTS FERMENTES A TEMPERATURE DIFFERENTE

La modélisation comparée des rhéogrammes (figure 52) est difficile compte tenu de leurs allures différentes, on observe néanmoins une allure légèrement plus rhéofluidifiante pour le yaourt incubé à 30°C. Or, ce résultat semble en contradiction avec les résultats avancés par SCHELLHASS (1985) et l'aspect plus filant que nous avons observé par évaluation sensorielle.

En résumé, le yaourt à 30°C présente une texture inférieure. Cependant, il semble montrer une plus grande résistance au traitement mécanique de lissage, comme l'exprime le ratio de "Viscosité Brookfield" avant et après traitement (tableau 46).

D'autre part, le nombre total de bactéries est plus important dans le yaourt à 43°C, le rapport des deux germes est déséquilibré au profit du lactobacille. Ces premiers éléments confirmeraient que la production de mucus est opposée à la croissance, et qu'elle serait plutôt le fait des streptocoques dans ce ferment.

3.2.2.3 Discussion

Une hypothèse d'interprétation de ces tendances consiste à avancer l'idée d'une production d'acide lactique plus rapide à 43°C. Cette acidification plus rapide du milieu permettrait une aggrégation plus solide des micelles de caséines (liaisons fortes). Par ailleurs, les conditions de synthèse mucoïde serait moins favorables. Ce matériau de texture forte possèderait une certaine fragilité au traitement mécanique.

Une acidification plus lente se traduirait par une probabilité d'interaction, sous forme de liaisons faibles, plus importante entre le polysaccharide présent en plus grande quantité et les micelles de caséine. Ces dernières auraient un pouvoir d'aggrégation moindre, causé par le ralentissement de la vitesse d'acidification.

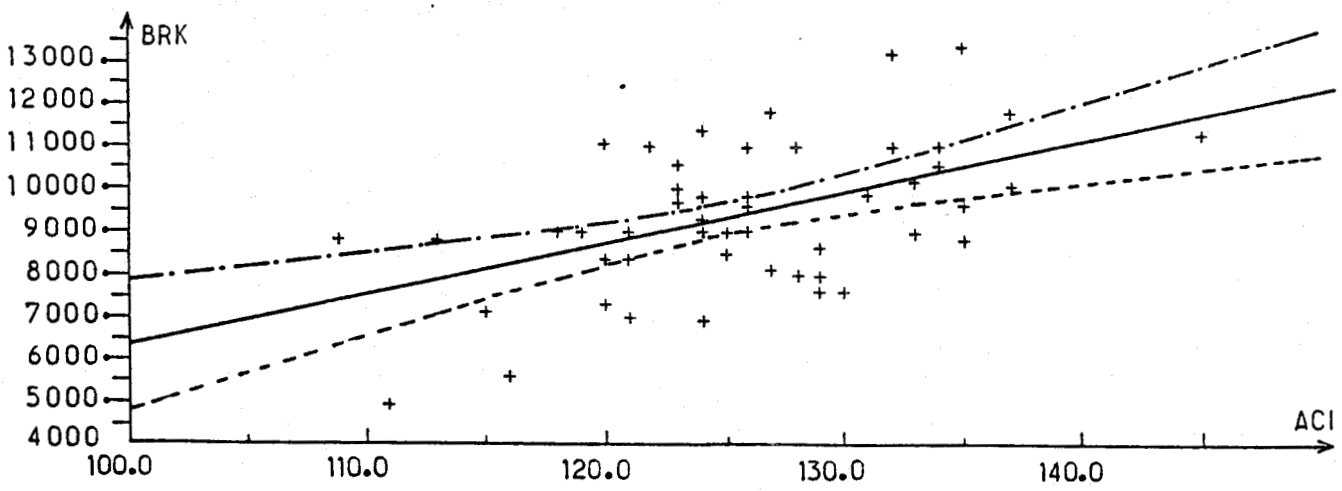


FIGURE 53 : RELATION ENTRE LA"VISCOSITE BROOKFIELD" ET L'ACIDITE DORNIC DE YAOURTS BRASSES NATURE FABRIQUES INDUSTRIELLEMENT A LA C.L.C.P. EN JANVIER ET FEVRIER 1987

Le résultat en serait un matériau à texture plus faible mais qui peut présenter un aspect plus continu, plus lié, d'où la possibilité d'un meilleur comportement au lissage.

D'autres auteurs tels MARTENS, 1972 et GALESLOOT et HASSING (tableau **16**) en se basant sur des test empiriques avaient montré les effets contradictoires des températures basses sur la fermeté du yaourt brassé qui diminuait et sur sa viscosité qui augmentait.

3.2.2.4 Conclusion

Ces effets de la température mettent au moins en évidence la complexité du mécanisme de constitution de la texture du yaourt brassé. C'est un processus dynamique, où les conditions de température les plus favorables à l'acidification et donc à l'aggrégation des protéines sont antagonistes à celles présidant à la synthèse de polysaccharide. Ceci confirme les observations de GANCEL (1988) sur S. thermophilus seul en mileu synthétique.

Il s'agit donc de trouver un compromis de température permettant la texture recherchée, compte tenu du ferment utilisé. La température de 30°C semble dans ce cas trop faible, la température de 41°C étudiée dans le paragraphe précédent consistuerait un compromis favorable, tout au moins pour le ferment 3C.

3.3 Effet de l'acidité de décaillage du yaourt brassé

3.3.1 Observation industrielle préalables

Nous avons analysé 55 couples d'observations de l'acidité Dornic et de la "Viscosité Brookfield" mesurées à la C.L.C.P. le lendemain de fabrications journalières de yaourt brassé nature pendant les mois de janvier et février 1987. Les résultats présentés sur la figure 53 font apparaitre une corrélation significative entre les deux variables (r = 0,47 ; r critique = 0,27).

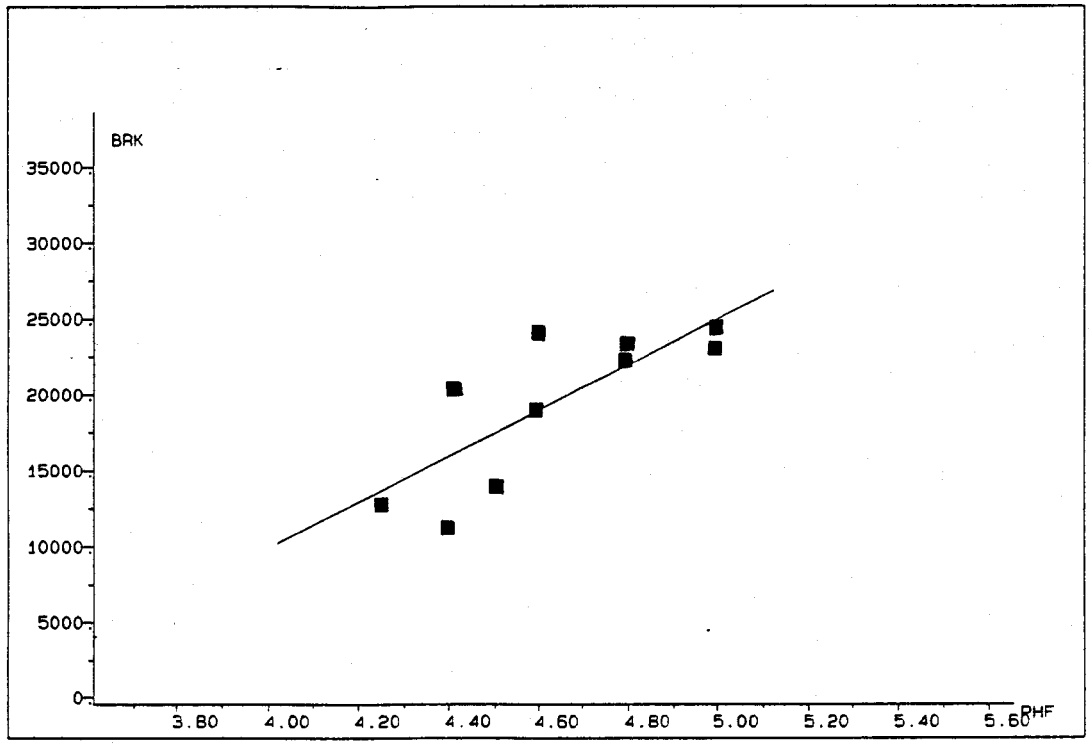


FIGURE 54 : **RELATION ENTRE "VISCOSITE BROOKFIELD" ET pH DE DE-CAILLAGE (pHF) DE YAOURTS BRASSES LISSES A CHAUD**

Série 1				Série 2			
Fermentation		Contrôle des yaourts		Fermentation		Contrôle des yaourts	
pH final	Temps	Viscosité Brookfield (cpoB)	Acidité Dornic (OD)	pH final	Temps	Viscosité Brookfield	Acidité Dornic
-	-	-	-	4.25	3 H35	12 800	147
4.40	3 H37	11 300	140	4.41	3 H02	20 600	140
4.5	3 H17	13 900	133	-	-	-	-
4.6	2 H57	19 000	128	4.6	2 H30	24 200	131
4.8	2 H23	22 700	125	4.8	2 H21	23 000	126
5.0	2 H05	23 000	116	5.0	2 H07	24 200	116

TABLEAU 47 : **VISCOSITE BROOKFIELD ET ACIDITE DORNIC APRES 7 JOURS DE STOCKAGE DE YAOURTS BRASSES ARRETES A DIFFERENTES ACIDITES FINALES, LISSES ET CONDITIONNES A CHAUD.** (l'acidité d'arrêt est exprimé en unités pH, des données internes SODIMA établissent qu'une variation de 0.1 pH correspond à une variation d'envi-7°D).

Cependant, cette évolution parallèle ne suffit pas pour dire que l'augmentation d'acidité explique à elle seule l'augmentation de viscosité ; en effet, l'erreur résiduelle de la régression (sr = 1470 cpoB) est nettement supérieure à l'aléa de mesure, de la "Viscosité Brookfield" (sm = 500 cpoB).

Les variations de la "Viscosité Brookfield" non expliquées par l'acidité sont donc encore très importantes. Il faut remarquer de plus que les différences d'acidité analysées par cette étude ne correspondent pas nécessairement aux différences d'acidité de fermentation en cuve ; en effet, les conditions de refroidissement après mise en pot, les différences de postacidification dues aux ferments sont des aléas parmi d'autres qui affectent les valeurs d'acidité mesurées 1 jour après le conditionnement. Nous avons donc entrepris une étude plus précise à l'échelle laboratoire.

3.3.2 Etude au laboratoire de l'influence de l'acidité de fin de fermentation

. Première étude : Effet isolé de l'acidité, décaillage à chaud

Deux séries de fermentation par un levain 12 M ont d'abord été réalisé à l'échelle laboratoire, selon les conditions générales précédemment détaillées. Pour chaque série, 5 acidités de fin de fermentation différentes ont été choisies. Les résultats montrent, tableau **47**, que les acidités correspondantes des yaourts sont en relation linéaire avec les acidités de fin de fermentation et surtout qu'un pH final plus acide entraine une "Viscosité Brookfield" diminuée du yaourt qui était lissé et conditionné à chaud (40°C).

Bien qu'un ajustement linéaire soit significatif (une variation de -0.1 pH se traduirait en première approche par une diminution de - 1500 cpoB), il semble préférable de considérer que la perte de "viscosité" est plus sensible au delà de pH 4.6, figure **54**.

		ACIDITE FINALE (pH/°D)	
		4.65/95	4.40/111
TEMPERATURE DE LISSAGE	20	7200	7800
	43	16800	13200

TABLEAU 48 : **EFFETS DU pH FINAL ET DE LA TEMPERATURE AU MOMENT DU LISSAGE SUR LA VISCOSITE BROOKFIELD DU YAOURT BRASSE**

Ces résultats peuvent sembler de prime abord en opposition apparente avec les observations industrielles réalisées plus haut, confrontés aux données bibliographiques, ils paraissent contredire les observations de MARTENS (1972), de BOTTAZI (1976) mais vont dans le sens de GROUX (1973). Nous avons alors voulu croiser cette influence du pH final avec celle de la température à laquelle le caillé lactique subi les traitements mécaniques.

. deuxième partie : l'effet de l'acidité dépend de la température de décaillage

Les deux facteurs de variations retenues étaient le pH final, sur la base des essais précédents, nous avons choisi 4.65 (soit environ 95°D) et 4.40 (environ 111°D), et la température au moment du traitement de lissage, fixée soit à 20°C soit à 43°C. La structure des essais réalisés sous forme de plan d'expérience au stade pilote et l'introduction d'un aléa de procédé égal à 610 cpoB, (voir paragraphe III.1) permet de quantifier les effets du pH, de la température de lissage et de leur interaction avec une confiance respective de 87 %, 99 % et 92 %.

L'effet du pH final est alors égal à - 750 cpoB, celui du lissage à + 3750 cpoB et l'interaction, significative, vaut - 1050 cpoB.

Ceci peut être représenté par le tableau 48 qui fait apparaitre :

Lors du traitement mécanique à chaud, une acidité plus élevée du caillé se traduit effectivement par une diminution de la "Viscosité Brookfield".

Mais si le traitement du caillé est réalisé plutôt à 20°C, alors l'effet du pH de fin de fermentation s'inverse et l'acidité s'accompagne d'une augmentation, mais beaucoup plus faible de la "Viscosité Brookfield".

3.3.3 Discussion

Il semble donc que l'influence de l'acidité en fin de fermentation ne soit pas un facteur déterminant sur la "Viscosité Brookfield" si le procédé de fabrication du yaourt brassé implique un refroidissement rapide du caillé, ceci explique les variations relativement faibles en conditions industrielles, même si la tendance est néanmoins à l'augmentation de la "Viscosité Brookfield" du yaourt brassé quand le caillé est plus acide en fin de fermentation.

Par contre, l'interprétation de l'effet négatif de l'acidité de décaillage sur la "Viscosité Brookfield" lors d'un traitement à 40°C est plus délicate et fait intervenir le traitement mécanique. Quand le caillé "chaud, peu acide" subi un traitement mécanique, l'acidification se poursuit après dans le pot et la viscosité continue à évoluer. "La texture a le temps de continuer à se reformer". Quand le caillé "déjà acide" et "plus épais en cuve" subi le traitement mécanique à chaud, "la texture a plus de mal à se reconstituer", un des résultats en est une viscosité Brookfield après 7 jours plus faible.

En tout état de cause, cette série d'étude relativise l'importance de l'acidité finale dans la cuve de maturation et tend à montrer toute l'importance des traitements technologiques appliqués sur l'évolution postérieure du yaourt brassé.

3.4 Conclusion

Le travail mené pour quantifier le rôle du ferment sur la texture du yaourt brassé a été volontairement entrepris au stade industriel compte tenu d'un aléa de procédé qui a été estimé. En effet, nombreux sont les travaux bibliographiques qui concluent à un effet important de la souche ou du ferment sur la texture mais en conditions de laboratoire, où les traitement mécaniques post-fermentation sont quasi-inexistants.

FACTEURS DE VARIATION	VISCOSITE BROOKFIELD (cpoB)
. Ferment : KA 68/CLCP	+ 2000 cpoB
. Température de Fermentation (ferment 3C)	
41°C/43°C	+ 1800 cpoB
30°C/43°C	- 8000 cpoB
. Acidité finale (ferment 12M)	
à 40°C : - 0.1 pH	- 1500 cpoB
à 20°C : - 0.2 pH	+ 600 cpoB

TABLEAU 49 : **EFFET DE CERTAINES CONDITIONS DE FERMENTATION SUR LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE** (Viscosité Brookfield)

Dans nos conditions, le changement de ferment s'est traduit par des modifications importantes, de "Viscosité Brookfield" (+ 3000 cpoB) accompagnées de variations significatives de l'aspect épais de l'aspect filant.

Pour les températures de fermentation, la première série de travaux met en évidence la non linéarité du phénomène d'augmentation de la texture avec la température . Ceci s'explique par la multiplicité des phénomènes biologiques mis en jeu : T° optimales de croissance, T° optimales de production, T° optimale de symbiose, qui dépendent de la nature des souches utilisées. Remarquons que la modification des températures compatibles avec un procédé industriel non fondamentalement modifié, se traduit au mieux par une augmentation de + 1800 cpoB de "Viscosité Brookfield".

L'étude de deux températures foncièrement différentes, qui selon les données bibliographiques (SCHELLHASS, 1985 ; GIRAFFA et BERGERE, 1988) favorisent respectivement la croissance bactérienne à 43°C, ou la production de mucopolysaccharide à 30°C, a montré qu'il y avait effectivement une plus grande production de mucopolysaccharide à 30°C (ferment KA68) ; cependant, à l'aide de différents critères instrumentaux et sensoriels, nous avons montré que la texture du yaourt brassé est globalement diminuée. Notons toutefois un aspect filant et une capacité de résistance au traitement mécanique qui semblent accrus.

L'influence de l'acidité finale dans nos conditions expérimentales (ferment 12M) a montré qu'il était préférable d'arrêter la fermentation plus tôt dans le cas d'un traitement "à chaud" du caillé lactique. Cependant dans la majeure partie des procédés industriels où un refroidissement rapide a lieu immédiatement après décaillage, une acidification prolongée en cuve se traduit par une très légère augmentation de texture du produit fini (exemple : Viscosité Brookfield + 600 cpoB environ pour une variation pH de - 0.2).

Référence du lot	Niveau de prélèvement	T° au moment de du prélèvement	Viscosité Brookfield (cpoB)	Effet sur la viscosité (base 100 pour le prélèvement CF)	Acidité mesurée (degré Dornic)
CF	Cuve de fermentation (3000 l) acidité finale 112°D	43°C	35300	100	134
P1	Après la pompe de décaillage "MOUVEX S4"	43°C	34200	Effet de la pompe (-3%)	139
AR	Après le filtre Avant le refroidisseur	43°C	26000	Effet du filtre (-26%)	142
PR	En sortie du refroidisseur (température 13°C)	13°C	9266	Effet du refroidisseur (-74 %)	123
S1	Dans la cuve de stockage après 1 H	16°C	10266	)Effet du)stockage (-72 %))))	128
S2	Idem après 1 H45	16°C	10066		
Y	Yaourt produit fini prélevé sur la machine de conditionnement ERCA	16°C	9266	Effet de la pompe et du conditionnement (-74 %)	128

TABLEAU 50 : NIVEAUX DE PRELEVEMENTS SUR L'INSTALLATION INDUSTRIELLE ET EVOLUTION DE LA VISCOSITE BROOKFIELD DU FAIT DES TRAITEMENTS TECHNOLOGIQUES POST-FERMENTATION

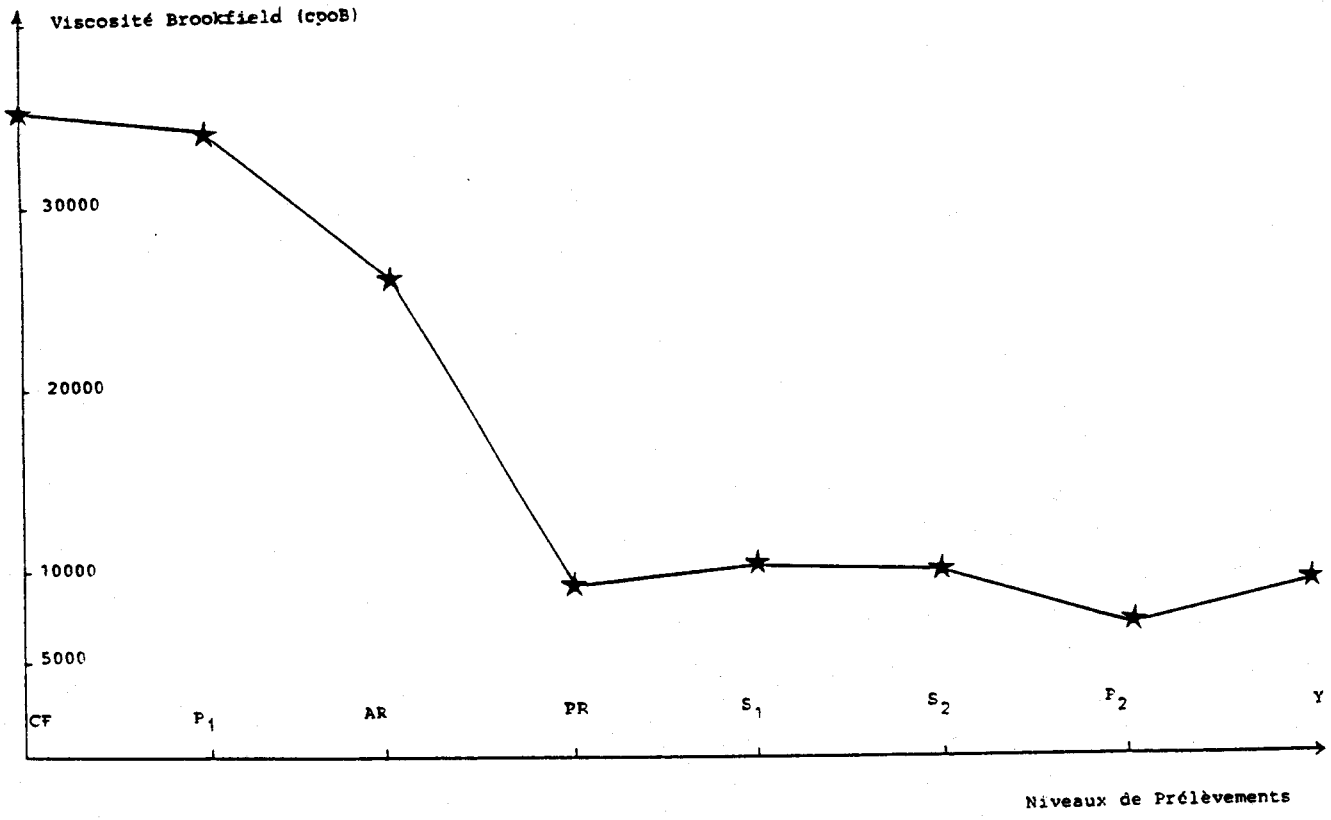


FIGURE 55 : REPRESENTATION DE LA PERTE DE "VISCOSITE BROOKFIELD" DU FAIT DES TRAITEMENTS INDUSTRIELS DE SOUTIRAGE D'UNE CUVE DE CAILLE LACTIQUE POUR YAOURT BRASSE NATURE.
Le pourcentage de perte a été calculé en prenant comme référence 100 le coagulum en cuve.

Enfin, il faut insister sur le côté relatif de ces études ; en effet, les quantifications établies l'ont été dans des conditions opératoires précises et ne peuvent être généralisables quelque soit le ferment. Elles sont donc indicatives, tableau 49, et ont d'abord pour but d'être comparées aux effets des matières premières et des traitements technologiques.

4.- INFLUENCE DES OPERATIONS TECHNOLOGIQUES POST-FERMENTATION

4.1 Observations industrielles de la "diminution de texture"

L'objectif de l'étude était d'apprécier dans les conditions industrielles de fabrication les pertes de texture qui interviennent depuis la fin de fermentation en cuve jusqu'au yaourt conditionné, du fait des différents traitements mécaniques subis par le coagulum.

4.1.1 Méthodologie

Le caillé aux différents niveaux a été prélevé dans un seau de 10 l. Les différents points et conditions de prélèvements sont reportés dans le tableau 50. Après un temps identique (30 mn) chaque seau est conditionné en pots de 125 g. Les pots sont stockés en chambre froide à 7°C pendant 18 H. Le lendemain, 3 pots de chaque lot sont placés en chambre froide à 10°C avant la mesure au viscosimètre BROOKFIELD (l'acidité est contrôlée sur 1 des pots). Les caractéristiques rhéologiques étant déterminées sur 2 autres pots.

4.1.2 Résultats et Discussion

La figure 55 visualise les pertes de "Viscosité Brookfield" du fait de différents traitements technologiques.

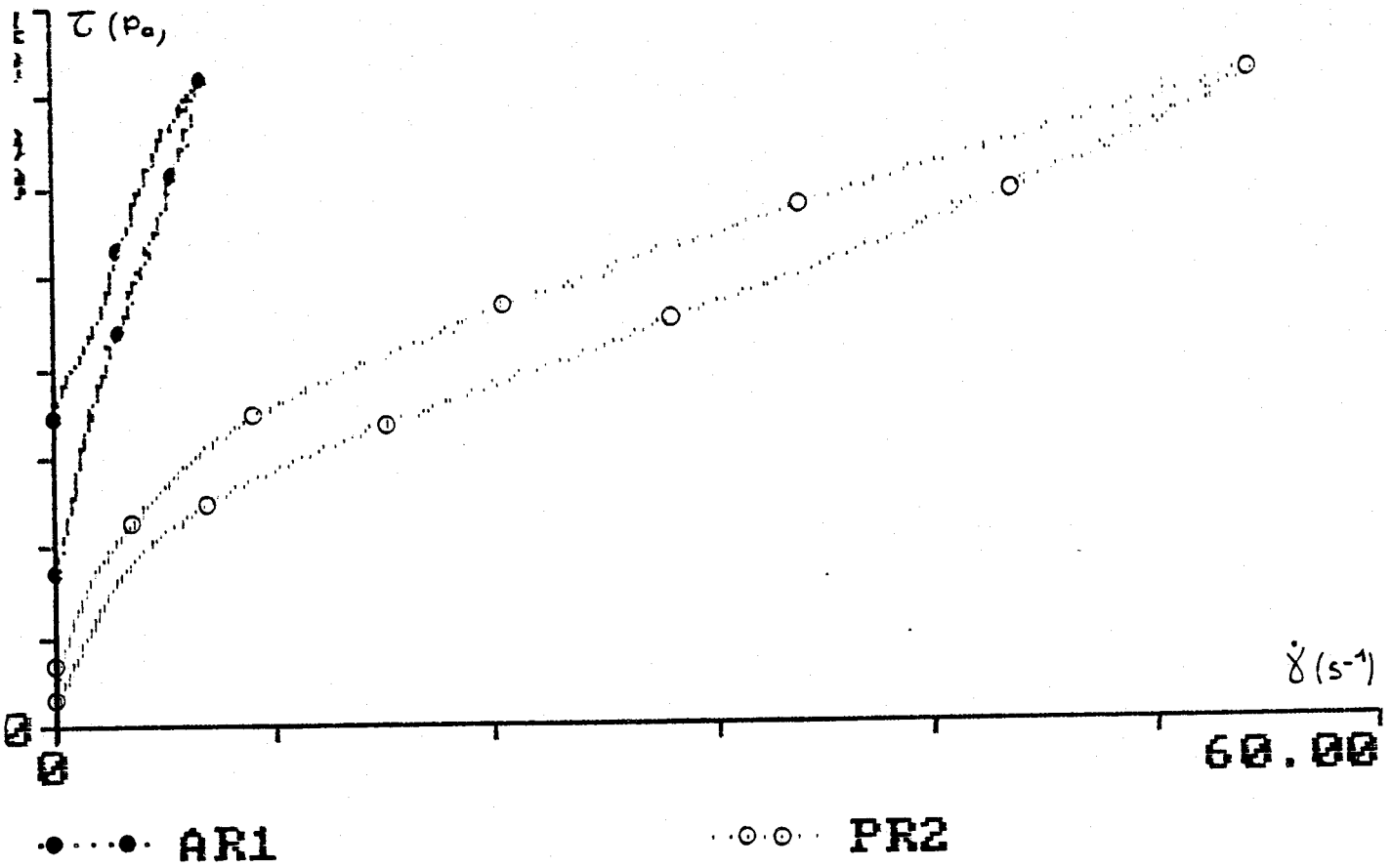


FIGURE 56 : RHEOGRAMMES OBTENUS SUR LES ECHANTILLONS CORRESPONDANT AUX PRELEVEMENTS AVANT REFROIDISSEUR (AR1) ET APRES REFROIDISSEUR (PR2)

Référence du Point de Prélèvement	CARACTERISTIQUES RHEOLOGIQUES					
	SEU		VPL		ST	
	Pa	%	mPa.s	%	$Pa.s^{-1}$	%
CF	9,5	100	8232	100	20	100
P1	6,8	77	7251	88	20	100
AR	15,8	167	3202	39	34	172
PR	2,4	23	624	7,5	163	1118
S1	4,2	43	1002	12	88	784
S2	2,4	31	821	10	163	962
Y	2,4	21	492	6	245	1362

TABLEAU 51 : EXPRESSION DES PERTES DE TEXTURE EN FONCTION DES TRAITEMENTS TECHNOLOGIQUES SUBIS PAR LE CAILLE LACTIQUE

Remarque :
Les chiffres portés sont sont exprimés en unités internationales, ou en unités arbitraires (base 100 correspondant au prélèvement CF).

La perte apparait très importante surtout au niveau du refroidisseur (- 74 %), le caillé lactique lors du passage dans les plaques est refroidi de 43°C à 13°C et subit en même temps un laminage important. En définive, la "Viscosité Brookfield" du yaourt brassé conditionné est 4 fois inférieure à celle du coagulum en cuve.

A noter que l'observation des yaourts après les traitements successifs montre que le coagulum lactique encore un peu granuleux en cuve est tout à fait lisse une fois conditionné.

. Les renseignements apportés par l'étude des caractéristiques rhéologiques confirment l'effet du refroidisseur en tant que traitement fortement destructif du coagulum lactique, figure 56, mais il apparait aussi que la destruction peut s'apprécier différemment selon le critère rhéologique considéré, tableau 51. Le seuil d'écoulement est réduit d'environ un quart tandis que la surface de thixotropie est multipliée par 13 et la viscosité plastique du yaourt conditionné est 16 fois inférieure à celle du coagulum lactique en cuve.

Ces travaux nous permettent donc de quantifier les différents niveaux industriels de dégradation de texture ; ils précisent les données avancées par TAMIME et ROBINSON (1985, p. 185) qui ne constituaient qu'une approche globale du traitement technologique.
Ainsi se confirme la notion de résistance aux traitementsmécaniques post-fermentation et il semble que la surface de thixotrope comme la viscosité plastique soient des indicateurs rhéologiques très sensibles à ces effets technologiques.

4.2 Effet de la température en sortie du refroidisseur

Nous avons vu que la perte de texture est importante au niveau du refroidisseur, il s'agit maintenant de montrer la relation qui existe entre la température de sortie du refroidisseur et la texture finale du yaourt brassé nature, sans négliger l'acidité Dornic.

REF. DU LOT	1	2	3	4	5	6	7
T° de sortie + 2°C	40	35	26	18	13	05	14
Ordre de sortie du refroidisseur	1	6	2	3	4	5	7
Acidité avant mise en chambre froide (°D)	112	109	107	107	104	105	104

TABLEAU 52 : INFLUENCE DES TEMPERATURES EN SORTIE DU REFROIDISSEUR

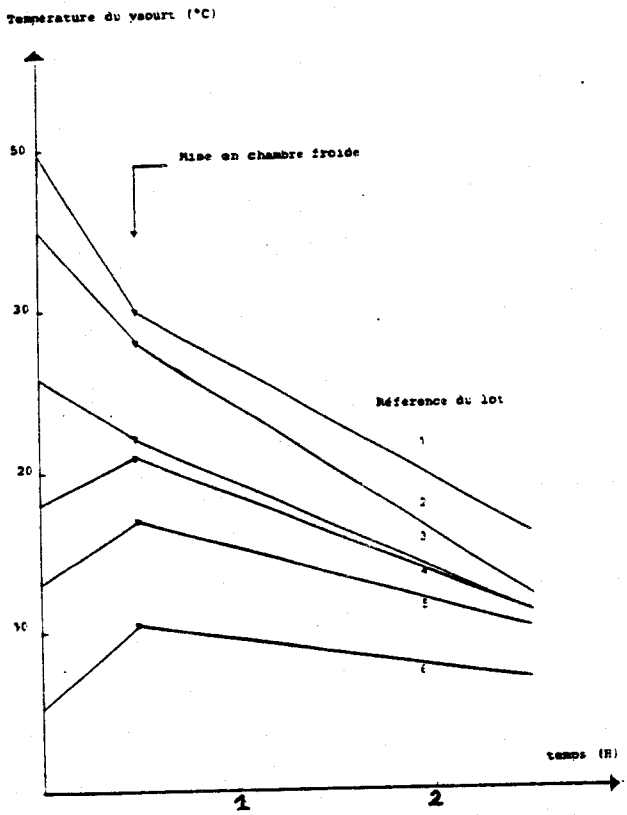


FIGURE 57 : VITESSE DE REFROIDISSEMENT DES 6 LOTS DE YAOURTS SORTIS A DIFFERENTES TEMPERATURES DU REFROIDISSEUR

4.2.1 Méthode utilisée

Le caillé lactique est prélevé dans l'atelier Molière de la C.L.C.P. après la pompe de soutirage juste avant le refroidisseur (température 42°C) puis est envoyé dans le refroidisseur pilote. La température en sortie refroidisseur est régulée par l'eau de ville ou l'eau glacée, les lots de yaourts sont prélevés à la température choisie. Après 30 mn d'attente, les lots sont conditionnés manuellement et mis en chambre froide ventilée, l'acidité est contrôlée ainsi que la température. On mesure aussi la température 2 heures après le refroidissement ainsi que l'acidité.

Les températures de sortie sont notées sur le tableau 52. La régulation de la température en sortie du refroidisseur est telle qu'il faut considérer un écart de + ou - 2° C de la valeur fixée. Ainsi, les lots de yaourts correspondants aux températures 13°C et 14°C seront considérés comme la répétition d'un même essai. L'écart-type entre les moyennes des mesures réalisées sur ces 2 lots estime donc la répétabilité du procédé. Tous les yaourts sont analysés à J + 5.

4.2.2 Résultats

4.2.1.1 Vitesse de refroidissement comparée

Compte tenu des températures différentes, les cinétiques de refroidissement sont affectées puisque tous les lots de yaourts sont placés dans la mêm chambre ventilée, figure 57.

4.2.2.2 Viscosité Brookfield

Les résultats sont représentés sur la figure 58. L'aléa due au procédé est égal à 1370 cpoB. Il apparait clairement que la "Viscosité Brookfield" chute quand la température en sortie diminue. Cette relation est linéaire, l'ajustement de la régression est satisfaisant et l'on peut donc quantifier qu'une augmentation de 10°C de la température en sortie de refroidisseur entraine un gain de 2820 cpoB.

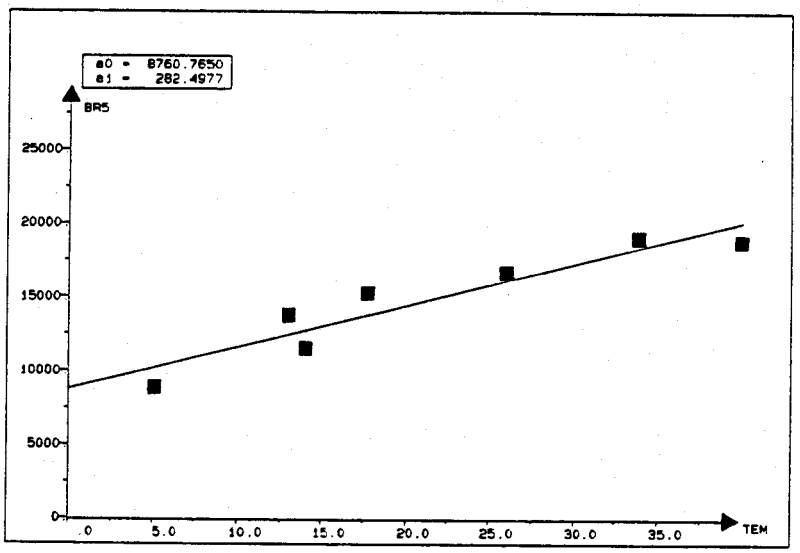


FIGURE 58 : INFLUENCE DE LA TEMPERATURE EN SORTIE DU REFROIDISSEUR SUR LA "VISCOSITE BROOKFIELD" DU YAOURT BRASSE

Température de sortie du yaourt (°C) / Caractéristiques rhéologiques	40	34	26	18	14	05	14	Pourcentage de Confiance dans la relation linéaire entre X et Y
BRK Viscosité Brookfield (cpoB)	18750	19000	16450	15300	11650	8750	13800	99 %
SEU Seuil d'écoulement (Pa)	14.3	15.4	11.4	11.1	11.9	6.1	9.6	97 %
VPL Viscosité plastique (mPa.s)	1698	2230	1574	1966	1491	870	1839	85 %
S.T. Surface de thixotropie ($Pa.s^{-1}$)	64	53	77	62	77	-	62	50 %
K Coefficient de consistance ($Pa.s^{n}$)	13.7	13.67	13.06	13.14	12.79	9.07	12.8	94 %
n Indice d'écoulement (-)	0.38	0.434	0.369	0.396	0.368	0.382	0.389	52 %
°D Acidité (°D)	125	12	119	119	118	113	114	99 %

TABLEAU 53 : INFLUENCE DE LA TEMPERATURE DE SORTIE DU REFROIDISSEUR SUR LES CARACTERISTIQUES RHEOLOGIQUES ET L'ACIDITE DU YAOURT BRASSE NATURE

T° sortie (°C)	40	26	14	05
Note texture épaisse en pot	4.58	4.20	3.78	3.21
	4.39		3.49	
Note texture épaisse en bouche	4.54	4.46	3.83	3.52
	4.50		3.67	

TABLEAU 54 : EVALUATION SENSORIELLE DE 4 LOTS DE YAOURTS BRASSES OBTENUS SELON DIFFERENTES TEMPERATURES DE PASSAGE AU TRAVERS D'UN REFROIDISSEUR A PLAQUES

4.2.2.3 Evolution des caractéristiques rhéologiques

Elles sont présentées dans le tableau 53. Seuls le seuil d'écoulement indicateur de la plasticité des yaourts brassés et le coefficient de consistance K varient linéairement en fonction de la température de sortie du refroidisseur. On retrouve la relation suivante : plus la température de sortie augmente, plus le coefficient de consistance et le seuil d'écoulement augmentent. En ce qui concerne la viscosité plastique, son augmentation linéaire en fonction de la température de sortie ne peut être acceptée qu'avec une confiance de 85 %.

Par contre, il n'y a pas de relation satisfaisante entre la température et l'indice d'écoulement n, indicateur du type d'écoulement du yaourt, pas de relation linéaire non plus avec la surface de thixotropie.

4.2.2.4 L'évaluation sensorielle

Elle met en évidence une absence de variation de l'aspect filant entre les essais, par contre pour l'aspect épais, on obtient par typologie, 2 classes de yaourts, les plus épais sont ceux sortis à 40°C et 26°C du refroidisseur, les moins épais sont ceux sortis à 14 et 05°C.

Remarque : Lors de cette étude, nous avons pu montrer qu'il existe aussi une relation linéaire entre l'acidité des yaourts et la température de sortie du refroidisseur, du point de vue qualité du yaourt, cet effet est antagonique de l'effet texture. Il convient de rechercher un compromis, voir annexe 10.

4.2.3 Discussion

Il apparait donc que pour une configuration établie d'un refroidisseur à plaque pour yaourt brassé, l'effet de la température de sortie se traduit par une augmentation linéaire de la viscosité (+ 200 mPa.s) et de la plasticité (+ 2 Pa) du yaourt obtenu.

Ceci se traduit aussi par un coefficient de consistance (+ 0.9 Pa) et un aspect épais (+0.4/5 en pot) plus élévé quand la température de sortie est de 10°C plus élevée. Par contre, la variation de température semble n'affecter ni le comportement rhéofluidifiant du yaourt ni son caractère thixotrope. Enfin, l'aspect filant des yaourts n'est pas jugés sensoriellement différent. Ces résultats confirment en les précisant les travaux de HYLMAR (1974) qui retenait la température de 30°C, plutôt que 20°C, 13°C et 5°C, ils vont aussi dans le sens de la préconisation de ANON (1977) qui proposait un palier de température à 25°C avant conditionnement.

Ils établissent donc de façon très claire qu'il y a tout intérêt si l'on doit laminer le yaourt brassé, à appliquer la température la moins basse possible.

4.3 Effet d'un stockage intermédiaire du yaourt brassé entre le refroidisseur et la machine de conditionnement

Dans un procédé industriel de fabrication, le yaourt brassé une fois passé à travers l'échangeur pour être refroidi, subi le plus souvent, du fait soit de l'ajustement des débits, soit par arrêt accidentel de la machine de conditionnement, un stockage intermédiaire en cuve. L'étude réalisée devait contribuer à répondre à la question suivante :

Du point de vue texture du produit fini, sans omettre la postacidification, est-il préférable de conditionner tout de suite le coagulum ou au contraire de le laisser reposer avant conditionnement ?

4.3.1 Méthode utilisée

L'essai a été réalisé en prélevant par un robinet spécialement aménagé, 10 kg de yaourt brassé nature sur la chaine de fabrication de l'atelier C.L.C.P. Molière, après la pompe de soutirage. Le yaourt dont la température au moment du prélèvement était de 19°C a été divisée en 2 lots qui ont subi le même traitement de lissage à l'échelle laboratoire, mais à 2 temps différents.

Temps d'attente du yaourt brassé à 20°C Caractéristiques rhéologiques unités	0	2H30	5 H	Différence significative compte tenu des aléas de mesure
Seuil d'écoulement (Pa)	4.47	7.15	7.15	OUI
Viscosité plastique (mPa.s)	269	279	413	OUI
Surface de thixotropie (Pa.s)	265	320	193	NON
Coefficient de consistance ($Pa.s^n$)	3.75	5.77	7.71	OUI
Indice d'écoulement (-)	0.45	0.369	0.35	OUI

TABLEAU 55 : **EVOLUTION DU YAOURT BRASSE STOCKE A 20°C**

Référence du lot Caractéristiques des yaourts	LOT N°1	LOT N°2
Température au moment du lissage	19°C	20°C
Acidité au moment du lissage	107	108
Viscosité Brookfield (cpoB)	4750	3300
Acidité (°D)	122	125
Seuil d'écoulement (Pascal)	2.4	1.4
Thixotropie (Pa.s -1)	794	1085
Viscosité plastique (mPa.s)	129	35
Coefficient de consistance ($Pa.s^n$)	6	4.3
Indice d'écoulement	0.307	0.336

TABLEAU 56 : **CARACTERISTIQUES COMPAREES DES 2 LOTS DE YAOURTS BRASSES**

Le lot n°1 a subi un lissage immédiat, un conditionnement puis refroidissement et stockage dans une chambre froide à 8°C non ventilée (CF8).

Le lot n°2 est resté en attente 5 heures à température ambiante (20°C) puis a été lissé, mis en pot, refroidi et stocké dans CF8.

Les contrôles des yaourts, selon les méthodes indiquées ont été effectués à J + 15. Corollairement, nous avons essayé de quantifier la prise de texture du yaourt en temps réel, lors de son stockage entre soutirage et conditionnement.

4.3.2 Résultats et analyses

Etude de l'évolution de texture du yaourt brassé stockée à 20°C

Sur le yaourt prélevé en usine, nous avons suivi l'évolution des caractéristiques rhéologiques lors du stockage à température ambiante (20°C).

La première série de mesures a été faite immédiatement après prélèvement, puis les 2ème et 3ème après 2 H30 et 5 H d'attente. Les résultats figurent dans le tableau 55, il s'en dégage les éléments suivants :

- le seuil d'écoulement de la pâte augmente pendant les 2 premières heures de stockage pour se stabiliser ensuite.

- l'augmentation de viscosité plastique est plus tardive entre 2 h30 et 5 H.

- le coefficient de consistance augmente régulièrement et fortement pendant le stockage intermédiaire à 20°C.

- l'indice d'écoulement diminue, c'est-à-dire que le yaourt brassé tend à être de moins en moins "newtonien".

Caractéristiques rhéologiques	Instant de contrôle du yaourt brassé	Référence du lot de yaourt	
		n°1: lissage immédiat	n°2: lissage après 5 H
Seuil d'écoulement (Pa)	mesure avant lissage mesure J + 15	4.47 2.14	7.15 1.43
Viscosité plastique (mPa.s)	a.L. J + 15	269 129	413 35
Surface de thixotropie	a.L. J +15	265 794	193 1085
Indice n (-)	a.L. J + 15	0.45 0.307	0.35 0.336
Coefficient de consistance K ($Pa.s^n$)	a.L. J + 15	3.75 5.99	7.71 4.3

TABLEAU 57 : **EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES RHEOLOGIQUES DU YAOURT BRASSE APRES 5 H DE STOCKAGE A 20°C ET CONTROLE DU YAOURT 15 JOURS APRES LISSAGE**
(a.L = mesure réalisée à Jo avant lissage ;
J + 15 = mesure réalisée après 15 jours de fabrication).

Caractéristiques des 2 lots de yaourts à J + 15

Les valeurs de texture portés dans le tableau 56 sont dans l'ensemble faibles, mais il faut rappeler que la pâte a subi un traitement mécanique plutôt amplifié par rapport à la réalité industrielle (prélèvement par un robinet en dérivation, lissage postérieur au laboratoire).

Cela dit, on observe clairement les effets suivants :

- Caractéristiques rhéologiques

L'ensemble des données concordent et mettent en évidence que le traitement immédiat de la pâte détruit moins la texture qu'un traitement différé.

- Viscosité Brookfield

Les différences sont significatives, et il apparait nettement que la viscosité la plus élevée est obtenue pour le traitement mécanique effectué sans temps de repos.

Enfin, la différence d'acidité DORNIC entre les 2 lots n'est pas significative.

4.3.3 Discussion

L'analyse comparée des résultats obtenus permet de dresser le tableau 57. Ainsi, il apparait que le yaourt brassé dont la texture s'est reprise 5 H après soutirage et refroidissement possède des caractéristiques rhéologiques révélatrices d'une texture plus fragile, le seuil d'écoulement, la viscosité plastique et le coefficient de consistance sont plus faibles ; la surface de thixotropie et l'indice d'écoulement augmentent.

Nous retiendrons qu'il y a effectivement reprise de consistance du coagulum une fois soutiré, lors de son stockage intermédiaire avant conditionnement, mais que la texture du yaourt mesuré à J + 15 est augmentée si le yaourt est conditionné immédiatement après soutirage.

COEFFICIENT de variation de la méthode de mesure	Grandeurs rhéologiques	Valeur initiale	Valeur 7 h après le début du refroidissement	Valeur après 24 h	Valeur à J+4	Valeur à J+7	Valeur à J+23	Test de la différence entre J+1 et J+4	Test de la différence entre J+4 et J+23
5 %	BRK	58	91	100	130	126	135	OUI	NON
5 %	SEV	19	28	100	119	143	128	NON	NON
8 %	VPL	70	72	100	162	205	201	OUI	NON
10 %	ST	97	107	100	77	57	49	NON	OUI
3 %	K	58	82	100	131	152	137	OUI	NON
3 %	n	120	93	100	92	86	94	NON	NON

TABLEAU 58 : **COMPARAISON DE L'EVOLUTION DES DIFFERENTES GRANDEURS RHEOLOGIQUES PENDANT LE REFROIDISSEMENT ET LE STOCKAGE**

(Les résultats sont exprimés en unités arbitraires base 100 égale aux valeurs obtenues 24 heurs après conditionnement soient 9600 cpoB pour BRK ; 10 Pa pour SEU ; 391 mPa.s pour VPL ; 242 $Pa.s^{-1}$; 10.04 $Pa.s^{n}$ pour K ; 0.301 pour n). Les tests de comparaison ont été fait selon Student α = 5 %.

4.4 Evolution de la texture pendant le refroidissement et le stockage du yaourt brassé

4.4.1 Méthode utilisée

Les yaourts brassés nature conditionnés à 16°C en pots de 125 g ont été prélevés sur la machine de conditionnement de l'atelier ROUSSEAU de la C.L.C.P.

4.4.2 Résultats

. Evolution de la "Viscosité Brookfield"

En ce qui concerne la "Viscosité Brookfield", lors du refroidissement, il y a augmentation de plus de 40 % de la Viscosité Brookfield puis l'augmentation est de30 % pendant les 4 premiers jours de stockage. Ensuite, il n'y a plus de variation significative de la viscosité Brookfield puisque l'on retrouve 13000 cpoB après 23 jours.

. L'évolution de l'ensemble des caractéristiques rhéologiques est schématisée sur le tableau 58

Il apparait une fois de plus que selon la caractéristique rhéologique utilisée, les évolutions sont différentes. Nous avons, en résumé, les variations suivantes :

TRAITEMENT / TEXTURE	EFFET DU REFROIDISSEMENT (Jo à J + 1)	EFFET DU STOCKAGE (de J+1 à J+23)
Plasticité	augmentation (x5)	légère augmentation
Viscosité	augmentation (+ 30 %)	augmentation
Surface de thixotropie	pas de variation	diminution -50 %
Coefficient de consistance	augmentation (+ 40 %)	augmentation + 37 %
"Indice d'écoulement	diminution (- 20 %)	pas de variation

4.4.3 Discussion

Rappelons que dans un yaourt, le métabolisme bactérien est toujours actif et dépendant des variations de températures subies par le produit. Par ailleurs, GANCEL, 1988, a montré que la phase de production du polysaccharide par S. thermophilus était un métabolisme secondaire dépendant de la température.

Pour notre part, du point de vue texture nous observons :
Au cours du refroidissement, l'évolution du yaourt se traduit par un comportement de plus en plus rhéofluidifiant, accompagné d'une augmentation des caractéristiques de plasticité et de viscosité, ceci fait penser à une augmentation d'interactions fortes entre les composants structuraux du yaourt brassé qui peuvent aller de pair avec l'apparition d'éléments responsables d'une structure plus ordonnée ; il y aurait évolution d'une structure dispersée vers une structure plus continue, plus liée.

Au cours du stockage, la plasticité n'augmente que légèrement, en absence de contrainte, le yaourt brassé possède un aspect quasi-définitif mais ses propriétés d'écoulement continuent à se modifier. En effet, sa viscosité et la consistance augmentent surtout pendant les 4 premiers jours (cette observation avait déjà été faite par KURMAN (1969,c)). Ceci peut être attribué à une solidification progressive du réseau protéique qui peut être favorisée par la postacidification continue du milieu mais aussi à des interactions plus fortes avec d'autres composés structuraux dont un polysaccharide bactérien. Le comportement de plus en plus thixotrope du yaourt brassé qui signifie une résistance accrue à la destructuration milite en ce sens.

Enfin, il faut mentionner que cette étude d'évolution de la texture du yaourt brassé nature a été effectuée sur une seule fabrication de la C.L.C.P. mettant en oeuvre un type de ferment (KA68).

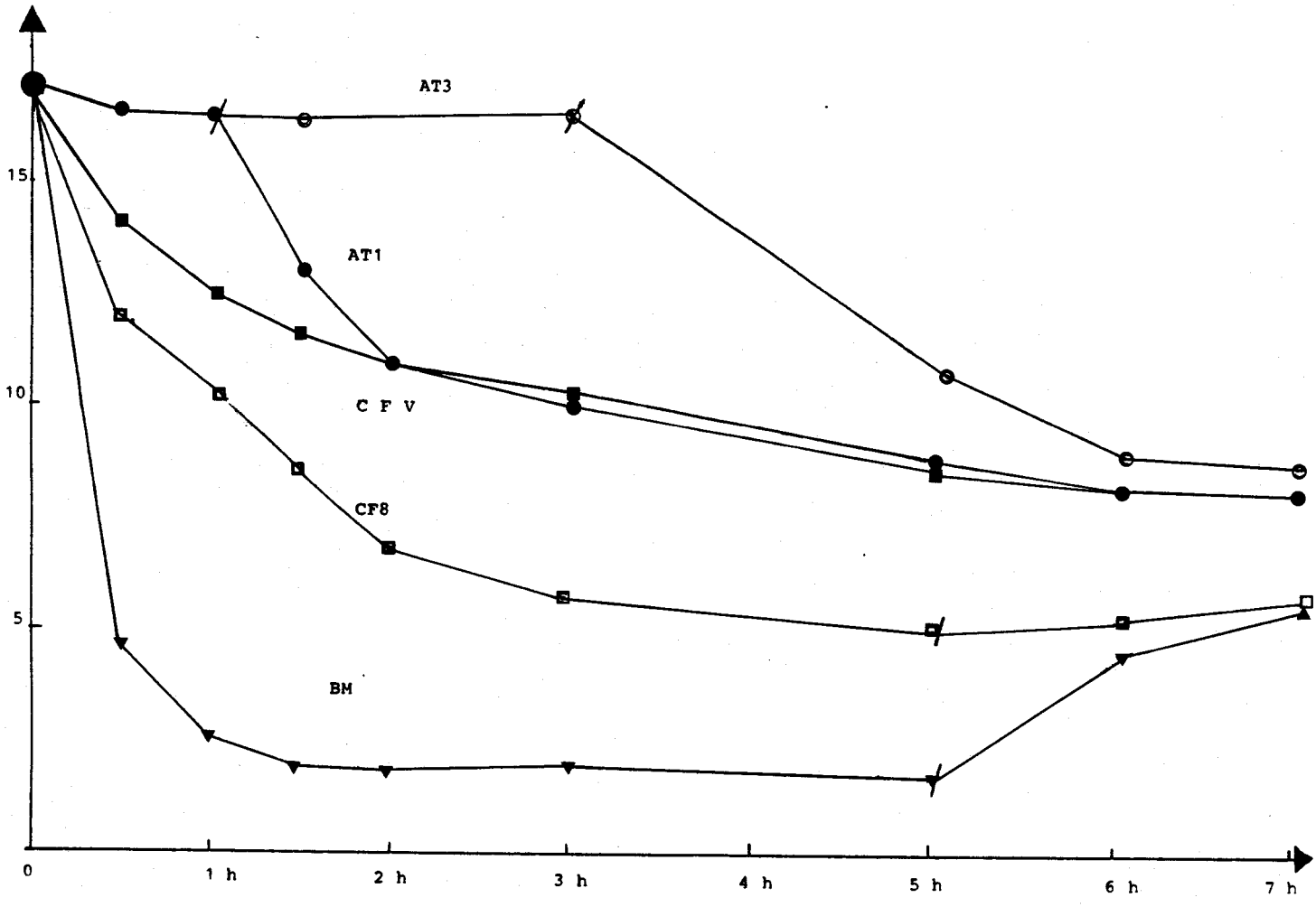


FIGURE 59 : **INFLUENCE DE LA VITESSE DE REFROIDISSEMENT SUR LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE : DIFFERENTES CINETIQUES ETUDIEES** : AT3 = 3 h d'attente à 17°C avant mise en chambre froide, CF8 = chambre froide 8°C, CFV = chambre froide ventilée, BM = bain marie d'eau glacée

Elle a donc une portée limitée. Néanmoins, elle permet déjà de comparer les évolutions respectives de texture et d'acidité, elle permet aussi de distinguer, en prenant appui sur les critères rhéologiques, différentes phases de formation de la texture.

4.5 Effet de la cinétique de refroidissement du yaourt brassé conditionné

4.5.1 Méthode utilisée

Le yaourt brassé utilisé pour cette étude a été fabriqué en conditions industrielles à partir du ferment KA 68 ; il est prélevé, conditionné en pots de 125 g à la température de 17°C, sur une machine ERCA de l'atelier de la C.L.C.P., puis est refroidi selon 5 conditions différentes (figure 59). Nous pouvons retenir comme indicateur simple de la cinétique de refroidissement, la température contrôlée dans le pot de yaourt 2 heures après le conditionnement. Après 18 H, les 5 lots sont placés en chambre froide de conservation, les contrôles des lots sont effectués quatre jours après la fabrication.

4.5.2 Résultats

Ils sont reportés dans le tableau 59. L'on peut noter que l'effet d'un refroidissement de plus en plus lent du yaourt brassé nature n'affecte pas de façon égale toutes les caractéristiques rhéologiques :

Ainsi, le seuil d'écoulement et la surface de thixotropie ne varient pas de façon significative. Par contre, la viscosité plastique augmente quand le refroidissement est plus lent ou différé, figure 60. Le coefficient K et l'indice n ont aussi tendance à augmenter avec la vitesse de refroidissement. Du point de vue perception sensorielle, cela se traduit par des yaourts à l'aspect d'autant plus épais en pot et en bouche que le refroidissement était lent (figure 60). Par contre, l'aspect filant des yaourts ne varie pas de façon significative.

Réf. yaourt	B M	CFV	CF F	AT1	AT3
Température (°C) 8 h après le conditionnement	2	6.6	11.2	11	17
Viscosité Brookfield (cpoB)	6766	8433	9283		10166
Seuil (Pa)	3.04				
VPL mPa.s Viscosité plastique	555		705		986
ST ($mPa.s^{-1}$)surface de thixotropie	166				
TEP /5 texture épaisse en pot	2.62	3.09			3.59
FIL / 5 texture filante en pot	3.10				
BEP /5 texture épaisse en bouche	3.17	3.51			3.9
BON /5 texture onctueuse en bouche	4.05				
Acidité Note d'acidité /5 Degré Dornic	2.81 - 138°D				
Goût /5 Note de Goût	3.18				

TABLEAU 59 : CARACTERISATION DE LA TEXTURE DES YAOURTS OBTENUS, APRES DIFFERENTES CINETIQUES DE REFROIDISSEMENT, LES MOYENNES NON SIGNIFICATIVEMENT DIFFERENTES ONT ETE REGROUPEES PAR TYPOLOGIE COMPTE TENU DES ALEAS DE MESURE

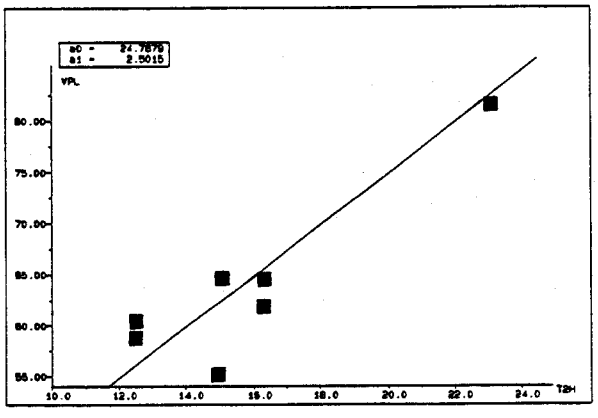


FIGURE 60 : VARIATION DE LA VISCOSITE PLASTIQUE (VPL) DU YAOURT BRASSE NATURE EN FONCTION DE LA VITESSE DE REFROIDISSEMENT APRES CONDITIONNEMENT

Enfin, la "Viscosité Brookfield" augmente linéairement en fonction de la température mesurée deux heures après conditionnement.

Remarque : Lors de ces essais où le yaourt brassé était conditionné à 17°C, ni l'acidité mesurée, ni l'acidité perçue ne sont sensibles au ralentissement du refroidissement, l'appréciation globale de goût n'était pas non plus affectée.

4.5.3 Discussion

L'activité métabolique de postacidification par les bactéries du yaourt est faible et de plus, équivalente entre les différents essais. Dans ces conditions, il apparait néanmoins des différences de texture importante entre les yaourts. Ces différences affectent surtout la viscosité plastique, et les indices K et n, descriptifs de l'écoulement du yaourt brassé. L'hypothèse est séduisante de faire le rapprochement avec une synthèse accrue de polysaccharide bactérien, par les souches de Streptococcus thermophilus présent dans le ferment KA 68. En effet, F. GANCEL (1988) a démontré que la production du polysaccharide par des clones de S. thermophilus était plus importante en milieu synthétique, lorsque la culture subissait un refroidissement progressif après la phase de croissance.

Dans le yaourt brassé conditionné, nous pouvons penser que le ralentissement du refroidissement se traduit de façon quantitative par une synthèse plus importante de polysaccharide mais aussi "qualitativement" par un renforcement de liaisons faibles d'interactions entre les macromolécules polysaccharidiques et le réseau protéique. Ce phénomène n'entrainerait pas tellement une plasticité plus forte du yaourt brassé, ni un pouvoir de thixotropie plus important, mais surtout une augmentation des propriétés visqueuses.

Opérations technologiques	Viscosité Brookfield (cpoB)	Seuil d'écoulement (Pa)	Viscosité plastique (mPa.s)	Surface de thixotropie (Pa.s)
Cisaillement et Refroidissement dans un échangeur à plaques industriel 43°C ⟶ 13°C	26000 ⟶ 9266	15.8 ⟶ 2.4	3202 ⟶ 624	34000 ⟶ 163000
Variation de Température de Refroidissement dans l'échangeur + 10°C	+ 2800	+ 2	+200	DNS
Stockage intermédiaire du yaourt (5h à 20°C)	- 1400	- 1	-100	+300
Refroidissement après conditionnement	+ 4020	+ 8	+114	DNS
Vitesse de Refroidissement plus lente après conditionnement (10°C de plus après 2 H)	+ 1733	DNS	+430	DNS
Stockage à 8°C de J+1 à J+24	+ 3000 environ	+ 3	+400	- 121

TABLEAU 60 : EFFETS DE CERTAINES OPERATIONS TECHNOLOGIQUES SUR LES CARACTERISTIQUES DE TEXTURE DU YAOURT BRASSE

DNS : données non significatives.

En définitive, par l'évaluation sensorielle, le yaourt n'est pas jugé plus filant mais plus épais. L'interprétation rhéologique et structurelle complète du phénomène reste donc à l'état d'hypothèse, sa confirmation nécessiterait un dosage en temps réel du lactate et surtout de la quantité de polysaccharide formé. Reste la relation de cause à effet entre un refroidissement plus lent et une augmentation de texture du yaourt qui trouve une application industrielle immédiate.

4.6 Conclusion

L'ensemble des études menées dans ce paragraphe souligne l'importance de la maitrise des opérations technologiques qui ont pour but de transférer le coagulum brassé de la cuve jusqu'au pot de yaourt proposé au consommateur. Ces opérations entrainent des modifications importantes de la texture du produit. La "Viscosité Brookfield" est par exemple divisée par 4. Mais toutes les composantes ne sont pas affectées de la même façon (tableau **60**).

En effet, si le cisaillement dans le refroidisseur à plaques fait chuter tout aussi brutalement la "Viscosité Brookfield" comme les trois autres grandeurs fondamentales, l'évolution peut ensuite être différente.

La plasticité du produit qui augmente lors du refroidissement en pot, ne semble dépendre en outre que des variations de température lors du cisaillement. Les autres facteurs l'affectent très peu.

La viscosité plastique est fonction des profils de températures appliquées au yaourt, aussi bien lors du refroidissement en plaques qu'après conditionnement en pot. Une cinétique lente augmentera les caractéristiques visqueuses du produit.

La surface de thixotropie, très largement affectée par le cisaillement, augmente encore un peu plus si le yaourt n'est pas conditionné rapidement après soutirage. Elle ne semble pas affectée par les variations de températures.

5.- POUVOIR TEXTURANT DE STREPTOCOCCUS THERMOPHILUS CULTIVE SUR LAIT

Les résultats obtenus précédemment, en particulier aux paragraphe III.3.1 attribuent un effet important à la nature du ferment utilisé, compte tenu des autres traitements qui influencent la texture du yaourt brassé. SCHELLHASS (1985) et CERNING et coll. (1985 et 1988) ont mis en évidence des viscosités différentes selon la souche de Streptococcus thermophilus ou de Lactobacillus bulgaricus mise en culture sur lait. Pour cette dernière espèce, les viscosités semblaient en relation avec la quantité de polysaccharide produit par la bactérie, bien que, par ailleurs, les acidités finales des cultures ne soient pas toujours équivalentes (tableau 13). En ce qui concerne les travaux sur Streptococcus thermophilus, les résultats semblent plus complexes et la culture répétée de la souche CNRZ 1066 fait surtout apparaitre une variabilité naturelle de viscosité et de synthèse de polysaccharide (CERNING, 1988).

Nous avons pour notre part, étudié ce pouvoir texturant de quelques Streptococcus thermophilus de la collection de ferments SODIMA dans des conditions de fermentation qui prennent en compte la pratique industrielle.

5.1 Variations du pouvoir texturant selon les souches de Streptococcus thermophilus

Les différentes souches ont été isolées des ferments SODIMA S7, S2, S12, S13, S22 et caractérisées comme Streptococcus thermophilus par le laboratoire de Génétique Microbienne de Caen selon les méthodes décrites par F. GANCEL, (1988).

Une souche de Streptococcus thermophilus du ferment 3C conservée au laboratoire (S3T) a été testée en comparaison avec les souches isolées par CAEN.

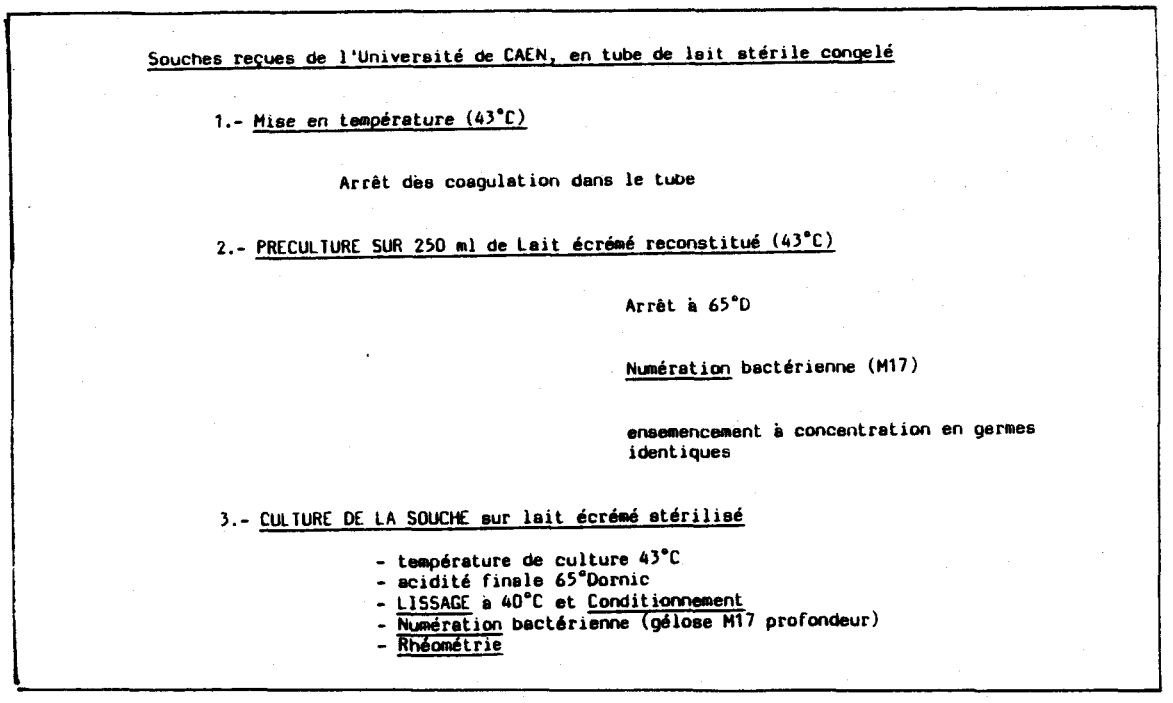


FIGURE 61 : **PROTOCOLE DE MISE EN CULTURE DES SOUCHES DE S. THERMOPHILUS POUR ETUDE DU POUVOIR TEXTURANT**

Références des souches / Caractéristiques	S7	S2 (2)	S2 (1)	S3	S3T	S13	S12	S22
% Ensemencement Concentration initiale équivalente (16.10^8 g/ml)	1.1 %	0.8 %	0.98 %	0.7 %	1 %	0.7 %	0.4 %	0.8 %
Temps de fermentation	5 H10	5 H25	5 H10	5 H15	4 H10	5 H05	5 H25	5 H25
Acidité finale	68	65	68	60	65	66	60	66
Seuil d'écoulement (Pa)	2.25	2.56	1.57	1.13	0.45	0.17	0.43	0.15
Viscosité plastique en mPa.s	2322	2008	1928	1477	281	188	175	25
Numération bactérienne x 10^7	18	18	19	27	8.2	15	32	36
"Seuil d'écoulement unitaire" Pa x 10^{-7}	0.125	0.142	0.082	0.041	0.055	0.011	0.013	0.004
"Viscosité plastique unitaire" "Pouvoir épaississant" mPa.s x 10^{-7}	129	111.5	101.5	54	34.3	12.5	5.5	0.69

TABLEAU 61 : **POUVOIR TEXTURANT COMPARE DE DIFFERENTES SOUCHES DE STREPTOCOCCUS THERMOPHILUS**
Les viscosités plastiques ont été mesurées à 36 Pa après 1 minute.

Afin de pouvoir comparer statistiquement les résultats, nous avons répété l'ensemble du protocole de mise en culture de la souche S2. Les différentes étapes de mise en culture sur lait que nous avons suivi sont exposées sur la figure 61.

Les caractéristiques des différentes cultures figurent sur le tableau 61. L'aléa du à la répétabilité du protocole de culture est estimé à 0.7 pour le seuil d'écoulement, et à 56 pour la viscosité plastique.

Compte tenu de ces aléas, il apparait des différences significatives qui ne peuvent être attribuées qu'à la diversité du pouvoir texturant des souches de S. thermophilus étudiées, les acidités finales des cultures étant équivalentes. Les caractéristiques rhéologiques rapportées au nombre de germes confirment cette observation. Ce "pouvoir texturant" se traduit par des variations de viscosité plastique beaucoup plus importantes (rapport 1 à 100) que les variations de plasticité (rapport 1 à 20). Il est propre à la souche et peut donc constituer un critère de sélection très important en vue de la fabrication de yaourt brassé de texture élevée.

Ces résultats accentuent donc les différences obtenues sans "traitement mécanique" postérieur par BOUILLANE et DESMAZEAUD (1980) qui établissaient un rapport de viscosité de 1 à 8. Ils confirment les résultats d'ANDRES (1982) et VEDAMUTHU (1982).

5.2 Variabilité clonale de production du polysaccharide de Streptococcus thermophilus sur lait et de son pouvoir texturant

5.2.1 Méthode utilisée

Les clones de S. thermophilus type 14 et 17 ont été isolés à partir de la souche S22 (ferment SODIMA) par F. GANCEL à l'Université de CAEN (GANCEL, 1988).

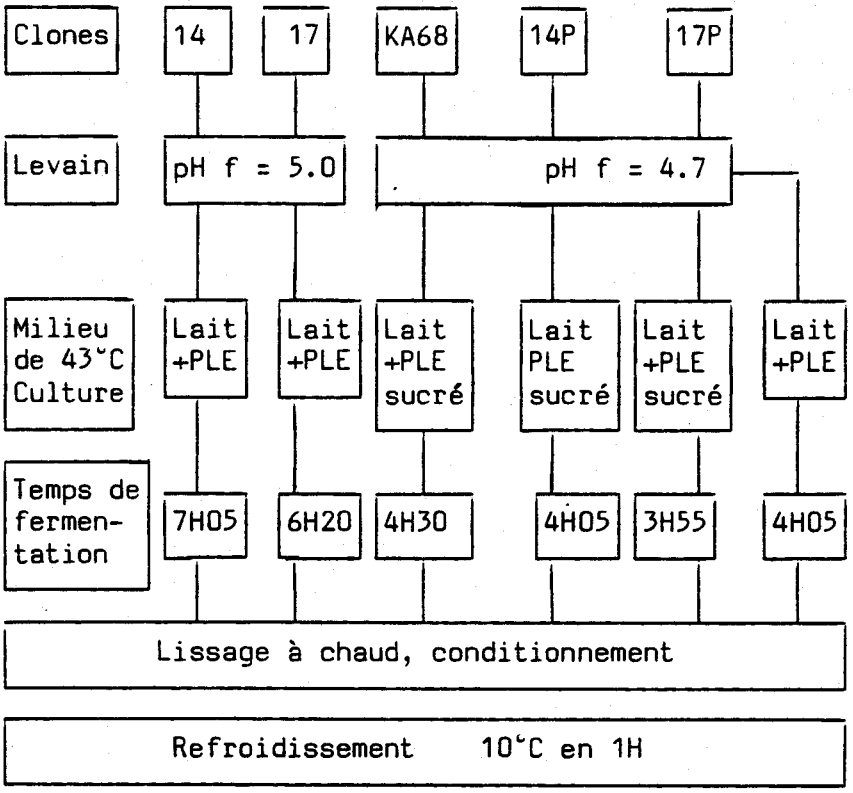


FIGURE 61b: **PROTOCOLE DE MISE EN CULTURE DES CLONES 14 ET 17 ASSOCIES OU NON AVEC LE L. BULGARICUS P. Le ferment KA68 constitue un témoin externe**
(PLE : poudre de lait écrémé ; pHF = pH final)

Types de clones	Clone 14 système Lactose	Clone 17 système saccharose
sucre de croissance bactérienne	LAC	SAC
pH initial	neutre	acide
sucre de production	SAC	LAC
T° phase stationnaire	Lac	Sac
	10°C	10°C

FIGURE 62: **METABOLISME DE PRODUCTION DE MUCOPOLYSACCHARIDE PAR LES CLONES 14 ET 17 SUR MILIEU SYNTHETIQUE (d'après F. GANCEL, 1988)**

Ils sont définis par l'auteur comme étant surproducteurs de polysaccharides sur milieu synthétique selon des métabolismes spécifiques , voir figure **62.**

Le clone de L. bulgaricus P a été associé en symbiose sur deux de ces essais. La culture 17 P sur lait sucré a été rejetée afin de pouvoir déterminer l'aléa de procédé ; enfin, le ferment KA 68 a été choisi comme témoin externe. Le protocole et l'ensemble des essais réalisés sur un même lot de lait entier pasteurisé est schématisé sur la figure **61 b .**

5.2.2 Résultats et Discussion

Les résultats sont reportés sur le tableau 61 bis. La comparaison des deux clones 14 et 17 met en évidence l'hétérogénéité clonale de production de polysaccharide sur milieu lait. Le clone 14 est deux fois plus producteur que le clone 17, on retrouve içi la différence mentionnée par F. GANCEL sur milieu synthétique (GANCEL, 1988).

- La synthèse de polysaccharide par le clone-17 est plus importante quand ceux ci ne sont pas associés au lactobacille. Or l'on remarque que le nombre total de germe et donc le taux de croissance est beaucoup moins important (20.10^7 bactéries/ml pour "17" en 6 H20 et 92.10^7 bactéries/ml pour "17P" en 4 H). On retrouve là, l'antagonisme apparent entre croissance bactérienne et quantité de mucopolysaccharide produit. Signalons en outre l'association du lactobacille qui peut avoir des conséquences sur la production de polysaccharide par S. thermophilus.

- La quantité de polysaccharide plus élevée dans la culture "17" sur lait par rapport à la culture "17 P" sur lait n'induit pas une texture supérieure. Ceci parait tout à fait évident lorsqu'on mentionne la différence d'acidité des cultures, qui implique une différence structurale de l'agencement du réseau protéique.

La texture résultante de la fermentation par le Streptocoque seul est quasi liquide, la "charpente protéique" n'étant pas encore formée.

Aléa de procédé	Caracté-ristiques	Unités	Clones S. thermophilus		Associations clones S.thermophilus + L.bulgaricus			
			14	17	KA68 sucré	14P sucré	17P sucré	17P nature
640	BRK	cpoB	100	100	16900	15800	12850	9800
1.4	ACI	°D	65	70	120	120	115	117
-	St	$x10^7$/ml	21	20	9	68	72	92
-	Lb	$x10^7$ ml	6	-	2.5	22	9	20
AD	PS	µg/ml	86.6	41.5	36	47	40	58.3
AD	PS*	10^{-8} µg /St	41	20	36	6	5	6
0.21	SEU	(Pa)	0.2	0.2	15.4	14.5	13	12.9
14	VPL	($mPa.s^n$)	14	18	812	214	348	304
20	ST	($Pa.s^{-1}$)	-	-	337	947	620	654
0.77	K	($Pa.s^n$)	0.15	0.16	19.7	15.8	14.2	12.8
0.007	n (-)	(-)	0.64	0.62	0.19	0.18	0.21	0.24

* Ce rapport de Polysaccharide par unité bactérienne présuppose que seul le S. thermophilus est producteur.

TABLEAU 61 bis : CARACTERISTIQUES DES CULTURES FERMENTEES A L'AIDE DES CLONES S. THERMOPHILUS 14 ET 17, EN ASSOCIATION OU NON AVEC L. BULGARICUS P

Le dosage de polysaccharide a été effectué par le laboratoire de Chimie Biologie de LILLE (DOCO et FOURNET, communication personnelle).

La quantité de polysaccharide est exprimée en 10^{-8} microgrammes par unité cellulaire de S. thermophilus.

- La comparaison des clones 17 associé au L. bulgaricus cultivés sur milieu lait sucré ou sur lait nature montre à acidité équivalente, une quantité de polysaccharide supérieure pour 17 P nature,, mais qui devient équivalente si on la rapporte au nombre de cellules de S. thermophilus. Par ailleurs, les caractéristiques rhéologiques dans cet essai ne permettent pas de distinguer de façon nette les deux yaourts, bien que le yaourt nature semble moins consistant.

- La comparaison des 3 yaourts sucrés met en évidence des productions de polysaccharide comparables, mais rapportées au taux de bactéries, le ferment KA 68 a un rendement nettement supérieur. La quantité équivalente de polysaccharide synthétisée dans ce cas par un nombre de germes 7 fois inférieur, implique t'elle alors une différence de longueur des chaines macromoléculaires ou encore de nombres de liaisons d'interaction ?

En tout état de cause, les caractéristiques rhéologiques du lait fermenté par le ferment KA68 lui confère surtout une viscosité et un coefficient de consistance supérieurs. Par ailleurs, la surface de thixotropie est moindre.

5.3 Nature du pouvoir texturant de Streptococcus thermophilus, propriétés du polysaccharide synthétisé

5.3.1 Méthodes d'obtention du polysaccharide

Une souche de Streptococcus thermophilus S3 est mise en préculture sur lait écrémé reconstitué stérilisé jusqu'à coagulation du tube, puis une inoculation de 1 % est ensemencé sur lait écrémé, reconstitué à 147 g/l, stérilisé. La fermentation est réalisée à 43°C jusqu'à pH 5, puis le produit est conditionné à chaud après lissage au laboratoire dans des pots stérilisés de 125 g. Ces pots sont immédiatement refroidis en chambre froide, puis stockés à 7°C. Le lendemain, les échantillons sont expédiés, congelés, au laboratoire de Biochimie de Lille pour extraction du polysaccharide.

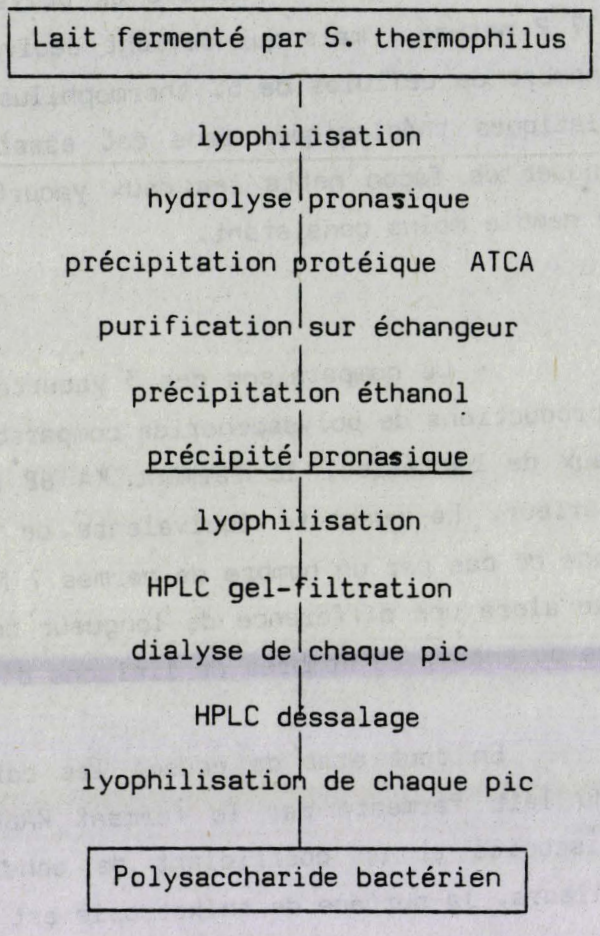


FIGURE 63 : **SCHEMA DE LA METHODE D'EXTRACTION DU POLYSACCHARIDE PURIFIE, A PARTIR D'UN LAIT FERMENTE**

(communication personnelle T. DOCO et B. FOURNET)

L'extraction du polysaccharide a été effectuée selon une méthodologie propre au laboratoire de l'Université de Lille (communication personnelle T. DOCO et B. FOURNET), elle est rapidement présentée dans la figure **63.**

5.3.2 Détermination de ses propriétés texturantes

Le traitement d'un litre de lait fermenté par S3 conduit à l'obtention d'environ 40 mg de polysaccharide bactérien purifié. La masse moléculaire de la macromolécule est comprise entre 800 000 et 1 000 000 Δ , la connaissance de l'unité tétrasaccharidique de répétition, permet d'envisager des chaines de plus de 1 000 unités en moyenne (communication personnelle T. DOCO et B. FOURNET, CONTRAT SODIMA). Nous avons alors entrepris l'étude des propriétés hydrodynamiques et épaississantes. Notre premier objectif était la détermination de la viscosité intrinsèque ($[\eta_0]$) de la molécule, soit le volume hydrodynamique potentiellement occupé par la molécule dans un solvant.

5.3.2.1 Caractéristiques hydrodynamique du polysaccharide

Matériels et Méthode mis en oeuvre

La détermination de ($[\eta_0]$) nécessite des mesures de la viscosité apparente η à plusieurs niveaux de concentration. La viscosité intrinsèque est alors déterminée selon l'équation (1).

$$\frac{\eta_{sp_0}}{C} = ([\eta_0]) + \lambda ([\eta]_0)^2 . C$$

avec $$\eta_{sp_0} = \frac{\eta_0 - \eta_{sol}}{\eta_{sol}} \qquad (1)$$

avec η_0 = viscosité apparente de la solution

η_{sol} = viscosité apparente du solvant

C = concentration de la macromolécule dans le solvant

η_{sp_0} = viscosité spécifique

λ = coefficient de HUGGINS.

Concentration	C (%)	0,100	0,333	0,500
Viscosité	η_{Sp}/C (%)-1	2,3	3,87	4,7

TABLEAU 62 : **VISCOSITE SPECIFIQUE DU POLYSACCHARIDE ISOLE DE LAIT FERMENTE PAR UN S. THERMOPHILUS S3**

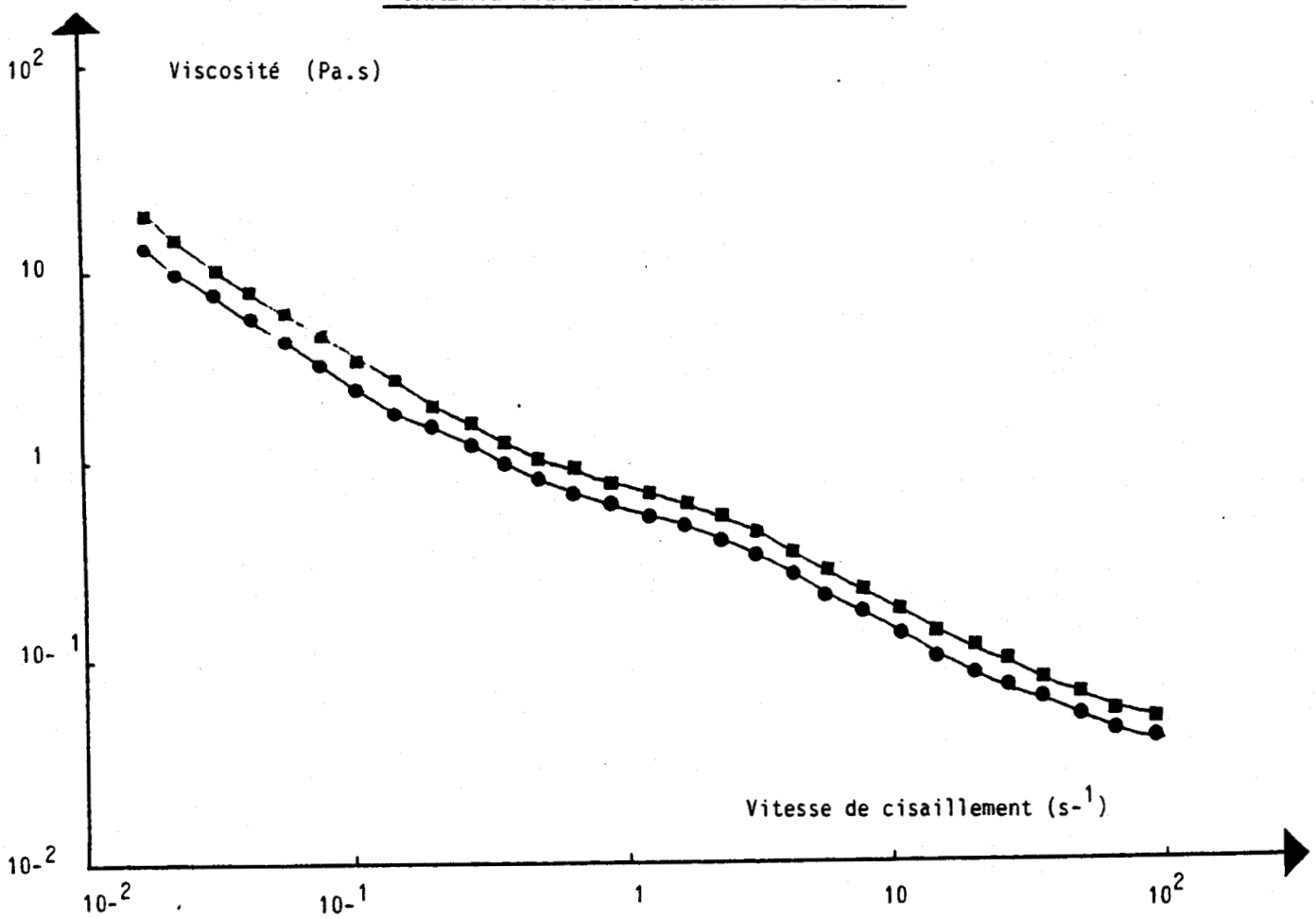


FIGURE 64 : **COMPARAISON DES RHEOGRAMMES DU YAOURT LIQUIDE AVEC OU SANS POLYSACCHARIDE AJOUTE A RAISON DE 0.025 %, MESURES EFFECTUEES AU "LOW SHEAR 30" (CONTRAVES)**

—■—■— : yaourt avec polysaccharide
—●—●— : yaourt sans polysaccharide

La détermination de η_o a été réalisée grâce à un rhéomètre cône/plan à basse vitesse de cisaillement, le "Low shear 30" (CONTRAVES). Le solvant utilisé est un tampon citrate-phosphate de pH 4.4. Les concentrations respectivement utilisées de la macromolécule sont 5000 ppm (0,5 %) et 3333 ppm (0,33 %) et 1000 ppm (0,1 %).

Résultats

Les rhéogrammes η_o en fonction de $\dot{\gamma}$ permettent de déterminer les zones newtoniennes d'écoulement. Sur le tableau 62, sont réunies pour les trois différentes concentrations les valeurs de la viscosité spécifique de la solution de polysaccharide.
Dans ces conditions, la viscosité intrinsèque du polysaccharide est de 1,75 dl/g.

Conclusion

Ce polysaccharide isolé d'un lait fermenté, dans les conditions décrites, possède une viscosité intrinsèque supérieure par exemple à celle de l'amylose, épaississant exogène, pour desserts lactés qui est de 1,54 dl/g dans KC1 0,3 M (MITCHELL, 1979).

5.3.2.2. Propriété d'un lait fermenté où le polysaccharide a été ajouté

L'objectif était de mettre en évidence le pouvoir texturant du polysaccharide isolé tel que décrit, lyophilisé et remis en solution dans un "yaourt à boire".

Matériels et Méthodes

Le polysaccharide isolé a été mis en solution, dans un tampon citrate-phosphate à pH 4, sous forme d'une solution mère à 0,5 %.

Nous avons ajouté cette solution mère dans le yaourt liquide de façon à atteindre une concentration finale de polysaccharide ajouté de 0,025 %.

A titre de témoin, nous avons ajouté une même quantité du tampon dans un "yaourt à boire".

La composition du "yaourt à boire" était la suivante :
lait entier : 97 %.
ferment lactique : 3 %.

Les mesures de viscosite sont réalisées au rhéomètre "Low Shear 30" (CONTRAVES).

Résultats

La viscosité du yaourt contenant le polysaccharide était plus élevée par rapport à celle du yaourt ne contenant pas le polysaccharide. Ainsi, on observe, pour une vitesse de cisaillement de 6 s^{-1}, que la viscosité du yaourt additionné de polysaccharide est égale à 285 mPa.s, alors que celle du témoin n'était que de 215 mPa.s (figure 64). Malheureusement, la très faible quantité de polysaccharide disponible pour la mesure (2 ml seulement de solution mère !!!) ne nous a pas permis de pousser plus à fond notre série d'essais.

5.4 Discussion

La production de macromolécule de nature polysaccharidique par des souches industrielles de S. thermophilus (S3, S13, S22, 3C, KA68) sur lait écrémé a été mise en évidence à plusieurs reprises dans nos conditions expérimentales. L'ordre de grandeur est de quelques dizaines de mg par litre de yaourt ou lait fermenté. GIRAFFA et BERGERE (1987) obtenaient des taux comparables. Selon la nature clonale, la quantité de polysaccharide produite est différente, une expérience a mis en évidence une variation du simple au double. La variation du taux de polysaccharide n'a pas pu être mise en relation directe avec une des caractéristiques rhéologiques du lait fermenté ou du yaourt brassé. Il faut en effet prendre en compte la structure de la matière protéique, conditionné en premier chef, par l'acidité du milieu.

FIGURE 65 : **PRODUCTION DE MUCOPOLYSACCHARIDE PAR UN CLONE DE S. THERMOPHILUS ISOLE D'UN FERMENT SODIMA CULTIVE SUR MILIEU LAIT** (Communication personnelle de F.GANCEL 1988)

A titre de témoin, nous avons ajouté une même quantité du tampon dans un "yaourt à boire".

La composition du "yaourt à boire" était la suivante :
lait entier : 97 %.
ferment lactique : 3 %.

Les mesures de viscosite sont réalisées au rhéomètre "Low Shear 30" (CONTRAVES).

Résultats

La viscosité du yaourt contenant le polysaccharide était plus élevée par rapport à celle du yaourt ne contenant pas le polysaccharide. Ainsi, on observe, pour une vitesse de cisaillement de 6 s^{-1}, que la viscosité du yaourt additionné de polysaccharide est égale à 285 mPa.s, alors que celle du témoin n'était que de 215 mPa.s (figure **64**). Malheureusement, la très faible quantité de polysaccharide disponible pour la mesure (2 ml seulement de solution mère !!!) ne nous a pas permis de pousser plus à fond notre série d'essais.

5.4 Discussion

La production de macromolécule de nature polysaccharidique par des souches industrielles de S. thermophilus (S3, S13, S22, 3C, KA68) sur lait écrémé a été mise en évidence à plusieurs reprises dans nos conditions expérimentales. L'ordre de grandeur est de quelques dizaines de mg par litre de yaourt ou lait fermenté. GIRAFFA et BERGERE (1987) obtenaient des taux comparables. Selon la nature clonale, la quantité de polysaccharide produite est différente, une expérience a mis en évidence une variation du simple au double. La variation du taux de polysaccharide n'a pas pu être mise en relation directe avec une des caractéristiques rhéologiques du lait fermenté ou du yaourt brassé. Il faut en effet prendre en compte la structure de la matière protéique, conditionné en premier chef, par l'acidité du milieu.

FIGURE 65 : PRODUCTION DE MUCOPOLYSACCHARIDE PAR UN CLONE DE S. THERMOPHILUS ISOLE D'UN FERMENT SODIMA CULTIVE SUR MILIEU LAIT (Communication personnelle de F.GANCEL 1988)

Dans ces conditions, il faut considérer avec la plus grande prudence des corrélations entre viscosité et taux de polysaccharide lorsque les acidités sont différentes ou lorsque le milieu est enrichi en caséine (CERNING, 1988).

Cependant, nous ne resterons pas aussi défavorables que GIRAFFA et BERGERE (1987) qui semblent ne pas croire à un rôle du polysaccharide pour expliquer des variations de texture. La mise en oeuvre de différents clones dans des conditions de culture strictement comparables, en particulier du point de vue acidité, tableau **61**, révèle quand même des variations importantes de texture du yaourt.

Pour expliquer ces variations, la différence de quantité de polysaccharide n'apparait pas suffisante et nous préférons émettre l'hypothèse d'interactions qui apparaissent alors entre les chaines polysaccharidiques sécrétés par les bactéries et le réseau protéique dont l'état dépend lui de l'acidité du milieu. La microscopie électronique étaye cette hypothèse (figure 65). Plus le rendement bactérien en polysaccharide serait grand, plus il y aurait de potentialités d'interactions entre les bactéries sécrétrices et les autres éléments du réseau.

De plus, le phénomène doit être dynamique à savoir une construction progressive de liaisons entre les deux types de macrostructure, le peu d'effet du polysaccharide ajouté "après coup" en serait la meilleure preuve.

Enfin, ces phénomènes seraient fonction des conditions extérieures (nature du milieu, température, etc...).

Variation du Facteur matière première ou procédé	Variation de la Viscosité Brookfield (cpoB)
. ESD + 1 %	environ + 3000
. Sucre + 5 %	environ - 1500
. Matière grasse + 1 %	environ - 1700
. Température de Fermentation	
41/43°C	environ + 1800
30/43°C	environ - 8000
. Acidité finale	de - 1500 à + 600
. Cisaillement dans le refroidisseur	environ - 15000
. Température de refroidissement à + 10°C	environ + 2800
. Stockage intermédiaire: 5 H à 20°C	environ - 1400
. Refroidissement en pot	environ + 4000
. Vitesse de refroidissement plus lente: 10°C de plus après 2 H	environ + 1700

TABLEAU 63: **COMPARAISON RELATIVE DES VARIATIONS DE "VISCOSITE BROOKFIELD" SELON LA MODIFICATION APPORTEE AU PROCEDE DE FABRICATION DU YAOURT BRASSE**

IV.- CONCLUSIONS

1.- Les études entreprises dans ce chapitre avaient comme premier objectif la maitrise du procédé industriel qui conduit à la texture du yaourt brassé. Ceci signifiait d'abord la quantification relative des effets des différents facteurs de fabrication et des matières premières. La variation de "Viscosité Brookfield" est l'outil de base qui peut être choisi à ce niveau comme premier moyen de comparaison (tableau 63).
Nous avons estimé à environ 3000 cpoB l'augmentation correspondant à 10 g/kg de poudre de lait ajoutée. L'augmentation de matière sèche ainsi obtenue et l'accroissement de la densité des micelles de caséine permet l'apport de texture. Ce facteur, facilement modifiable en conditions industrielles, pourrait donc être ajusté en fonction de la qualité du lait ; à ce propos, il serait préférable de raisonner en matière azotée à apporter en fonction du taux protéique du lait mis en oeuvre.

L'augmentation du taux de sucre ajouté et du taux de matière grasse ont des effets inverses. Les globules gras, homogénéisés vont venir s'insérer et solidifier le réseau tridimentionnel et contribuer à l'augmentation de consistance ; l'influence du saccharose par contre peut s'expliquer par un effet de pompage de l'eau par les petites molécules dispersées, eau qui ne serait plus disponible pour hydrater les micelles de caséine agglomérées.

En général, ces facteurs ont un niveau imposé dans le produit fini, mais "l'effet liquéfiant" du saccharose qui ne permettrait pas une résistance suffisante du caillé lors d'un traitement mécanique nous amène à envisager l'incorporation du sucre juste avant le conditionnement du yaourt brassé. Ainsi, la fermentation et les opérations de soutirage auraient lieu sur une base non ou peu sucrée.

Concernant les différents agents responsables de la fermentation lactique, cette étude a montré que, suivant le ferment utilisé, la texture du produit industriel était effectivement augmentée.

La production de substances polysaccharidiques texturantes démontrée sur des souches isolées de ferments industriels en est sans doute l'explication.

Il a été aussi montré qu'une synthèse plus importante de polysaccharide pouvait ne pas engendrer plus de texture quand elle était commandée par des facteurs externes défavorables à l'aggrégation caséique. En ce sens, la température de 30°C par exemple n'est pas favorable à une texture plus épaisse du yaourt brassé.
Pourtant, des températures inférieures à 43°C peuvent avoir, nous l'avons montré au stade pilote, un effet positif significatif. Rappelons en effet, qu'une diminution de 2 degrés Celsius de la température de fermentation aux stades levain et yaourt a entrainé une amélioration de la texture du produit fini.

L'importance du paramètre "Acidité au moment du décaillage" doit être relativisé, tout d'abord parce que les variations de texture qui en résultent après refroidissement à 20°C, ne semblent pas importantes, mais aussi parce qu'elles peuvent être inversées si le yaourt est conditionné à chaud.

Dans ce cas en effet, l'acidité de décaillage devient un "paramètre artificiel" puisqu'il s'agit simplement d'une opération de transfert du yaourt dans un récipient plus petit ! Ce qui compte alors, c'est le traitement mécanique qui doit intervenir suffisamment tôt afin que la texture puisse se reprendre dans le pot.

La maitrise industrielle des paramètres de la fermentation doit être améliorée, mais cela reste un problème délicat. En effet, cela supposerait outre l'emploi régulier d'une association de souche bien connue, des systèmes de régulation de températures en cuve et d'acidité suffisamment fiables en conditions industrielles.

Ferment utilisé	FACTEUR DE VARIATION	ACIDITE (PD)	VISCOSITE BROOKFIELD	PLASTICITE	VISCOSITE PLASTIQUE	SURFACE DE THIXOTROPIE	CONSIS/ASPECT TANCE EPAIS	RHEOFLUI- /ASPECT DIFIANT FILANT
.3C KA68	E.S.D	+	+	+	+	-	+ / +	+ / AD
.3C	MAT.GRASSE	NS	+	NS	AD	AD	AD / +	AD / NS
.3C	SACCHAROSE	-	-	-	-	+	NS / -	NS / NS
	FERMENT KA68/12M	+	+	AD	AD	AD	AD / AD	AD / AD
.3C	41-41/43-43 TEMPERATURE FERMENTATION	-	+	AD	AD	AD	AD / AD	AD / AD
.KA68	30/43	-	-	-	-	+	- / -	AD / +
.12M	à 40°C ACIDITE DECAILLAGE	+	-	AD	AD	AD	A / AD	AD / AD
	à 20°C	+	+	AD	AD	AD	AD / AD	AD / AD
.KA68	REFROIDISSEUR A PLAQUES	-	-	-	-	+	AD / -	AD / NS
.KA68	TEMPERATURE SORTIE REFROI-DISSEUR	+	+	+	+	NS	+ / +	NS / NS
.KA68	CONDT SANS ATTENTE	-	+	+	+	-	+ / AD	- / AD
.KA68	REFROIDISSEMENT EN POT	-	+	+	+	NS	+ / AD	- / AD
.KA68	VITESSE DE REFROIDISSEMENT	-	-	NS	-	NS	AD / -	AD / NS
.KA68	STOCKAGE (8°C)	+	+	+	+	-	+ / AD	NS / AD

TABLEAU 64 : **SCHEMATISATION DES EFFETS DE L'AUGMENTATION DES TAUX DE MATIERES PREMIERES, DES PARAMETRES DE FERMENTATION ET DE TRAITEMENTS TECHNOLOGIQUES SUR CHACUNE DES COMPOSANTES DE LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE**

+ : effet positif du facteur de variation ; - : effet négatif du facteur de variation.

Retenons aussi l'idée que tout ne s'arrête pas à la fin de la fermentation en cuve, la texture du yaourt brassé dépend très fortement encore d'opérations purement industrielles.

Les études menées aux stades industriel ou pilote ont révélé l'importance des opérations technologiques de post-fermentations.

La première étape est la réduction par 3 de la texture du yaourt brassé, exprimée en "Viscosité Brookfield", du fait du refroidissement au travers d'un appareil à plaques, cette perte étant en partie rattrapée par la reprise de texture pendant le refroidissement. Outre l'utilisation d'échangeurs tubulaires qui serait à tester, des actions sont possibles afin de minimiser ces pertes de texture ; nous avons en effet montré qu'une augmentation de température lors du laminage dans l'échangeur, et qu'un ralentissement du refroidissement après conditionnement se traduisaient par des effets positifs sur la texture.

Les augmentations ont été clairement quantifiées. Ces opérations peuvent facilement être menées en conditions industrielles, elles doivent être néanmoins étroitement surveillées afin de ne pas trop augmenter l'acidité du produit fini.
D'autre part, nous avons montré que la texture était d'autant mieux préservée que les opérations technologiques avaient lieu rapidement après le décaillage.

2.- Les effets de ces différents paramètres peuvent aussi être précisés par l'analyse détaillée de variations des différentes caractéristiques rhéologiques (tableau **64**). Nous pouvons alors mettre en relation certains effets bio-technologiques avec telles ou telles caractéristiques rhéologiques particulières du yaourt brassé.

Sa plasticité, sa viscosité plastique et le coefficient de consistance, augmenteraient avec l'extrait sec dégraissé la température en sortie de refroidisseur, le conditionnement immédiait après soutirage ; ils augmentent aussi lors du refroidissement et du stockage.
Tous ces facteurs contribueraient donc à renforcer "la tenue" et l'aspect épais, la consistance du yaourt brassé.
Ces mêmes critères seraient diminués si la température de fermentation est basse (30°C), si l'on ajoute du saccharose, lors du passage dans un refroidisseur à plaques, ou si l'on accélère la vitesse de refroidissement des pots de yaourt conditionnés.

Tel n'est pas le cas de l'indice n qui n'augmenterait qu'en fonction de l'extrait sec. Un conditionnement immédiat après soutirage accentuerait le caractère rhéofluidifiant du yaourt qui se développerait surtout pendant le refroidissement en pot.
L'ajout de saccharose, l'augmentation de température de sortie du refroidisseur n'auraient pas d'influence sur l'aspect rhéofluidifiant.

La surface de thixotropie du yaourt brassé ne serait pas affecté par les variations de températures lors des opérations technologiques post-fermentation.

Par-contre, une température de fermentation basse accompagnée d'un taux de sucre plus important se traduirait par une surface de thixotropie plus importante. De plus, dans ces deux cas, le yaourt brassé est perçu moins consistant.

L'extrait sec renforcé, une température plus importante en sortie du refroidisseur, un conditionnement rapide diminueraient la thixotropie du produit. Le yaourt deviendrait alors plus résistant à un cisaillement.

CHAPITRE IV

APPLICATION INDUSTRIELLE D'UN PROCEDE MODIFIE DE FABRICATION DE YAOURT A TAUX DE MATIERE SECHE REDUIT

I. INTRODUCTION

Les résultats obtenus dans le chapitre précédent ont permis de quantifier les effets soit isolés, soit combinés de facteurs de variations qui influencent la texture du yaourt brassé. Un de nos objectifs est maintenant de dégager certaines conclusions afin de mettre en oeuvre sur le matériel pilote du CRI, dans un premier temps, puis lors d'une production industrielle un procédé de fabrication modifié du yaourt brassé qui puisse permettre de diminuer de 1 % (soit 10 g par kg de lait mis en oeuvre), le taux de poudre de lait écrémé ajouté au lait de fabrication.

Ces modifications mises en oeuvre, par rapport à un procédé témoin conforme au cahier des charges SODIMA et à la pratique de nombreuses usines du groupe, doivent donc entrainer des effets positifs sur la texture. Nous avons choisi de modifier 5 facteurs du procédé, leurs effets estimés sur la"Viscosité Brookfield" sont schématisés dans le tableau 65 en nous appuyant sur les résultats suivants :

- taux de poudre : il augmente la composante épaisse de la texture, la plasticité et la viscosité du yaourt mais il augmente en même temps la postacidification (paragraphe III.2.1).

- température de maturation : il a été montré d'une part que l'effet de la température sur la texture dépendait de la température du levain et du yaourt, d'autre part que cet effet n'était pas linéaire pour le ferment 3C, l'optimum était de 41°C au levain et 41°C au yaourt, ce qui par ailleurs, diminuait la postacidification (paragraphe III.3.2).

- acidité finale : le pH de décaillage est en relation avec la texture du produit fini, mais l'augmentation de 1200 cpoB attendue du fait d'un décaillage de 10°D plus acide est en général inférieure à la variabilité industrielle du procédé (paragraphe III.3.3).

	Procédé TEMOIN (PT)	Procédé MODIFIE (PMOD)	Effet attendu sur la "Viscosité BROOKFIELD"
1.- Taux de poudre (%)	5 %	4 %	- 3500 cpoB environ
2.- Température de culture LEVAIN-YAOURT (°C)	43 - 43	41 - 41	+ 1800 cpoB environ
3.- Acidité au décaillage pH/Dornic	4.5 110 - 115°D	4.6 100 - 105°D	- 1200 cpoB environ
4.- Température de soutirage	env. 12°C	env. 20°C	+ 2000 cpoB environ
5.- Vitesse de refroidissement	rapide 12°C, puis 8°C en 1 h	lente 20°C, attente 1 h puis 8°C en 7 h	+ 1200 cpoB environ

ABLEAU 65 : **PRESENTATION SCHEMATIQUE DES VARIATIONS DE VISCOSITE BROOKFIELD ATTENDUES PAR LA MODIFICATION DES FACTEURS DE FABRICATION**

Remarque : un procédé témoin mais avec 4 % de poudre (PT ; 4%) a été mis en oeuvre au stade pilote.

- température en sortie du refroidisseur : un suivi de la "Viscosité Brookfield" dans un atelier de fabrication (paragraphe III.4.1) avait montré que la perte maximale avait lieu au niveau du refroidisseur, d'autre part (paragraphe III.4.2), il a été démontré qu'il y avait une relation étroite entre l'augmentation de la température de soutirage et l'augmentation de la texture du produit fini.

- vitesse de refroidissement : son influence a été démontré (paragraphe III.4.5). Dans certaines conditions, un refroidissement plus lent ou différé augmente la texture sans pour autant affecter significativement l'acidité du produit.

II.- MATERIELS ET METHODES

Au stade pilote, le procédé modifié (PMOD), appliqué sur un lait à taux de poudre réduit (4 %) a d'abord été comparé à un procédé témoin (PT) appliqué sur un lait à 5 % de poudre puis nous avons effectué un test de vérification par rapport au même procédé témoin (PT), avec cette fois, un taux de poudre réduit à 4 %.

Au stade industriel, le procédé modifié (PMOD) a été comparé au procédé témoin à 5 % de poudre (PT ; 5 %).

2.1 Matières premières

Pour les essais au stade pilote, le lait était un lait entier pasteurisé provenant d'une des usines de SODIMA. Il a été poudré par de la poudre de lait écrémé puis repasteurisé en fermenteur avant ensemencement. Le ferment utilisé était le ferment SODIMA 3C, lot n° 2911.

Pour les fabrications industrielles, le lait utilisé était le lait de l'atelier CLCP, le ferment était un ferment commercial YB58.

2.2 Procédé de fabrication

La fabrication au stade pilote a été réalisé en double selon les conditions générales décrites au paragraphe II.2.3. Les fabrications industrielles se situaient au démarrage de la production journalière de la CLCP.

CARACTERISTIQUES DES YAOURTS		ESSAI PMOD ; 4%	TEMOIN PT ; 5%	% de confiance "d'affirmer la différence est significative"
Ferment		3C	3C	
E.S.T/M.G (g/kg)		146.1/38	156.3/36	
Acidité (°D) /note/5 37%		131/2.60	138/2.61	4,9%/37%
VISCOSITE BROOKFIELD		14716	14616	5%
RHEOLOGIE	SEUIL D'ECOULEMENT (N. m^{-2} = Pa)	16.6	16.1	70%
	VISCOSITE APPARENTE mPa.s	1645	1526	63%
	VISCOSITE PLASTIQUE mPa.s			
	SURFACE THIXOTROPIE ($N.m^{-2}. s^{-1}$)	153	137	50%
	MODELE RHEOLOG -K	16.2	14.4	98%
	MODELE RHEOLOG n	0.254	0.283	97%
EVAL SENS. POT	EPAIS/5	4.08	3.84	96%
	FILANT/5	3.30	3.58	73%
	HET/LISSE	LISSE	LISSE	8%
--- BOUCHE	EPAIS/5	3.85	3.53	86%
	COLLANT/5	2.59	2.83	50%
	GOUT/5	3.08	2.82	62%
NUMERATION BACTERIENNE				-
GT x 10^6 g/ml		22	10	
St(x 10^6 g/ml)		21	9.2	85 %
Lb(x 10^6 g/ml)		0.9	1.2	37 %
St/Lb		23	8	-

TABLEAU 66 : CARACTERISTIQUES DES YAOURTS BRASSES NATURES FABRIQUES A L'ECHELLE PILOTE SELON LE PROCEDE MODIFIE A TAUX DE POUDRE REDUIT, (moyenne de 2 essais) ET SELON LE PROCEDE TEMOIN A TAUX DE POUDRE STANDARD (moyenne de 2 essais)

Le yaourt brassé était un yaourt brassé à la pulpe de fraise ajoutée avant conditionnement, selon le procédé usuel à la CLCP.

2.3 Contrôle des yaourts obtenus

Les mesures d'E.S.T., d'acidité, de texture et les tests d'évaluation sensorielle ont été effectuées selon les conditions décrites précédemment.

Dans la fabrication pilote, les yaourts ont été contrôlés à J + 7.

Pour la fabrication industrielle, les mesures ont été faites à J + 1, J + 7, J + 15, J + 21, sur le produits conservés à 7°C. Toutes les données varient dans le même sens et nous détaillerons les résultats obtenus à J + 15.

III.- RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Essais au stade pilote

3.1.1 Comparaison entre le procédé modifié à taux de poudre réduit et le procédé témoin à formulation standard

Le tableau 66 présente les résultats obtenus à J + 7, rappelons que les fabrications du témoin et de l'essai ont été répétées. On peut donc comparer le procédé témoin et le procédé essai compte tenu de l'aléa dû à la répétabilité d'ensemble du procédé et de la mesure (annexe 11). Dans ces conditions, nous pouvons observer :

- les extraits secs totaux vérifiés sur les produits finis sont de 146 g/kg pour le yaourt essai, de 155 g/kg pour le yaourt témoin.
- il n'y a pas de différence significative de "Viscosité Brookfield".
- il n'y a pas de différence significative sur les notes d'évaluation sensorielle de la texture sauf sur les aspects épais qui augmentent pour l'essai.
- parmi les grandeurs rhéologiques seul le coefficient de consistance K est plus élevé pour le yaourt essai, l'indice d'écoulement n serait plus faible pour le yaourt essai.

CARACTERISTIQUES DES YAOURTS			PMOD ; 4% ESSAI	PT ; 4% TEMOIN	% de confiance "d'affirmer la différence est significative"
Ferment			3C	3C	
E.S.T/M.G (g/kg)			148.9/33	148.8/33.5	
Acidité (°D) /note/5 37%			133/1.7	139/2.0	31% / 96%
VISCOSITE BROOKFIELD			16750	14700	77%
RHEOLOGIE	SEUIL D'ECOULEMENT (N. m^{-2} = Pa)		18	16.6	96%
	VISCOSITE APPARENTE mPa.s		3432	2414	99%
	VISCOSITE PLASTIQUE mPa.s		1692	1287	98%
	SURFACE THIXOTROPIE ($N.m^{-2}. s^{-1}$)		59	76	53%
	MODELE RHEOLOG	-K	16.4	15.2	98%
		n	0.333	0.319	96%
EVAL SENS.	POT	EPAIS/5	4.5	4.1	98%
		FILANT/5	3.2	3.4	62%
		HET/LISSE	LISSE	LISSE	LISSE
	BOUCHE	EPAIS/5	4.3	4.1	73%
		COLLANT/5	2.7	2.7	0%
		GOUT/5	2.4	2.8	99%
NUMERATION BACTERIENNE					
Gt x10^6 g/ml			242	232	-
St(x 10^6 g/ml)			160	147	88 %
Lb(x 10^6 g/ml)			82.5	85	98 %
St/Lb			2	1.7	-

TABLEAU 67 : CARACTERISTIQUES DES YAOURTS BRASSES NATURES FABRIQUES A L'ECHELLE PILOTE SELON LE PROCEDE MODIFIE A TAUX DE POUDRE REDUIT ET SELON LE PROCEDE TEMOIN A MEME TAUX DE POUDRE

- l'acidité du yaourt essai est un peu moindre à J + 7 (131°D/ 138°D) mais elle n'est pas perçue comme telle par le jury.
- la numération bactérienne réalisée met en évidence un taux plus important de Streptococcus thermophilus dans le procédé essai.

3.1.2 Vérification : comparaison du procédé modifié à 4 % de poudre avec un procédé témoin au même taux de poudre

Le tableau 67 présente les résultats obtenus ; nous avons utilisé l'aléa de procédé déterminé précédemment pour comparer les résultats, il apparait :
- les extraits secs contrôlés sur les produits finis sont identiques pour le yaourt témoin et le yaourt essai.
- la viscosité Brookfield du yaourt modifié est plus élevée de 2000 cpoB, cependant, cette différence n'est pas significative à 95 % du fait de l'aléa de répétabilité du procédé et de la mesure estimé à 1256 cpoB ;
- les grandeurs rhéologiques caractéristiques du "yaourt brassé" obtenu selon le procédé modifié sont toutes plus élevées que celles du témoin, seule la thixotropie du yaourt ne semble pas affectée. Les modifications apportées au procédé se traduisent donc par un yaourt de consistance plus élevée, une plasticité augmentée, une viscosité plus forte.
- en ce qui concerne les notes d'évaluation sensorielle, le yaourt modifié apparait plus épais surtout en pot. L'aspect filant est légèrement supérieur mais quasiment équivalent autémoin. Les deux yaourts sont lisses, l'aspect collant n'est pas modifié.
- le yaourt modifié est un peu plus acide (6°D) par rapport au témoin, cette différence d'activité est significativement perçue par le jury.

A ce propos, il faut noter que la température de sortie refroidisseur relevée lors de cet essai était de 24°C. Elle parait sans doute un peu trop élevée, surtout du fait de l'attente d'une heure. Pour le procédé témoin, la température de soutirage était de 12°C puis un refroidissement immédiat a été pratiqué.

- une numération bactérienne a été faite sur cette série de fabrication pilote. Il apparait que le nombre total de germes est quasiment identique dans les deux cas, l'équilibre "St/Lb" est aussi légèrement favorable au S. thermophilus dans le procédé modifié.

3.1.3 Conclusion

Dans ces conditions pilotes, nous avons démontré que la mise en oeuvre du procédé modifié permettait d'obtenir un yaourt de caractéristiques suivantes :

- **texture** : au moins équivalente au yaourt témoin ; la "Viscosité Brookfield", la texture épaisse évaluée en pot et en bouche, les grandeurs rhéologiques sont au moins égales à celle du yaourt témoin.
- **acidité** : elle est diminuée du fait de la diminution du taux de poudre, le couple acidité au décaillage/température de refroidissement jouant là un rôle primordial sur la postacidification du yaourt.

A ce stade de l'étude, il semble donc possible, avec le même ferment (ici 3C), d'économiser 1 % de poudre de lait écrémé pour fabriquer du yaourt brassé nature si l'on met en oeuvre un procédé modifié, parfaitement contrôlé.

3.2 Essais industriels, comparaison du procédé témoin (PT) avec le procédé modifié (PMOD)

3.2.1 Résultats

Le suivi des paramètres du procédé notés sur la feuille de suivi de fabrication dans l'atelier de la C.L.C.P. et sur les enregistrements des "disques TAYLOR" - annexe 12 - de l'atelier de production donnent les éléments reportés sur le tableau 68. Nous pouvons faire les commentaires suivants :

CARACTERISTIQUES DES YAOURTS "Caresse pulpe Fraise"			"Yaourt E" PMOD ; 4%	"Yaourt T" PT ; 5%	% de confiance "d'affirmer la différence est significative"
Ferment			CLCP	CLCP	/
E.S.T/M.G (g/kg)			226.6/32	239.6/32	/
Acidité (°D) /note/5 37%			3.79/3	3.87/3.6	75%/83%
VISCOSITE BROOKFIELD			8200	8600	49%
RHEOLOGIE	SEUIL D'ECOULEMENT ($N.m^{-2}$ = Pa)		13.3	13.4	14%
	VISCOSITE APPARENTE mPa.s		782	806	32%
	VISCOSITE PLASTIQUE mPa.s		486	503	32%
	SURFACE THIXOTROPIE ($N.m^{-2}.s^{-1}$)		203	196	24%
	MODELE RHEOLOG	-K	13.7	14.2	76%
		n	0.250	0.245	33%
EVAL SENS.	POT	EPAIS/5	3.6	3.4	36%
		FILANT/5	4.3	4.1	30%
		HET/LISSE	LISSE	LISSE	-
	BOUCHE	EPAIS/5	3.45	3.45	29%
		COLLANT/5	3.2	3.4	12%
		GOUT/5	3.75	3.6	21%
NUMERATION BACTERIENNE					
St(x 10^6 g/ml)			51	90	99 %
Lb(x 10^6 g/ml)			5	23	99 %
St/Lb			10	4	-
Germes totaux			56.10^6	113.10^6	—

TABLEAU 68 : CARACTERISTIQUES A J + 15 DES YAOURTS BRASSES A LA PULPE DE FRAISE FABRIQUES A LA C.L.C.P. SELON LE PROCEDE MODIFIE A 4 % DE POUDRE EN COMPARAISON AVEC LE PROCEDE TEMOIN A 5 % DE POUDRE

- les paramètres fixés ont été bien respectés, le seul point à noter qui n'était pas prévu est le temps d'attente de plus de 3 h **avant** le conditionnement, ceci du fait d'une panne de machine.

- les yaourts correspondant à l'essai E ont un E.S.T. de 226.4 g/kg inférieur donc de 13 g à ceux de l'essai témoin T contrôlés à 239 g/kg d'E.S.T.

- les viscosités Brookfield ne sont pas significativement différentes (α = 5 %).

- caractéristiques rhéologiques : aucun critère rhéologique ne permet de distinguer de façon significative les deux lots de yaourts. Le coefficient de consistance K est cependant un peu plus élevé pour le yaourt T.

- appréciation d'évaluation sensorielle : la texture épaisse jugée dans le pot ou en bouche est équivalente pour les deux yaourts. Les aspects filant et collant ne sont pas significativement différents. Les deux yaourts sont lisses.

- mesure d'acidité : le pH légèrement plus acide du yaourt E (3.79 à J + 15) par rapport au yaourt type T (3/87 à J + 15) se traduit aussi par une perception un peu plus acide en évaluation sensorielle, mais sans que cela soit considéré comme un défaut.

- numération bactérienne : le yaourt T se distingue par un nombre de germes deux fois plus important (1.1×10^8/ml) du yaourt E (5.6×10^7/ml). Le rapport St/Lb est augmenté dans le yaourt E.

- goût des yaourts : aucune différence significative ne permet de distinguer les deux yaourts.

3.2.2 Discussions - Conclusions

Les deux yaourts T et E sont de bonne qualité. La soustraction de plus de 10 g d'extrait sec dégraissé dans le yaourt type E ne modifie ni la texture en pot ni la texture en bouche, à condition de modifier et de maîtriser les paramètres de fabrication comme cela a été réalisé dans cette série d'essais.

Aucune des mesures instrumentales réalisées sur les deux yaourts ne met en évidence de différence significative de texture.

Le seul point à noter concerne l'acidité qui est un peu plus élevée dans le yaourt type E, mais ceci est en relation avec le maintien accidentel à 25°C de la pâte pendant 3 h30 avant conditionnement, ce qui doit être évité en fonctionnement normal de l'installation.

L'analyse du procédé de fabrication modifié nous permet de remarquer qu'à texture équivalente :

- le procédé type E met en oeuvre un poudrage inférieur de 1 % de la base laitière.
- la durée de fermentation du levain est allongée au maximum d'1/2 heure.
- la durée de fermentation du yaourt est équivalente compte tenu du décaillage avancé.
- la phase d'attente avant conditionnement imposée en général par le rythme de conditionnement doit être réduite au maximum. Si cela est impossible, il convient de diminuer d'autant l'attente après conditionnement.

- l'attente des palettes à 18°C avant passage en tunnel nécessite un espace isolé suffisant au niveau de l'atelier ainsi qu'une gestion de l'entrée des palettes dans le tunnel.
- le refroidissement selon ce procédé est simplement différé, il n'entraine pas de modifications de ventilation du tunnel.
- le temps de fabrication global du yaourt brassé est allongé d'environ 3 h.

IV.- CONCLUSION

Ces deux études mettent clairement en évidence la possibilité réelle, en conditions de fabrications industrielles, de diminuer de 1 % le taux de poudre ajoutée à la base laitière tout en garantissant une texture équivalente au consommateur.

Pour ce faire, le procédé industriel de fabrication doit être modifié et parfaitement contrôlé d'autant plus qu'il faut assurer une acidité équivalente du yaourt brassé.

Le procédé modifié mis en oeuvre, avec 2 ferments différents, avait les caractéristiques suivantes :

	témoin, cahier des charges	procédé modifié
1.-Poudrage du lait	4,7 kg/100 l	3,7 kg/100l
2.-Température de maturation du levain	43°C	41°C
3.-Température de maturation du yaourt	43°C	41°C
4.-Acidité de décaillage	115°D	105°D
5.-Température de refroidissement	10-14°C	23°C
6.-Temps d'attente après conditionnement	néant	3h à 18°C

Rappelons seulement que dans ce procédé, les 5 facteurs ont été modifiés simultanément sans que l'on puisse vérifier leur poids respectif sur l'amélioration de la texture ; une étude d'optimisation par plan d'expériences dans l'esprit de celle présentée au paragraphe III.1, devrait être menée pour terminer ce travail.

Cependant, il semble établi que la variation contrôlée et simultanée de ces 6 paramètres du procédé de fabrication conduit à une économie substantielle de matière première qui peut être estimée à 50 tonnes annuelles de poudre de lait écrémé pour une usine-type qui produit 5000 tonnes de yaourt brassé par an.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L' idée directrice de notre travail était d'avancer dans la compréhension des phénomènes qui conditionnent l'élaboration de la texture du yaourt brassé, afin de pouvoir réduire la variabilité industrielle et permettre une optimisation de ce critère essentiel de la qualité du produit.

1.- La structure du yaourt brassé, l'étude bibliographique l'a montré, peut être définie comme une phase aqueuse qui enferme une dispersion de différents éléments de forme et de taille très variables (figure 66) qui peuvent être liés entre eux par des interactions fortes ou faibles en perpétuelle évolution. Le yaourt brassé est en effet un produit vivant où les métabolismes bactériens et leurs conséquences sur les modifications de structure et de texture sont complexes.

En première approche, nous pouvons considérer que les micelles de caséine sous l'effet de l'acidification sont aggrégées puis agglomérées entre elles par des liaisons fortes (HEETJE et coll, 1985 ; BROOKER, 1987 ; PARNELL-CLUNIES, 1987). D'autres liaisons fortes peuvent unir la membrane des globules gras homogénéisés et la caséine K de la micelle (ALAIS, 1984) ; enfin, une partie de l'eau est liée aux caséines (LENOIR, 1985). Par ailleurs, les bactéries symbiotiques Streptococcus thermophilus et Lactobacillus bulgaricus occupent un certain volume dans le réseau, ces bactéries peuvent synthétiser des macromolécules polysaccharidiques (F. GANCEL, 1988 ; CERNING et coll, 1985 et 1988) qui pourraient alors unir les bactéries aux caséines. La nature des liaisons n'est pas connue, il pourrait s'agir de liaisons hydrostatiques faibles.

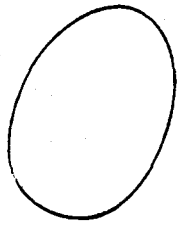
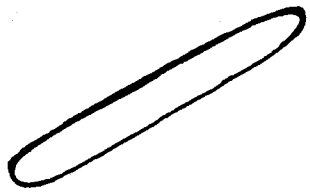
Eléments	Rapport de taille	"Rapport de nombre"
Agrégats protéiques		10 000 000
Globules gras homogénéisés		30 000
L. bulgaricus		3
S. thermophilus		7
Exopolysaccharide bactérien		absence de données

FIGURE 66 : **REPRESENTATION A L'ECHELLE DE LA TAILLE (1 cm = 1 µ) ET DU NOMBRE (base 1 = 10^7 unités) DES DIFFERENTS ELEMENTS STRUCTURAUX PRESENTS DANS 1 ML DE YAOURT BRASSE AU LAIT ENTIER**

(d'après tableau 7)

De plus, compte tenu de la structure et de la masse moléculaire du polysaccharide (T.DOCO et B. FOURNET, communication personnelle - CONTRAT SODIMA), l'on peut penser que cet élément augmente la "continuité" de l'ensemble.

Enfin, des liaisons faibles unissent l'eau capillaire et les protéines, mais elles peuvent être encore plus nombreuses si des macromolécules de polysaccharide sont présentes.

2.- La texture du yaourt brassé peut être rapidement caractérisée par un paramètre simple : "la Viscosité Brookfield". Très utile en contrôle de routine, celle-ci permet une première appréciation objective du produit.

Cependant, cette valeur ne permet pas une description rhéologique complète du yaourt brassé ; elle est insuffisamment corrélée aux variations d'aspect épais et ne rend pas compte de l'aspect filant du yaourt. Nous nous sommes alors attaché à mettre au point une méthode rhéométrique par écoulement grâce à un rhéomètre à contrainte imposée (CARRIMED CS 50).

La répétabilité de la méthode de mesure qui tient compte du temps de sortie avant la mesure, de l'effet de bord, est satisfaisante puisque nous obtenons des coefficients de variation inférieurs à 10 % quelque soit la caractéristique rhéologique considérée.

Le yaourt brassé ainsi caractérisé est un matériau complexe, il est viscoplastique, rhéofluidifiant et thixotrope.

L'aspect rhéofluidifiant a pu être modelisé partiellement mais directement par le logiciel du rhéomètre. Nous avons montré qu'une loi en puissance s'ajustait de façon très satisfaisante à partir d'une vitesse de cisaillement de 6 s^{-1}.

Il ne nous a pas été possible, pour des raisons qui tiennent sans doute à la relation entre le produit complexe et la sensibilité de l'appareil, d'obtenir la modelisation complète du rhéogramme, mais nous avons considéré que le seuil d'écoulement donnait une indication suffisante du début du rhéogramme.

Deux caractéristiques, le coefficient de consistance K et l'indice n peuvent donc compléter la description rhéologique du yaourt brassé.

Une approche sensorielle nous a permis suite à un travail sur les descripteurs et à l'entrainement d'un jury interne, de proposer une fiche descriptive d'évaluation sensorielle de la texture du yaourt brassé.

Grâce à celle-ci, deux descripteurs sont apparus particulièrement pertinents et indépendants pour décrire la texture en pot du yaourt brassé : l'aspect épais et l'aspect filant.

En ce qui concerne la texture perçue en bouche, le descripteur épais a surtout été retenu. Il a été montré sur les échantillons étudiés que l'aspect épais en pot était bien corrélé à l'aspect épais en bouche.

En définitive, la texture du yaourt brassé peut donc être décrite par le seuil d'écoulement, la surface de thixotropie, la viscosité plastique qui, comme l'a montré l'analyse multidimentionnelle, est proche du coefficient de consistance K lui même significativement corrélé à l'aspect épais, l'indice n étant lui corrélé à l'aspect filant. Ces deux dernières relations ont été validées par régression linéaire.

A ce niveau, il nous semble intéressant de proposer des hypothèses dans le but de relier les données sensorielles et rhéologiques à la structure proposée précédemment :

- la plasticité du yaourt brassé correspond à l'état initial natif du produit, c'est-à-dire à l'ensemble des éléments structuraux et de leurs liaisons fortes et faibles. Elle traduirait la "tenue" du yaourt, son aspect dans le pot. Ce critère sensoriel n'a pas été retenu par le jury, il pourrait être secondaire pour caractériser ce type de yaourt.

- la viscosité plastique rendrait compte du bilan, de la somme des liaisons fortes et faibles entre les différents éléments structuraux après qu'ils aient subi une certaine contrainte. Le coefficient de consistance K serait une visualisation dynamique de ce même phénomène. Nous avons pu vérifier que ces indicateurs correspondaient à des vitesse de cisaillement de l'ordre de 10 à 50 s^{-1} (SHAMA et SHERMANN, 1973).

Du point de vue organoleptique, ces grandeurs seraient en relation avec la consistance, l'aspect épais suite à la rotation de la cuillère dans le pot ou à l'écoulement dans la cavité buccale sous l'action de la langue.

- l'indice n exprimerait plutôt un rapport, celui du nombre de liaisons faibles sur le nombre de liaisons fortes. Un comportement plus rhéofluidifiant soit une diminution de n signifierait alors une moins grande part de liaisons faibles, c'est-à-dire d'interactions entre polysaccharide et protéines sans pour autant que la quantité de liaisons entre les micelles de caséine soit modifiée.

Ceci serait compatible avec l'évaluation sensorielle puisque l'aspect moins filant décrit par une valeur de n faible, signifierait un aspect moins continu, moins lié du yaourt où les liaisons d'interactions faibles seraient moindres.

Au contraire, un yaourt serait très filant si la quantité d'interactions dues aux macro-structures linéaires (en particulier le polysaccharide), responsables d'un réseau continu, est très importante.

- la surface de thixotropie traduirait, elle, la capacité de l'ensemble de ces liaisons fortes et faibles à résister à la déformation donc à se réassocier lorsque la contrainte appliquée diminue puis cesse. Non reliable dans notre étude à l'un des descripteurs sensoriels, elle doit pouvoir trouver toute sa place comme critère rhéologique permettant d'apprécier les effets des cisaillements mécaniques dus au procédé.

Caractéristiques	Valeur moyenne	Unité
teneur en eau	85	%
teneur en matière grasse	3.5	%
Acidité Dornic	125	°D
"Viscosité Brookfield"	9500	cpoB
Plasticité	7.5	Pa
Viscosité plastique pour τ = 35 Pa	500	mPa.s
Surface thixotropie	200	$Pa.s^{-1}$
indice n	0.35	-
coefficient K	8	$Pa.s^{n}$

TABLEAU 69 : CARACTERISTIQUES MOYENNES DES LOTS DE YAOURT BRASSE NATURE "MARQUE YOPLAIT" ANALYSES

(l'origine des produits et les méthodes utilisées ont été précisées dans les paragraphes correspondants).

La texture du yaourt brassé ainsi définie subit de grandes variations lors de la fabrication industrielle. Les coefficients de variations de la texture d'un yaourt brassé valent environ 15 % exprimé en "Viscosité Brookfield", 11 % pour l'indice n, 20 % pour le coefficient de consistance et la viscosité plastique, 35 % pour la surface de thixotropie et presque 50 % pour le seuil de plasticité !

Néanmoins, les caractéristiques moyennes du yaourt brassé nature YOPLAIT, obtenues selon les méthodes décrites, sont celles portées dans le tableau 69. Ces valeurs permettent de généraliser les toutes premières indications données par JACQUIN 1986 ; la plasticité est nettement inférieure aux valeurs obtenues sur les yaourts brassés analysés par DE KEE, 1983.

3.- Les études menées dans le troisième chapitre ont permis d'une part de quantifier l'influence des variations relatives des matières premières poudre de lait, matière grasse et sucre par rapport aux paramètres biologiques de fermentation et aux opérations plus technologiques (tableau 63), mais, d'autre part, de mettre en évidence des actions différentes de chaque facteur du procédé selon la composante de texture mesurée (tableau 64). Nous ne reviendrons pas sur les conclusions clairement établies à la fin du chapitre, qui illustrent bien la complexité du processus d'élaboration du yaourt brassé.

Cela avait déjà été présenté par MARTENS, 1972, qui distinguait les facteurs qui influençaient la fermeté (mesurée par chute de bille) de ceux qui influencaient l'écoulement au travers de l'entonnoir de POSTHUMUS. RASIC et KURMAN, 1978, ont eu recours eux aussi à cette distinction. Mais les caractéristiques de texture étaient évaluées à l'aide de tests empiriques.

Si nous essayons, pour notre part, de séparer parmi les différents facteurs étudiés dans les chapitres précédents ceux qui influençent la viscosité plastique ou la consistance de ceux qui affectent l'aspect rhéofluidifiant, nous observons (tableau 70) les éléments suivants :

Facteurs qui affectent le coefficient de consistance K	Facteurs qui affectent l'indice d'écoulement n (aspect rhéofluidifiant)
	taux de matière sèche
taux de sucre	
	température de fermentation
température en sortie du refroidisseur	
	conditionnement sans attente
	refroidissement
stockage	

TABLEAU 70 : CLASSEMENT DES FACTEURS DU PROCEDE DE FABRICATION DU YAOURT BRASSE D'APRES LEUR EFFET SUR LE COEFFICIENT DE CONSISTANCE D'UNE PART, ET SUR L'INDICE D'ECOULEMENT D'AUTRE PART

La diminution de matière sèche accroit les deux paramètres : le taux de sucre, n'affecte que la consistance.

La température de fermentation semble affecter l'indice n et le coefficient K, par contre, l'augmentation de température en sortie du refroidisseur semble elle, augmenter la consistance sans affecter l'aspect rhéofluidifiant.

Un conditionnement immédiat après soutirage accentuerait l'effet du refroidissement pendant lequel le coefficient K augmente alors que l'aspect rhéofluidiant diminue. Par contre, pendant le stockage du yaourt brassé conditionnée, seule la consistance serait augmentée.

Nous pouvons donc penser qu'une base laitière de composition donnée, sous l'influence des conditions de fermentation, en particulier la nature des souches utilisées et la température appliquée, va former un coagulum dont les propriétés viscoplastiques mais aussi rhéofluidifiantes seront variables. En effet, pendant la phase finale de fermentation en cuve, outre l'aggrégation protéique conditionnée par la vitesse d'acidification bactérienne et le pH final, la synthèse de polysaccharide peut déjà être active puisque nous sommes en phase de métabolisme secondaire pour Streptococcus thermophilus.

Ensuite, l'opération de laminage-refroidissement à travers l'échangeur à plaques ne semble pas se traduire par des modifications d'aspect rhéofluidifiant, seule la consistance semble affectée ; il y aurait destruction irréversible en proportions équivalentes de liaisons fortes et de liaisons faibles. De plus, nous pouvons penser que si les traitements mécaniques ont lieu à des températures suffisamment élevées et parallèlement à la synthèse de polysaccharide texturant, la texture pourra se reconstituer grâce à la fois à une légère poursuite de l'aggrégation protéique et à la synthèse de polysaccharide qui reformeront de nombreuses liaisons d'interactions entre les différents éléments structuraux.

Ces phénomènes biologiques et physico-chimique étant favorisés par un conditionnement le plus rapide possible et l'application de cinétiques de refroidissement lentes et progressives.

Cette vision dynamique d'un processus de formation d'interactions lors de l'élaboration de la structure du yaourt brassé reste à démontrer. Elle est cependant renforçée par la difficulté que nous avons eu à valider notre hypothèse de travail initial plus simple, à savoir : l'aspect rhéofluidifiant décrirait uniquement l'expression de la production biologique de polysaccharide bactérien texturant et l'aspect épais, celle de la rigidité du réseau protéique.

Nous avons vu, en effet, que la mise en oeuvre de conditions de fabrication modifiées peut se traduire par des augmentations de synthèse de polysaccharide sans augmenter pour autant l'aspect rhéofluidifiant (chapitre IV).

D'autre part, l'étude spécifique que nous avons abordé concernant le "pouvoir texturant" du polysaccharide, nous empêche de considérer le problème de façon mécanique et simplifiée. Pour cette raison le terme de "caractère texturant" et non pas "épaississant" ou "filant" nous parait être plus complet et le plus approprié à la réalité observée.

En effet, une "souche filante" pourra produire un yaourt épais si les conditions de culture sur lait sont maîtrisées en ce sens.

A contrario, parler de "souche épaississante" revient à considérer comme mécanique l'utilisation d'une telle souche pour obtenir un yaourt plus épais. Or, ce yaourt pourra être, dans certaines conditions, beaucoup trop filant, voire gluant !

Devant la complexité des phénomènes biologiques incriminés, il nous semble à ce niveau qu'une avancée significative pourra seulement être entreprise si l'on est capable d'isoler des quantités suffisantes de polysaccharide bactérien et de les réincorporer au lait en quantités variables avant, pendant ou après le processus de fermentation.

La toute premiere indication obtenue sur ce point dans le chapitre III, paragraphe 5 va elle aussi dans le sens d un phénomene dynamique de construction au fur et à mesure d interactions, accompagnant la synthèse de mucopolysaccharide.

L utilisation et le développement des techniques d'observations du coagulum par microscopie électronique seraient aussi indispensables afin de mieux comprendre ces phénomènes.

4.- **Le** procédé de fabrication du yaourt brassé est, rappelons le, traditionnellement séparé en trois grandes phases regroupant chacune plusieurs opérations unitaires :

- la préparation des matières premières et leurs traitements avant fermentation.
- la phase de fermentation en cuve apres ensemencement par les bactéries lactiques.
- les opérations technologiques post-fermentaires de brassage, soutirage, prérefroidissement, conditionnement, réfrigération puis stockage.

Classiquement, l'on considère que les deux premieres phases qui ont pour objectif la formation d'un coagulum lactique de bonne qualité du point de vue acidité, propriétés arômatiques et surtout texture sont communes au yaourt ferme et au yaourt brassé ; dans cet esprit, seule la troisième phase est particuliere au yaourt brassé et elle doit avoir pour finalité la destruction la plus minime possible de la texture du coagulum lactique formé en cuve à la fin de la deuxieme phase.

Prenant appui en particulier sur les éléments avancés par ce travail, il nous semble important de distinguer dès la fin de la premiere phase le procédé de fabrication du yaourt ferme de celui du yaourt brassé qui est bien spécifique.

L'objectif bio-technologique devient en effet l'élaboration, en particulier par le choix du ferment, des températures et de l'acidité finale, d'une consistance suffisante mais douée de propriétés supplémentaires qui vont pouvoir lui permettre de mieux résister aux opérations technologiques postérieures.

Apparait alors la notion de "résistance au traitement mécanique" qui nécessiterait à elle seule un travail plus approfondi, de ce point de vue la relation avec la thixotropie du coagulum serait intéressante à étudier.

En définitive, cela signifie qu'il ne s'agit pas d'augmenter à "l'aveuglette" le taux de matière sèche mais qu'il faut plutôt chercher à favoriser au mieux et à maîtriser la synthèse de mucopolysaccharide, une bonne acidification et une potentialité d'interactions maximale entre ces deux élements.

5.- **Nous** avons appliqué cette idée dans le chapitre IV en utilisant directement les relations observées entre facteurs de variations et effets mesurés. Pour cela, la température de fermentation du levain et du yaourt a été diminuée de 2°C, la température en sortie du refroidisseur a été augmentée d'environ 10°C et la cinétique de refroidissement après conditionnement ralentie.

L'interprétation que nous pouvons avancer est que les conditions étaient réunies pour permettre d'abord la formation d'une texture suffisamment liée, qui a été mieux préserver du laminage grâce à une température plus élevée en sortie du refroidisseur et qui a pu se reformer lentement en pot pendant le refroidissement. Ceci dans le même temps où l'acidité était contrôlée par un arrêt plus rapide de la fermentation.

Les résultats positifs obtenus montrent qu'il est industriellement possible de diminuer le taux de poudre de lait ajoutée au yaourt brassé tout en préservant au produit toutes ses caractéristiques de texture et de qualité.

6.- En résumé, la texture du yaourt brassé, critère de qualité important pour le consommateur, possède une définition rhéologique complexe. Sa fabrication industrielle, dans le cadre législatif actuel, nécessite la maîtrise d'un procédé bio-technologique qui doit tenir compte de la richesse et de la qualité de la matière première utilisée : le lait, de la variabilité génétique et physiologique du comportement des bactéries lactiques, des nombreuses et diverses opérations technologiques appliquées sur un produit laitier frais vivant.

Ce travail dont l'objectif était à la fois clair et vaste, s'il ne fait qu'ouvrir de nombreuses voies pour des travaux plus approfondis, a néanmoins déjà permis de mettre en relation des réalités expérimentales issues de domaines différents et susceptibles d'applications industrielles importantes.

****

BIBLIOGRAPHIE

BU LILLE I

ABRAHAMSEN R.K. ; HOLMEN T.B., 1980
MILCHWISSENSCHAFT 35,399

ALAIS C., 1984
SCIENCE DU LAIT, PRINCIPES DES TECHNIQUES LAITIERES
Ed. Charles ALAIS

ANDRES D., 1982
NEW FERMENTATION CULTURES FROM GENETIC MANIPULATION PERMITS FOOD FORMULATIONS PREVIOUSLY NOT ATTAINABLE
FOOD PROCESS 43 (5) 41

ANON, 1977
THE INFLUENCE OF THE COOLING RATE ON THE QUALITY OF STIRRED YOGHURT
REPORT N° 225, DANISCH DAIRY RESEARCH INSTITUTE, HILLERED DENMARK

ATKIN G. ; SHERMAN P., 1979
FURTHER APPLICATIONS OF THE MODIFIED GEL RIGIDITY MODULUS APPARATUS.
JOURNAL OF TEXTURE STUDIES, 10, 253-259

BIANCHI-SALVADORI,1983
CARRATTERISTICHE TECHNOLOGICHE DEGLI STARTER DESTINATI ALLA PRODUZIONE DELLO YOGURT.
SCIENZA ET TECHNICA LATTIERO-CASEARIA 34 (5) 336 - 350

BOTTAZI V, 1976
SCIENZA TECHNICA LATTIERO -CASEARIA 27, 415

BOTTAZI V., 1978
YOGHURT : SYMBIOSE ENTRE LES DEUX ESPECES MICROBIENNES SPECIFIQUES
COMMUNICATION AU XX CONGRES INTERNATIONAL DE LAITERIE PARIS 42 ST : 7

BOTTAZI V.,BIANCHI F., 1986
TYPES OF MICROCOLONIES OF LACTIC ACID BACTERIA, FORMATION OF VOID SPACES AND POLYSACCHARIDES IN YOGHURT.
SCIENZA - CASEARIA 37 (4) 297 - 315

BOUILLANNE C. ; DESMAZEAUD M.J., 1980
ETUDE DE QUELQUES CARACTERES DE SOUCHES DE S. THERMOPHILUS UTILISES EN FABRICATION DE YOGHURT ET PROPOSITION D'UNE METHODE DE CLASSEMENT
LE LAIT LX, 458 - 473

BOURNE M.G., 1966
MEASURE OF SHEAR AND COMPRESSION COMPONENTS OF PONCTURE TEST
J. FOOD SCIENCE 31

BOURNE M.C., 1977
LIMITATIONS OF RHEOLOGY IN FOOD TEXTURE MEASUREMENTS
JOURNAL OF TEXTURE STUDIES 8 219 - 227

BOURNE M.C., 1982
FOOD TEXTURE AND VISCOSITY
CONCEPT AND MEASUREMENT
ACADEMIC PRESS, NEW YORK

BROOKER B.E., 1987
THE BEHAVIOUR OF CASEIN MICELLES IN FOOD PROCESSING
DAIRY INDUSTRIES INTERNATIONAL, AOUT

BRULE G., 1986
CHAPITRE 4 : LES MINERAUX IN. LE LAIT : MATIERE PREMIERE DE L'INDUSTRIE LAITIERE
INRA PUBLICATIONS

CASALIS J, 1975
FACTEURS TECHNOLOGIQUES INFLUENCANT LA CONSISTANCE, LA TEXTURE, L'AROME OU LE GOUT DU YAOURT
IND. ALIM. ET AGRI. pp 1253 - 1262

CERNING J. ; BOUILLANNE C. ; DESMAZEAUD M.J. ; LANDON M., 1986
ISOLATION AND CHARACTERIZATION OF EXOCELLULAR POLYSACCHARIDE PRODUCED BY LACTOBACILLUS BULGARICUS
BIOTECHNOLOGY LETTERS VOL 8 N° 9 625 - 628

CERNING J. ; BOUILLANNE C. ; DESMAZEAUD M. ; LANDON M., 1988
EXOCELLULAR POLYSACCHARIDE PRODUCTION BY STREPTOCOCCUS THERMOPHILUS
BIOTECHNOL. LETT. 10, N°4, 255-260

CHALET-WAGNER M., 1979
CONTRIBUTION A L'ETUDE DU CARACTERE EPAISSISSANT DE S. THERMOPHILUSE
MEMOIRE DE FIN D'ETUDES, CNRZ JOUY EN JOSAS

CHARM S.E., 1963
EFFECT OF YIELD STRESS ON THE POWER LAW CONSTANTS OF FLUID FOOD MATERIALS DETERMINED IN LOW SHEAR RATE VISCOSIMETERS
ING. ENG. CLEM. (PROC. DESIGN AND DEV) 2, 62

CONDOM, 1987
RESPONSES OF LACTIC ACID BACTERIA TO OXYGEN
FEMS MICROBIOLOGY REVIEWS 46 269 - 280

COUARRAZE G. ; GROSSIORD J.L., 1983
INITIATION A LA RHEOLOGIE
Ed. TEC ET DOC LAVOISIER PARIS

CUTLER A.N. ; MORRIS E.R. ; TAYLOR L.J., 1983
ORAL PERCEPTION OF VISCOSITY IN FLUID FOODS AND MODELS SYSTEMS
JOURNAL OF TEXTURE STUDIES 14 377 - 395

DAVIES F.L. ; SHAN KAR P.A. ; BROOKER B.E and HOBBS D.G., 1978
JOURNAL OF DAIRY RESEARCH, 45, 53

DE HOMBRE, 1978
PRIVATE COMMUNICATION INST. DE INVESTICIONES INDUSTRIA ALIMENTICIA, HABANA, CUBA IN SZCZESNIAK, 1979

DE KEE D. and Coll, 1983
FLOW PROPERTIES OF TIME - DEPENDENT FOODSTUFFS
JOURNAL OF RHEOLOGY 27 (6) 581 - 604

DE MAN J.M., 1969
FOOD TEXTURE MEASUREMENTS WITH THE PENETRATION METHOD
JOURNAL OF TEXTURE STUDIES 1, 114

DESMAZEAUD M., 1983
L'ETAT DES CONNAISSANCES EN MATIERE DE NUTRITION DES BACTERIES LACTIQUES
LE LAIT 63, 267 - 316

DERVISOGLU M. ; KOKINI J., 1986
STEADY SHEAR RHEOLOGY AND FLUID MECHANIES OF FOUR SEMI SOLID FOODS
JOURNAL OF FOOD SCIENCE VOL 51, N.3 541

DOLEZALEK J. ; HYLMAR B. ; TESARKOVA H., 1972
THE EFFECT OF SOME TECHNOLOGICAL FACTORS ON RHEOLOGICAL PROPERTIES OF SOURED MILK PRODUCTS
SCIENTIFIC PAPERS INSTITUTE OF CHIMICAL TECHNOLOGY PRAGUE E 33

DUTHIE A.H., 1977
CULTURED DAIRY PROD. JOURNAL
12(8), 10

EVES A and KILLAST D., 1987
EMG A NEW CONCEPT IN TEXTURE MEASUREMENTS
PART II - APPLICATIONS TO DAIRY DESSERTS
DAIRY INDUSTRIES INTERNATIONAL 52 (11)

FAVIER J.C., 1987
COMPOSITION DU YAOURT
CAH. NUTR. DIET. XXII, 5

FULLER E.T., 1979
PERSONNAL COMMUNICATION IN TAMIME AND GREIG, 1975

GALESLOOT T.E. ; HASSING F., 1966
F. MISSET'S ZUIVEL 72, 27, CIT. BY DAIRY SCI. ABSTR. 28, 1119

GALEESLOOT T.E. ; HASSING F., 1968
OFFIC. ORG. K. NED. ZUIV., 60 1162

GALESLOOT T.E. ; HASSING F., 1973
HANDHAVEN VAN DE SLIGENSTOF PRODUKTIE VAN YOGHORTCULTUREN
NIZO PUBLICATION

GALESLOOT T.E. ; HASSING F., 1973
VOORGEZETTE ONDERZOEKINGEN OVER DE CONSISTENTIE VAN YOGHURT
NIZO PUBLICATION

GANCEL F., 1988
PHYSIOLOGIE DE LA PRODUCTION DES EXOPOLYSACCHARIDES CHEZ DES SOUCHES INDUSTRIELLES DE S. THERMOPHILUS
THESE, UNIVERSITE DE CAEN

GARNIER J. ; RIBADEAU - DUMAS B., 1970
STRUCTURE OF CASEIN MICELLE
J. DAIRY RESEARCH 37, 493

GIRAFFA G. ; BERGERE S.L., 1987
NATURE DU CARACTERE EPAISSISSANT DE CERTAINES SOUCHES DE S. THERMOPHILUS, ETUDE PRELIMINAIRE
LE LAIT 67 (3) 285-298

GLOVER F.A. ; SKUDDER P.J. ; STOTHART P.H. and EVANS E.W., 1978
JOURNAL OF DAIRY RESEARCH 45, 291

GRIGOROV H., 1966
EFFECT OF HEAT TREATMENT OF COW'S MILK ON THE HYDROPHILIC PROPERTIE OF THE PROTEIN IN BULGARICUS YOGHURT
XVII INTERNATIONAL DAIRY CONGRESS
SECTION F5, 649 PUBLISHED BY XVII INTERNATIONALER MILCHWIRTSCHAFTS KONGRESS E.V. MUNCHEN, F.R. GERMANY

GROUX, 1973
FACTORS AFFECTING VISCOSITY AND WHEY SEPARATION
(bis) THE PRODUCTION OF MUCUS SUBSTANCES
LE LAIT, 53.146 pp63 et pp192 à 194

GUIRGUIS N. ; BROOME M.C. and HICKEY M.W., 1984
THE EFFECT OF PARTIAL REPLACEMENT OF SKIM MILK POWDER WITH WHEY PROTEIN CONCENTRATE ON THE VISCOSITY AND SYNERESIS OF YOGHURT
THE AUSTRALIAN JOURNAL OF DAIRY TECH, MARCH pp 33-35

HARWALKER V.R. et KALAB M., 1980
JOURNAL OF TEXTURE STUDIES, III, 35

HARVEY C.O. ; MORRIS H.A. ; JENNESS R., 1982
RELATION BEETWEEN MELTING AND TEXTURAL PROPERTIES OF PROCESS CHEDDAR CHEESE
J. DAIRY SCI., 65, N° 12

HARWALKAR V.R. ; KALAB M., 1981
SCANNING ELECTRON MICROSCOPY, III, 503

HAUGE S.S. ; OTERHOLM B. ; SOLBERG P., 1974
INFLUENCE DES METHODES DE POMPAGE SUR LES PROPRIETES CHIMIQUES ET PHYSIQUES DU LAIT FERMENTE
XIX CONGRES INTERNATIONAL DE LAITERIE 1E, 739

HEERTJE I. ; VISSER J., SMITS P., 1985
STRUCTURE FORMATION IN ACID MILK GELS
FOOD MICROSTRUCTURE VOL 4 pp 267-277

HELLINGA C. ; SOMSEN D.J. ; KOENRAADS J.P.J.M., 1986
VISCOSITY OF STIRRED YOGHURT : MODERN TECHNIQUES USEFUL IN ANALYSING AND IMPROVING ROUTINE MEASSUREMENTS
NET. MILK DAIRY J. 40 217 - 240

HIGGS S.J. ; NORRINGTON R.J., 1971
RHEOLOGICAL PROPERTIES OF SELECTED FOODSTUFFS
PROCESS BIOCLEMISTRY, 615, 52

HILKER V. , 1947
JOURNAL OF DAIRY SCIENCE, 30 161

HOLDSWORTH S.D., 1971
APPLICABILITY OF RHEOLOGICAL MODELS TO THE INTERPRETATION OF FLOW AND PROCESSING BEHAVIOUR OF FLUID FOOD PRODUCTS
JOURNAL OF TEXTURE STUDIES 2 393 - 418

HYLMAR B. ; HRABOVA H., 1974
INFLUENCE DES FACTEURS TECHNOLOGIQUES SUR DIFFERENTES CARACTERISTIQUES RHEOLOGIQUES DU YOGHURT
COMMUNICATION XIX CONGRES INTERNATIONAL DE LAITERIE p 812

JACQUIN C., 1986
ETUDE INSTRUMENTALE ET SENSORIELLE DE LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE
RAPPORT DE STAGE ENSIA,

JEPSEN S., 1979
CULTURED DAIRY PRODUCTS JOURNAL
14 (1) 5

KALAB M.,1979
JOURNAL OF DAIRY SCIENCE 62, 1352

KALAB M., 1979
SCANNING ELECTRON MICROSCOPY OF DAIRY PRODUCTS
AN OVERREVIEW SCANNING ELCTRON MICROSC. III, 261 - 272

KALAB M., 1983
DEVELOPMENT OF MICROSTRUCTURE IN SET-STYLE NON FAT YOGHURT A REVIEW
FOOD MICROSTRUCTURE VOL 2 pp 51-66

KOKINI J.J. ; KADANE J.B. ; CUSSLER E.L., 1977
LIQUID TEXTURE PERCEIVED IN THE MOUTH
JOURNAL OF TEXTURE STUDIES 8 195-218

KOKINI J.L. ; POOLE M. ; MASON P. ; MILLER S. ; STIER E.F.,1984
IDENTIFICATION OF KEY TEXTURAL ATTRIBUTES OF FLUID AND SEMI SOLID FOODS USING REGRESSION ANALYSIS
J. FOOD SCIENCE 49 : 47

KOKINI J., 1985
FLUID AND SEMI-SOLID FOOD TEXTURE AND TEXTURE TASTE INTERACTIONS
FOOD TECHNOLOGY NOV - 94

KOKINI J.J. ; PLUTCHOK G.J., 1987
VISCOELASTIC PROPERTIES OF SEMI-SOLID FOODS AND THEIR BIOPOLYMERIC COMPONENTS
FOOD TECHNOLOGY MARS

KOKINI J.L., 1987
THE PHYSICAL BASIS OF LIQUID FOOD TEXTURE AND TEXTURE TASTE INTERACTIONS
JOURNAL OF FOOD ENGINEERING 6 51 - 81

KOROLCZUK J. ; MAUBOIS J.L. et coll., 1986
COMPUTERIZED RHEOMETRIC METHOD FOR STUDYING RENNET COAGULACT OF MILK
LE LAIT 66 (2) 99 - 115

KOSIKOWSKA M. ; LIPINSKA E. ; JACUBCZYCK E. ; BIJOK F. et coll, 1979
DAIRY SCIENCE ABST. 41, 110

KRAMER A., 1973
AN ANALYTICAL AND INTEGRATINE APPROCH TO SENSORY EVALUATION OF FOODS
JOURNAL OF THE SCIENCE OF FOOD AND AGRICULTURE 24, N° 11, pp 1407 - 1418

KURMAN J.A., 1967
ETUDE BIOTECHNIQUE SUR LA FABRICATION DU YOGHURT DOUX ET AROMATIQUE (II)
LE LAIT JUIL.AOUT n° 467 pp. 415 - 429

KURMAN J.A., 1972
UNPUBLISHED RESULTATS IN YOGHURT
RASIC AND KURMAN, 1978

LABROPOULOS A.E. ; PALMER J.J. ; LOPEZ A., 1981
WHEY PROTEIN DENATURATION OF U.H.T. PROCESSED MILK AND ITS EFFECT ON RHEOLOGY OF YOGURT
JOURNAL OF TEXTURE STUDIES 12 365-374

LABROPOULOS A.E. et coll., 1981
VISCOSITY APPARENT OF MILK AND CULTURED YOGURT THERMALLY TREATED BY U.H.T. AND VAT SYSTEMS
JOURNAL OF FOOD PROTECTION VOL 44, n°11, pp 874 - 876

LABROPOULOS A.E., COLLINS W.F. ; STONE W.K., 1984
EFFECTS OF ULTRA-HIGH TEMPERATURE AND VAT PROCESSES ON HEAT INDUCED RHEOLOGICAL PROPERTIES OF YOGURT
J. DAIRY SCI 67 pp 405 409

LEIDER P.J. ; BIRD R.B., 1874
SQUEEZING FLOW BETWEEN PARALLEL DISKS
I THEORETICAL ANALYSIS
I AND EC FONDAMENTALS 13 : 336

LENOIR J., 1985
LES CASEINES DU LAIT
REVUE LAITIERE FRANCAISE N° 440 AVRIL

LUQUET F.M., 1987
LAITS ET PRODUITS LAITIERS
ED. TEC ET DOC LAVOISIER

MANCA DE NADRA M.C. ; STRASSER DE SAAD A.M. ; PESCE DE RUIZ ; HOLGADO A.A. and OLIVER G, 1985
EXTRACELLULAR POLYSACCHARIDE PRODUCTION BY LACTOBACILLUS BULGARICUS CRL 420
MILCHWISSENSCHAFT 40 (7) pp 409 à 411

MARTENS, 1972
INFLUENCE DE QUELQUES FACTEURS SUR LA CONSISTANCE ET LE GOUT DU YAOURT BRASSE
REVUE DE L'AGRICULTURE N° 3, mars

MARTLEY F.G., 1983
TEMPERATURE SENSITIVES OF THERMOPHILIC STARTER STRAINS
N.Z. J. DAIRY SCI.TECHNOLOGY, 18 : 191

MEIKLEJOHN P.G., 1977
HOW TO ACHIEVE BETTER YOGHURT VISCOSITY
CULTURED DAIRY PRODUCTS JOURNAL, 1977 pp 6 à 7

MIDOUX N., 1985
MECANIQUE ET RHEOLOGIE DES FLUIDES EN GENIE CHIMIQUE
ED. TEC ET DOC LAVOISIER

MOORE D.F., 1975
PRINCIPLES AND APPLICATIONS OF TRIBOLOGY
PERGAMON PRESS, OXFORD

MORROW C.T. MOHSENIN N.N., 1966
CONSIDERATION OF SELECTED AGRICULTURAL PRODUCTS AS VISCOELASTIC MATERIALS
JOURNAL OF FOOD SCIENCE, 36

MOSKOWITZ H.,
SENSORY EVALUATION BY MAGNITUDE ESTIMATION
FOOD TECHNOLOGY 28, n°11 pp 16-21 (CDIUPA, n° 78071)

ODA M. ; HASEGAWA H. ; KOMATSU S. ; KAMBE M. ; TSUCHIYA F., 1983
ANTI-TUMOR POLYSACCHARIDE FROM LACTOBACILLUS SP.
AGRIC. BIOL. CHEM 47, n°7, 1623-1625

O'NEIL J. ; KLEYN D.H., HARE L.B., 1979
CONSISTENCY AND COMPOSITIONAL CHARACTERISTICS OF COMMERCIAL YOGURTS
J. DAIRY SCI, 62 pp 1032 - 1036

PARNELL-CLUNIES et coll, 1986
PHYSICAL PROPERTIES OF YOGURT :
A COMPARISON OF VAT VERSUS CONTINOUS HEATING SYSTEMS OF MILK
J. DAIRY SCIENCE 69 2593 - 2603

PARNELL-CLUNIES E. et coll, 1987
MICROSTRUCTURE OF YOGURT AS AFFECTED BY HEAT TREATMENT OF MILK
MILCHWISSENSCHAFT 42 (7)

PAYENS T.A., 1982
LES PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DES CASEINES α_{s1}, β et K
LE LAIT 62 306-332

PETTE J.W. ; LOKEME H., 1951
NETHERLAND MILK AND DAIRY JOURNAL 5, 27

PIERSMA H. ; STEENBERGEN A.E., 1973
OFFICIAL ORGAAN FN2 65, 94

PINET B., 1980
METHODES ET PRATIQUE DES PANELS PARIS
TECHNIQUE ET VULGARISATION, 160 p

POSTHUMUS G., 1954
OFFICIAL ORGAAN FNZ 46 55

PRENTICE J.H., 1972
RHEOLOGY AND TEXTURE OF DAIRY PRODUCTS
REVIEW PAPER
J. OF TEXTURE STUDIES, 3, 415 - 458

PRENTICE J.H., 1983
PRECISION AND ACCURACY IN VISCOMETRIC MEASUREMENTS ON FOODS
JOURNAL OF RHEOLOGY, 27 (6) 621 - 635

RADKE - MITCHELL L.C. ; SANDINE W.E., 1986
INFLUENCE OF TEMPERATURE ON ASSOCIATIVE GROWTH OF S.THERMOPHILUS ET L. BULGARICUS
J. DAIRY SCIENCE 69 : 2558 - 2568 n° 10

RAGE, 1985
INCLUSION D'AIR DANS LE LAIT
SCANDINAVIEN JOURNAL OF DAIRY TECHNOLOGY AND KNOW-HOW NM2

RAO M.A., 1977
RHEOLOGY OF LIQUID FOODS - A REVIEW
JOURNAL OF TEXTURE STUDIES 8 135 - 168

RASIC J.L. ; KURMAN J.A., 1978
TECHNICAL DAIRY PUBLISHING HOUSE
JYLLINGEVEY 39, DK 2720 VANLOSE COPENHAGEN, DANEMARK

SALJI J.P. et coll., 1985
EFFECTS OF PROCESSING AND COMPOSITIONNAL PARAMETERS ON QUALITY OF PLAIN LIQUID YOGHURT
MILCHWISSENSCHAFT 40 (12)

SAUVAGEOT F., 1977
BREVE NOTE SUR DEUX SYSTEMES SIMPLES D'EVALUATION DE CARACTERISTIQUES LIEES A LA TEXTURE DU YAOURT
CAHIER DE L'ENSBANA N°1, octobre

SAUVAGEOT F., 1981
CHAPITRE 4 : TECHNIQUES D'ANALYSE SENSORIELLE
TECHNIQUES D'ANALYSES ET DE CONTROLES DANS LES INDUSTRIES AGRO-ALIMENTAIRES
TEC ET DOC LAVOISIER

SAUVAGEOT F., 1982
L'EVALUATION SENSORIELLE DES DENREES ALIMENTAIRES
TEC ET DOC, CDIUPA edition LAVOISIER

SCHELLHASS S.M., 1983
CHARACTERIZATION OF EXOCELLULAR SLIME PRODUCED BY BACTERIAL STARTER CULTURES USED IN MANUFACTURE OF FERMENTED DAIRY PRODUCTS
pHD THESIS UNIVERSITY OF MINESOTA

SCHELLHASS S. ; MORRIS M.A., 1984
CHARACTERIZATION OF EXOCELLULAR SLIME PRODUCED BY BACTERIAL STARTER CULTURES USED IN THE MANUFACTURE OF FERMENTED DAIRY PRODUCTS
FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY DISSERTATION ABSTRACTS INTERNATIONAL VOL. 44 N 09

SCHELLHASS S.M. and MORRIS M.A., 1985
RHEOLOGICAL AND SCANNING ELECTRON MICROSCOPIE EXAMINATION OF SKIM MILK GELS OBTAINED BY FERMENTING WITH ROPY AND NON ROPY STRAINS OF LACTIC ACID BACTERIA
FOOD MICROSTRUCTURE VOL. 4 pp 279-287

SCHMIDT R.H. ; SISTRUNK C.P. ; RICHTER R.L. and CORNELL J.A., 1980
HEAT TREATMENT AND STORAGE EFFECTS ON TEXTURE CHARACTERISTICS OF MILK AND YOGURT SYSTEMS FORTIFIED WITH OILSEED PROTEINS
J. OF FOOD SCIENCE VOL 45

SCHMIDT D.G., 1982
ASSOCIATION OF CASEINS AND CASEINS MICELLE STRUCTURE
IN DEVELOPMENTS IN DAIRY CHEMISTRY
PROTEINES p 61 86 ED PF FOX APPLIC. SCI PUBLISH

SCHMIDT R.H. ; VARGAS M.M. ; SMITH K.L. and JEZESKI J.J., 1985
THE EFFECT OF ULTRA HIGH TEMPERATURE MILK PROCESSING ON YOGHURT
JOURNAL OF FOOD PROCESSING AND PRESERVATION 9 235 - 240

SCOTT BLAIR G.W. ; BURNETT J., 1957
AN APPARATUS FOR MEASURING THE ELASTIC PROPERTIES OF VERY SOFT GELS
LAB. PRACTICE 6, 570 573

SHAMA F. and SHERMAN P., 1973
IDENTIFICATION OF STIMULI CONTROLLING THE SENSORY EVALUATION OF VISCOSITY
ORAL METHODS
JOURNAL OF TEXTURE STUDIES, 4 pp 111-118

SHAMA F. ; PARKINSON C. ; SHERMAN P., 1973
IDENTIFICATION OF STIMULI CONTROLLING THE SENSORY EVALUATION OF VISCOSITY
NON ORALS METHODS
JOURNAL OF TEXTURE STUDIES 4 pp 102-110

STADHOUDERS J. ; VERINGER H.A., 1973
NETH. MILK. DAIRY J. 27 : 77

STEEBERGEN A.E., 1971
OFFICIAL ORGAAN FNZ 63 164, 729 et 996

STONE H. and OLIVER S., 1966
EFFECT OF VISCOSITY ON THE DETECTION OF RELATIVE SWEETNERS INTENSITY OF SUCROSE SOLUTIONS
JOURNAL OF FOOD SCIENCE janvier fevrier

STORCK W., 1959
MILCHMISCHGETRANKE UND SAUER MILCHGETRANKE, EINSCHLIESSLICH YOGHURT UND BIOGHURT
VERLAG THOMAS MANN GmbH, HILDESHEIM, F.R GERMANY pp 144

STORGARDS T., 1964
IN FERMENTED MILK IDF ANNNUAL BULLETIN PART III IDF BRUSSELS, BELGIUM

SZCZESNIAK A.S. ; FARKAS E., 1962
OBJECTIVE CHARACTERIZATION OF THE MOUTHFEEL OF GUM SOLUTION
J. FOOD SCI 27, 381

SZCZESNIAK A.S., 1963
CLASSIFICATION OF TEXTURAL CHARACTERISTICS
J. FOOD SCI 28, 385

SZCZESNIAK A.S. ; BOURNE M.C., 1969
SENSORY EVALUATION OF FOOD FIRMNESS
J. TEXTURE STUDIES 1. 52 - 54

SZCZESNIAK A.S., 1973
INSTRUMENTAL METHODS OF TEXTURE MEASUREMENTS
IN TEXTURE MEASUREMENTS OF FOODS (A. KRAMER and A.S SZCZESNIAK Eds)

SZCZESNIAK A.S., 1975
CONSUMER TEXTURE PROFILE TECHNIQUE
JOURNAL OF FOOD SCIENCE VOL 40 1253

SZCZESNIAK A.S., 1977
RHEOLOGICAL PROBLEMS IN THE FOOD INDUSTRY
JOURNAL OF TEXTURE STUDIES 8 (1977) 119-133

SZCZESNIAK A.S., 1987
CORRELATING SENSORY WITH INSTRUMENTAL TEXTURE MEASUREMENTS AN OVERVIEW OF RECENTS DEVELOPMENTS
JOURNAL OF TEXTURE STUDIES 18 1-15

TAMIME A.Y. et ROBINSON R.K., 1978
SOME ASPECTS OF THE PRODUCTION OF A CONCENTRATED YOGHURT (LABNEH) POPULAR IN THE MIDDLE EAST
MIELCHWISSENSCHAFT 33 (4) 209- 212

TAMIME A.Y. ; GREIG R.I.W., 1979
SOME ASPECT OF YOGHURT TECHNOLOGY
DAIRY INDUSTRIES INTERNATIONAL, september

TAMIME A.Y. ; DEETH H.C., 1980
YOGURT : TECHNOLOGY AND BIOCHEMISTRY
JOURNAL OF FOOD PROTECTION VOL 43, december

TAMIME et coll, 1984
MICROSTRUCTURE OF SET-STYLE YOGHURT MANUFACTURE FROM COW'S MILK FORTIFIED BY VARIOUS METHODS
FOOD MICROSTRUCTURE VOL 3 pp 83 - 92

TAMIME A.Y. ; ROBINSON R.K., 1985
YOGHURT SCIENCE AND TECHNOLOGY
ED. PERGAMON PRESS

TANAKA M. ; DE MAN J.M., 1971
MEASUREMENT OF TEXTURAL PROPERTIES OF FOODS WITH A CONSTANT SPEED CONE PENETROMETER
JOURNAL OF TEXTURE STUDIES 2, 305- 315

TERRE S., 1986
PROPRIETES TECHNOLOGIQUES NUTRITIONELLES ET PHYSIOLOGIQUES DE STREPTOCOCCUS THERMOPHILUS ET LACTOBACILLUS BULGARICUS
TECH. LAIT. MARK n° 1008, 26-39

THOMPSON J., 1987
REGULATION OF SUGAR TRANSPORT AND METABOLISM IN LACTIC ACID BACTERIA
FEMS MICROBIOLOGY REVIEWS 46 221 - 231

TSUCHIYA F. ; MIYAZA W.A.K. ; KANBE M. ; ODA M. et EBISAWA N., 1981
UK PATENT APPLICATION N° 8135111

VAN HOOYDONK A.C.M. ; HAGEDOERN H.G. and VAN WHIET, 1984
ZVIVELZICHT 17 (15) : 19 - 21

VAN VLIET T. ; DENTENER-KIKERT A., 1982
INFLUENCE OF THE COMPOSITION OF THE MILK FAT GLOBULE MEMBRANE ON THE ACID MILK GELS
NETH. MILK DAIRY J., 36 pp 261 à 265

VEDAMUTHU E.R., 1982
STABILIZER PRODUCING STREPTOCOCCUS THERMOPHILUS
U.S. PATENT 4, 339, 464

WALSTRA P. ; JENNESS R., 1984
DAIRY CHEMISTRY AND PHYSICS
ED WILEYS AND SONS

WOOD F.W., 1968
PSYCHOPHYSICAL STUDIES ON THE CONSISTENCY OF LIQUID FOODS
S.C.I. MONOGRAPH N° 27

WOOD F.W., 1974
AN APPROACH TO UNDERSTANDING CREAMINESS
DIE STARKE 26, JAHRG 1974, nr 4

WOOD F.W., 1974
THE APPLICATION OF PSYCHOPHYSICS TO THE FOOD INDUSTRY WITH SPECIAL REFERENCE TO THE TEXTURES OF LIQUID FOOD AND GELS
PROC. IV INT. CONGRESS FOOD SCI AND TECHNOL VOL II, p 273 - 276

YOSHIKAWA S. ; NISHIMARU S. ; TASHIRO T. ; YOSHIDA M., 1970
COLLECTION AND CLASSIFICATION OF WORDS AND DESCRIPTION OF FOOD TEXTURE
J. TEXTURE STUDIES 1 : 437, 443, 452

DOCUMENTS ARILAIT

RAPPORTS DE STAGES ET DOCUMENTS SODIMA

AUDRAIN S., 1985
CARACTERISATION DES SOUCHES DE YAOURTS BRASSES
OPTIMISATION DES PARAMETRES DE FABRICATION
MEMOIRE SODIMA - C.R.I.A.G.

BALLONGUE J., 1987
MAITRISE DU COMPORTEMENT DES BACTERIES LACTIQUES DANS LA TRANSFORMATION DU LAIT
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE ARILAIT

CONTRAT INRA- SODIMA, 1979
ETUDE DU CARACTERE EPAISSISSANT DE SOUCHES DE S. THERMOPHILUS ET L. BULGARICUS

DIVISION TECHNIQUE SODIMA, 1985
CAHIER DES CHARGES YAOURT BRASSE

DOCO T., 1986
CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'EXOPOLYSACCHARIDE PRODUIT PAR S. THERMOPHILUS BACTERIE LACTIQUE INTERVENANT DANS LA FABRICATION DU YAOURT
MEMOIRE D.E.A., UNIVERSITE DE LILLE, SODIMA C.R.I.A.G.

FALCONNIER P., 1987
ETUDE DE LA TEXTURE D'UN PRODUIT LAITIER FRAIS A L'AIDE DU RHEOMETRE CARRIMED
MEMOIRE INGENIEUR ENSIA MASSY, SODIMA C.R.I.A.G.

GIRAULT M., 1985
OPTIMISATION DE LA QUALITE DES YAOURTS BRASSES
MEMOIRE STAGE SODIMA ULPAC TOULOUSE

MARBOEUF B., 1986
MISE AU POINT D'UN RHEOMETRE
MEMOIRE INGENIEUR ENSA RENNES, SODIMA C.R.I.A.G.

MONTES J., 1980
AMELIORATION ET CONTROLE DE LA VISCOSITE DU YAOURT BRASSE
E.N.I.L. SURGELES RAPPORT DE STAGE

MOREAU N., 1987
METHODES D'EVALUATION SENSORIELLE DES PRODUITS LAITIERS FRAIS
MEMOIRE INGENIEUR ISA SODIMA C.R.I.A.G.

SCHER J. ET HARDY J., 1987
STRUCTURE ET TAILLE DES MICELLES DE CASEINE, INFLUENCE SUR LA COAGULATION DU LAIT
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE ARILAIT PROGRAMME PROTEINES

LISTE DES ANNEXES

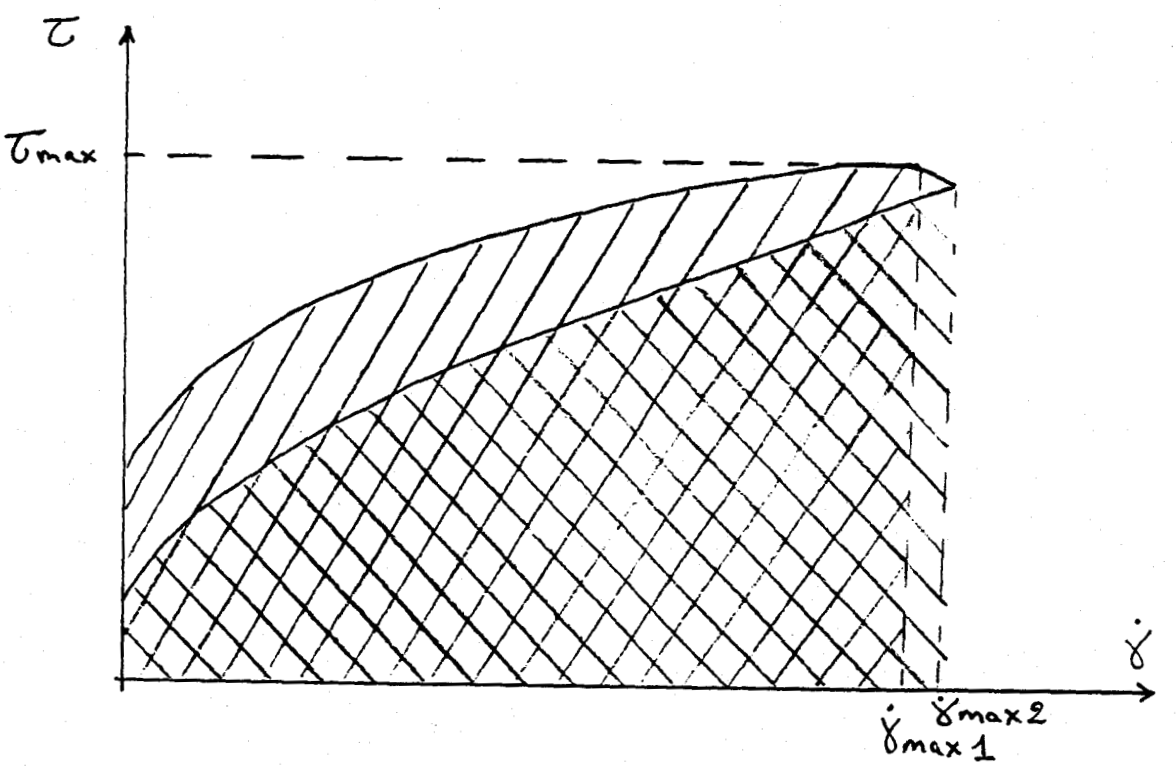
NUMERO		TITRE	PAGE
01		CALCUL DE LA SURFACE DE THIXOTROPIE	213
02		COMPARAISON DES AJUSTEMENTS, SELON HERSCHEL-BULKLEY OU SELON UNE LOI EN PUISSANCE, DES RHEOGRAMMES (courbe montante) DU YAOURT BRASSE	214 à 217
03		REDUCTION DES DESCRIPTEURS SENSORIELS DU YAOURT BRASSE PAR L'A.F.C. : TABLEAU DES VARIABLES	218 à 220
04		DEMARCHE SUIVIE POUR APPROCHER LA REPETABILITE DU JURY D'EVALUATION SENSORIELLE	221
05		COMPTE-RENDU DE SEANCE D'EVALUATION SENSORIELLE	222
06		EDITION DES VALEURS PROPRES ET TABLEAU DES COORDONNEES DES VARIABLES EN A.C.P. : EXEMPLE DES CORRELATIONS SENSORIELLES / RHEOLOGIQUES	223
07	(A)	FICHIER GENERAL DES VARIABLES, MESUREES SUR DIFFERENTS LOTS DE YAOURT BRASSE, POUR L'ETUDE DES CORRELATIONS ENTRE L'EVALUATION SENSORIELLE ET LA RHEOLOGIE DU YAOURT BRASSE	224
07	(B)	ETUDE DE LA RELATION LINEAIRE ENTRE L'ASPECT EPAIS (TEP) ET LE COEFFICIENT DE CONSISTANCE (K)	226
07	(C)	ETUDE DE LA RELATION LINEAIRE ENTRE L'ASPECT FILANT (FIL) ET L'INDICE D'ECOULEMENT (n)	227
08		INFLUENCE DE L'E.S.D., AUGMENTE PAR ADJONCTION CROISSANTE DE POUDRE DE LAIT ECREME, SUR LES CARACTERISTIQUES RHEOLOGIQUES DU YAOURT BRASSE	228
09		INFLUENCE COMPAREE DE FACTEURS DU PROCEDE DE FABRICATION : DEUX ETUDES PRELIMINAIRES COMPLEMENTAIRES	229 à 232
10		COMPROMIS ENTRE LA "VISCOSITE BROOKFIELD" ET L'ACIDITE DORNIC EN FONCTION DE LA TEMPERATURE EN SORTIE DU REFROIDISSEUR DU YAOURT BRASSE	233
11		EXPRESSION DES ALEAS DE REPETABILITE DU PROCEDE, UTILISEE POUR COMPARER LES CARACTERISTIQUES DES YAOURTS TEMOINS ET ESSAIS	234
12		REPRODUCTION DES ENREGISTREMENTS DISQUES ("TAYLOR") DES TEMPERATURES EN SORTIE DE PASTEURISATEUR (A) EN SORTIE DE REFROIDISSEUR (B)	235

ANNEXE 1

CALCUL DE LA SURFACE DE THIXOTROPIE

La méthode calcul de la surface de thixotropie par le logiciel CARRIMED consiste à faire la différence entre l'aire sous la "courbe montante" et l'aire sous la "courbe descendante"

Pour certains rhéogrammes (voir l'exemple de la figure ci-dessous) il peut arriver que l'aire soit ainsi légèrement sous estimée.

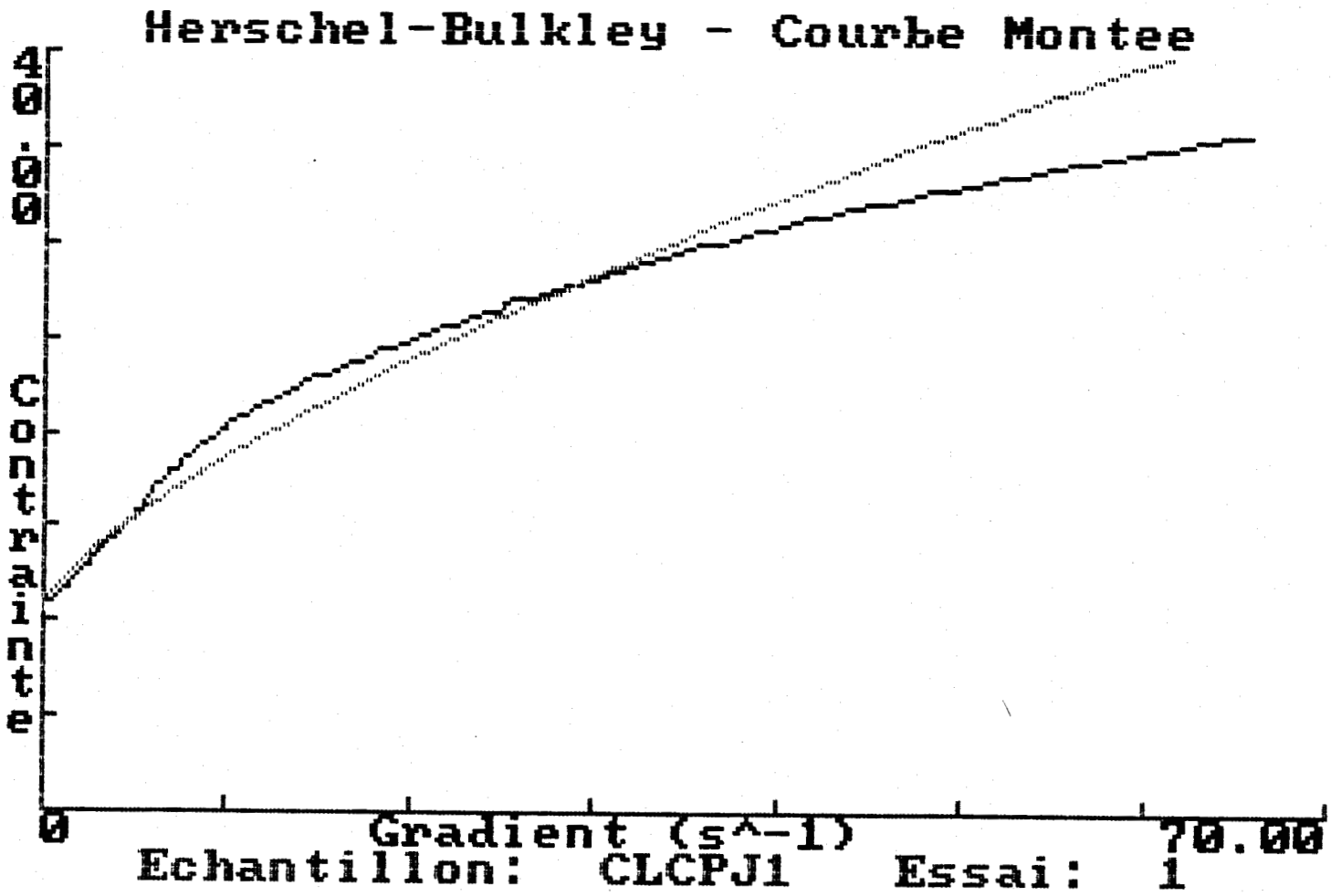


Dans ce cas, la vitesse de cisaillement ($\dot{\gamma}_{max1}$) correspondant à τ_{max} à la fin de la courbe montante est inférieure à $\dot{\gamma}_{max2}$, vitesse correspondante à la première contrainte de la courbe retour. Le calcul de la surface de thixotropie s'en trouve affecté.

ANNEXE 2

COMPARAISON DES AJUSTEMENTS, SELON HERSCHEL BULKLEY OU SELON UNE LOI EN PUISSANCE, DES RHEOGRAMMES (courbe montante) DU YAOURT BRASSE

2 (A) : AJUSTEMENT GLOBAL SELON HERSCHEL-BULKLEY



Rhéomètre Carri-Med - Analyse Courbe d'Ecoulement 01/01/80

Herschel-Bulkley - Courbe Montée Complète

Coefficient de régression: 0.98282

Dispersion: 50.68

Surface de thixotropie: 242.5 N.s/m^2

Contrainte = A + B * Gradient de vitesse ^ C

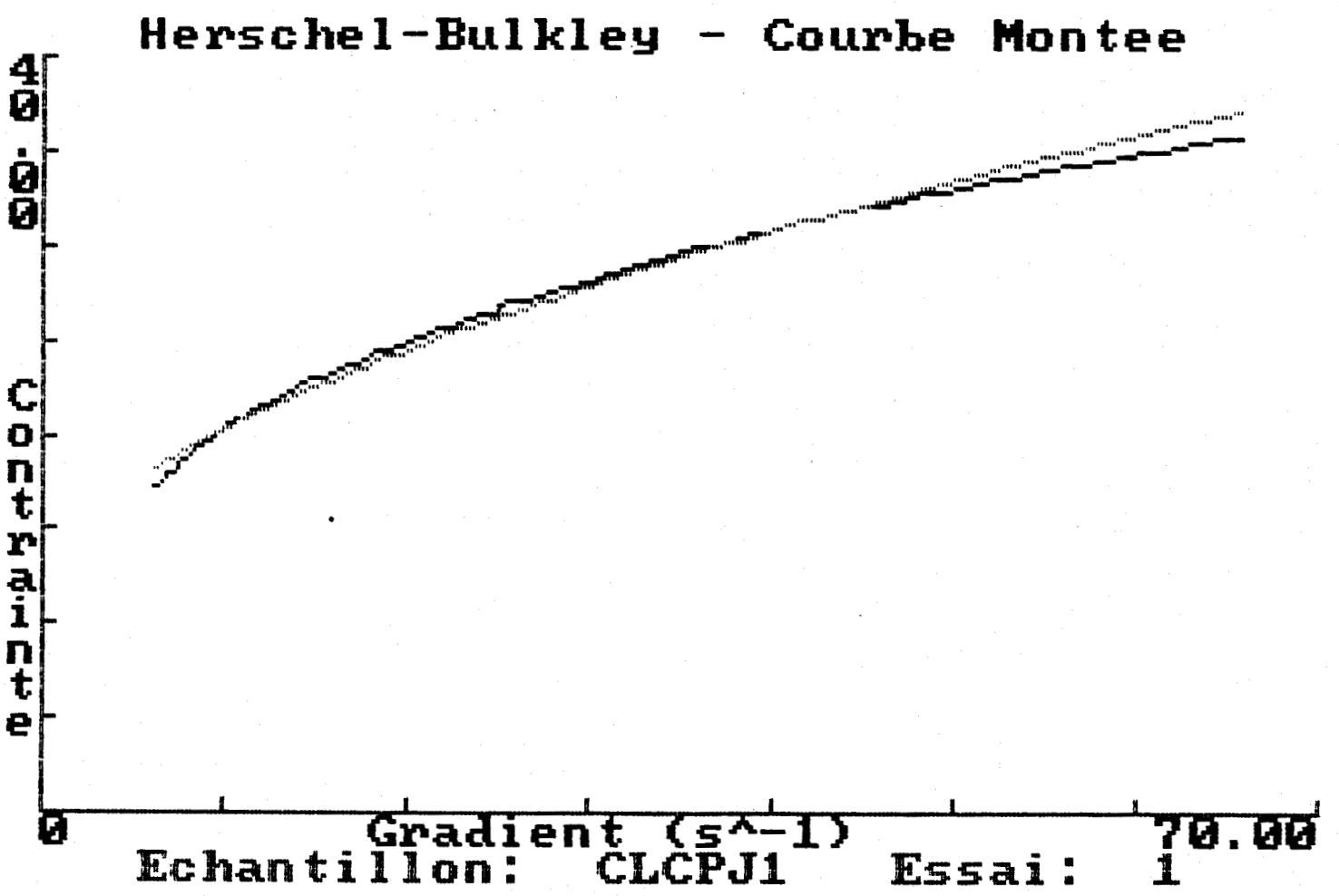
Seuil d'écoulement: 10.01 N/m^2

(A) Seuil d'écoulement: 10.44 N/m^2

(B) Viscosité plastique: 1.657

(C) Indice de gradient de vitesse: 0.6987

2 (B) : AJUSTEMENT PARTIEL SELON HERSCHEL-BULKLEY



Viscosité limite basse: 2.859 Pa.s

Viscosité limite haute: 0.5446 Pa.s

Rhéomètre Carri-Med - Analyse Courbe d'Ecoulement

Herschel-Bulkley - Courbe Montée Partielle

Coefficient de régression: 0.99557

Dispersion: 14.68

Surface de thixotropie: 242.5 N.s/m^2

Contrainte = A + B * Gradient de vitesse ^ C

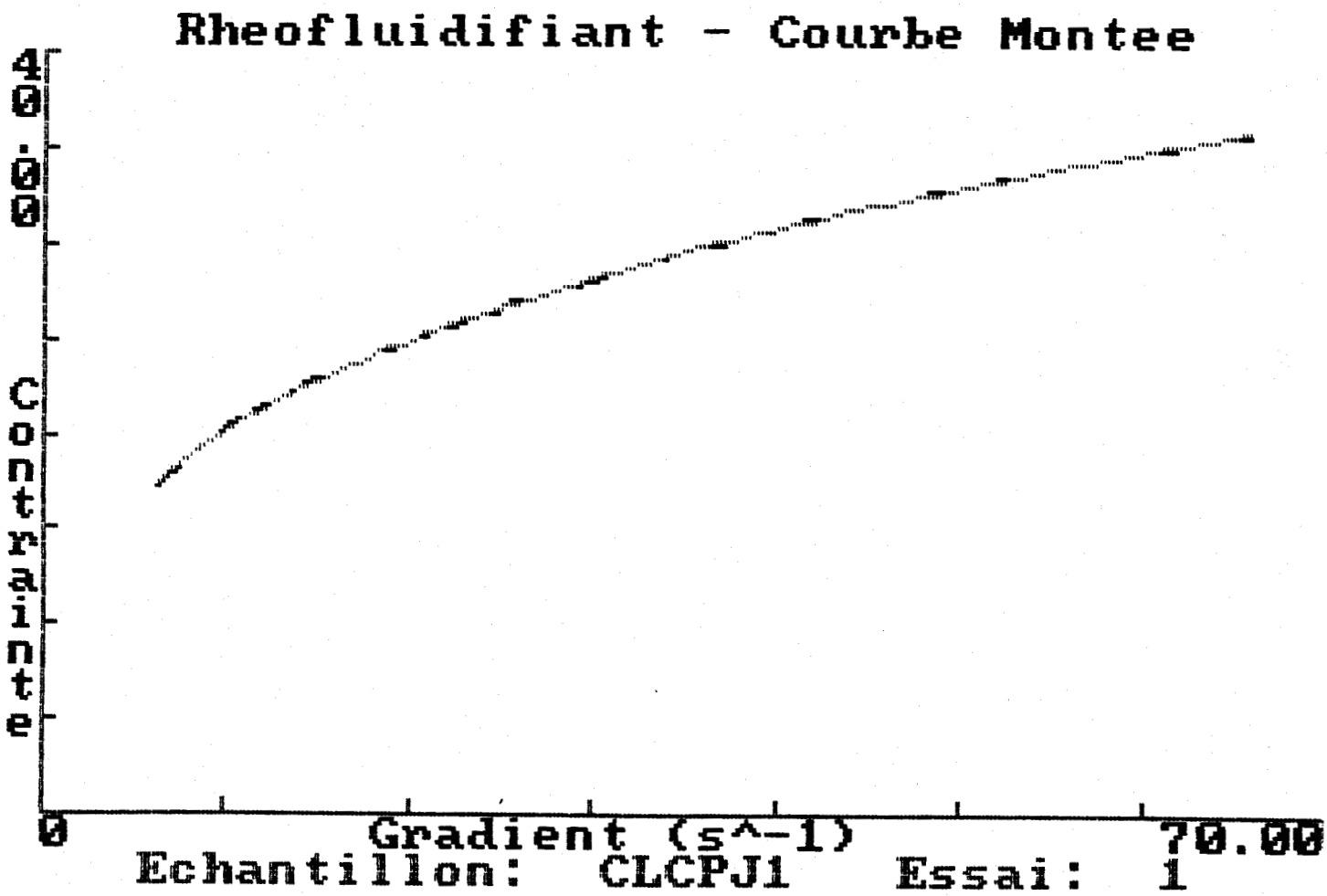
Seuil d'écoulement: 10.01 N/m^2

(A) Seuil d'écoulement: 12.15 N/m^2

(B) Viscosité plastique: 2.077

(C) Indice de gradient de vitesse: 0.5949

2 (C) : AJUSTEMENT PARTIEL SELON L'EQUATION EN PUISSANCE



Rhéomètre Carri-Med - Analyse Courbe d'Ecoulement 01/01/80

Rheofluidifiant - Courbe Montée Partielle

Coefficient de régression: 0.99982

Dispersion: 2.475

Surface de thixotropie: 242.5 N.s/m^2

Contrainte = B * Gradient de vitesse ^ C

(B) Viscosité plastique: 10.04

(C) Indice de gradient de vitesse: 0.3041

ANNEXE 3

REDUCTION DES DESCRIPTEURS SENSORIELS DU YAOURT BRASSE PAR L'A.F.C. : TABLEAU DES VARIABLES

VALEURS PROPRES

1RE LIGNE : VALEURS PROPRES (VARIANCES SUR LES AXES PRINCIPAUX)
2E LIGNE : CONTRIBUTION A L'INERTIE TOTALE (POURCENTAGES EXPLIQUES PAR LES AXES PRINCIPAUX)

0.5994	0.4290	0.2578	0.1186
40.9 %	29.3 %	17.6 %	8.1 %

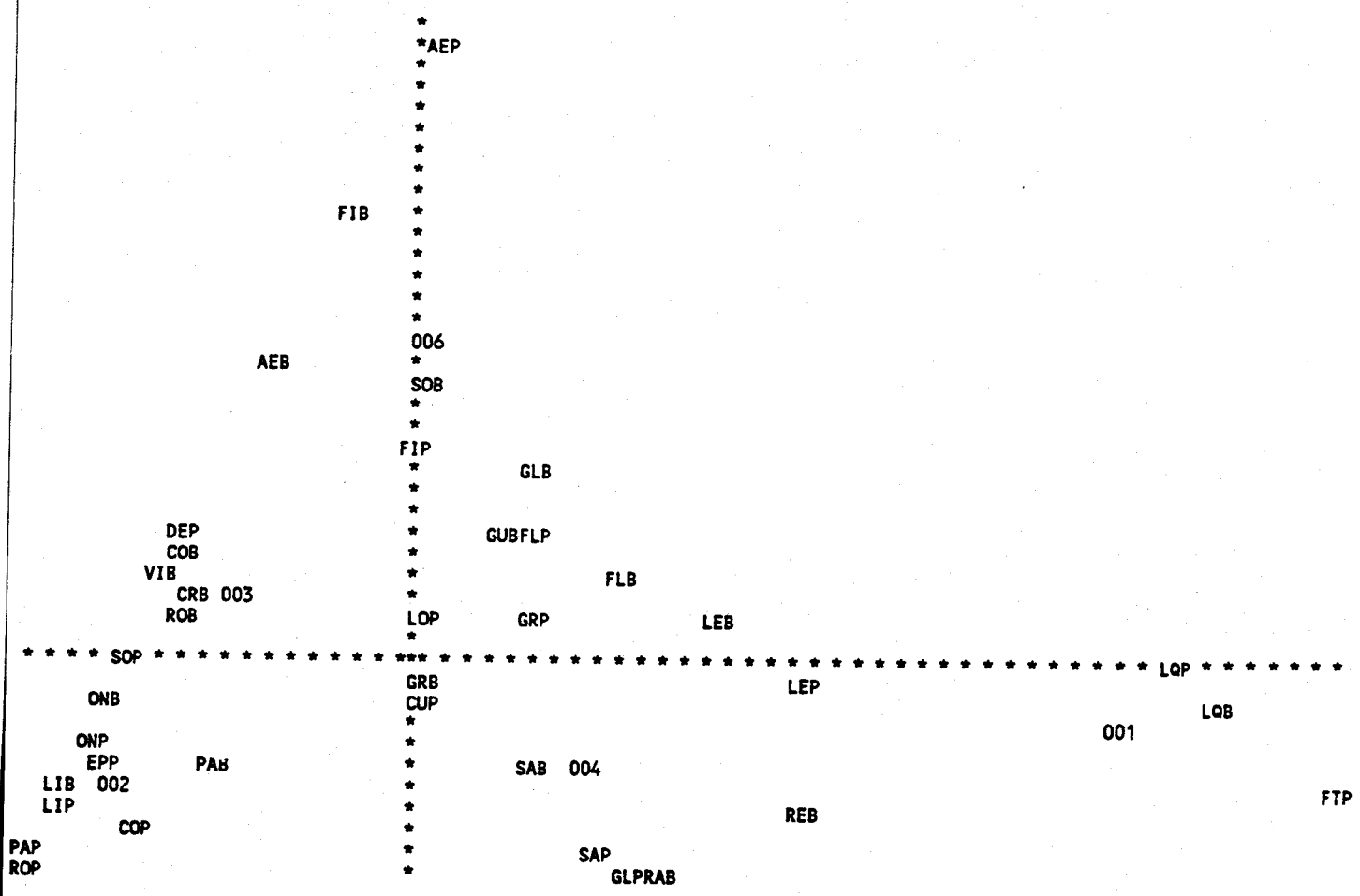
POUR CHAQUE AXE :
1RE COLONNE:COORDONNEE
2E COLONNE:COSINUS CARRES (QUALITE DE LA REPRESENTATION)
3E COLONNE:CONTRIBUTION RELATIVE A L'INERTIE EXPLIQUEE PAR L'AXE

COLONNES AXES PRINCIPAUX

	AXE 1			AXE 2			AXE 3			AXE 4		
AEP **	0.042	0.000	0.0 *	-0.123	0.003	0.1 *	1.998	0.813	26.2 *	-0.874	0.156	10.9 *
COP **	-0.616	0.522	0.9 *	0.057	0.004	0.0 *	-0.538	0.398	1.7 *	-0.185	0.047	0.4 *
CUP **	0.029	0.002	0.0 *	0.515	0.620	1.0 *	-0.130	0.039	0.1 *	-0.204	0.097	0.6 *
CRP **	0.029	0.002	0.0 *	0.515	0.626	1.0 *	-0.130	0.040	0.1 *	-0.203	0.097	0.6 *
DEP **	-0.511	0.059	0.1 *	0.041	0.000	0.0 *	0.443	0.045	0.2 *	1.941	0.858	6.7 *
EPP **	-0.692	0.644	5.9 *	0.315	0.133	1.7 *	-0.326	0.142	3.0 *	-0.202	0.055	2.5 *
FIP **	0.015	0.000	0.0 *	-0.067	0.004	0.1 *	0.671	0.397	9.6 *	0.814	0.584	30.7 *
FLP **	0.265	0.184	0.6 *	-0.083	0.018	0.1 *	0.438	0.501	4.1 *	-0.262	0.180	3.2 *
FTP **	2.077	0.775	12.2 *	1.029	0.190	4.2 *	-0.429	0.033	1.2 *	0.097	0.002	0.1 *
FOP **	0.042	0.000	0.0 *	-0.123	0.003	0.0 *	1.998	0.813	6.5 *	-0.874	0.156	2.7 *
FDP **	-0.742	0.628	0.6 *	0.359	0.147	0.2 *	-0.337	0.129	0.3 *	0.290	0.096	0.5 *
GLP **	0.501	0.042	0.1 *	-2.269	0.865	2.5 *	-0.718	0.087	0.4 *	-0.183	0.006	0.1 *
GUP **	-0.742	0.628	0.6 *	0.359	0.147	0.2 *	-0.337	0.129	0.3 *	0.290	0.096	0.4 *
LEP **	0.885	0.954	3.3 *	-0.115	0.016	0.1 *	-0.061	0.005	0.0 *	-0.002	0.000	0.0 *
LQP **	1.718	0.811	17.7 *	0.826	0.187	5.7 *	-0.001	0.000	0.0 *	-0.076	0.002	0.2 *
LOP **	0.022	0.001	0.0 *	-0.324	0.164	0.5 *	0.148	0.034	0.2 *	0.641	0.642	6.6 *
ONP **	-0.713	0.481	3.8 *	0.341	0.110	1.2 *	-0.304	0.087	1.6 *	0.265	0.066	2.6 *
PAP **	-0.865	0.250	1.8 *	0.544	0.099	1.0 *	-0.623	0.130	2.2 *	-0.803	0.215	8.0 *
RAP **	0.501	0.042	0.1 *	-2.269	0.865	2.5 *	-0.718	0.087	0.4 *	-0.183	0.006	0.1 *
ROP **	-0.855	0.391	1.0 *	0.518	0.144	0.5 *	-0.727	0.283	1.7 *	-0.541	0.156	2.1 *
SAP **	0.423	0.036	0.8 *	-2.091	0.882	28.0 *	-0.629	0.080	4.2 *	-0.018	0.000	0.0 *
SOP **	-0.630	0.792	1.0 *	0.290	0.168	0.3 *	-0.003	0.000	0.0 *	0.126	0.032	0.2 *
VIP **	0.501	0.042	0.1 *	-2.269	0.864	2.5 *	-0.724	0.088	0.4 *	-0.183	0.006	0.1 *
LIP **	-0.788	0.591	1.1 *	0.421	0.169	0.4 *	-0.491	0.230	1.0 *	-0.043	0.002	0.0 *
GRP **	0.284	0.035	0.3 *	-1.475	0.944	11.8 *	0.128	0.007	0.1 *	-0.177	0.014	0.6 *
AEB **	-0.324	0.091	0.1 *	0.087	0.007	0.0 *	0.964	0.810	3.0 *	-0.176	0.027	0.2 *
COB **	-0.522	0.418	1.0 *	0.241	0.089	0.3 *	0.368	0.208	1.1 *	-0.251	0.097	1.1 *
CUB **	-0.857	0.394	0.5 *	0.518	0.144	0.3 *	-0.726	0.283	0.9 *	-0.533	0.152	1.0 *
CRB **	-0.494	0.685	1.8 *	0.116	0.037	0.1 *	0.187	0.098	0.6 *	0.027	0.002	0.0 *
DEB **	0.501	0.042	0.2 *	-2.270	0.864	5.1 *	-0.721	0.087	0.9 *	-0.182	0.006	0.1 *
EPB **	-0.648	0.646	2.1 *	0.210	0.068	0.3 *	-0.344	0.182	1.4 *	-0.234	0.084	1.4 *
FIB **	-0.143	0.009	0.0 *	-0.068	0.002	0.0 *	1.480	0.981	5.4 *	0.068	0.002	0.0 *
FLB **	0.483	0.585	0.6 *	0.010	0.000	0.0 *	0.284	0.202	0.5 *	0.010	0.000	0.0 *
FTB **	2.077	0.775	15.2 *	1.029	0.190	5.2 *	-0.429	0.033	1.5 *	0.100	0.002	0.2 *
FDB **	-0.624	0.765	2.6 *	0.289	0.164	0.8 *	0.002	0.000	0.0 *	0.085	0.014	0.2 *
GLB **	0.273	0.034	0.1 *	-1.196	0.644	2.8 *	0.640	0.184	1.3 *	-0.534	0.129	2.0 *
GUB **	0.205	0.062	0.1 *	-0.454	0.306	0.8 *	0.432	0.277	1.2 *	0.482	0.345	3.3 *
LEB **	0.702	0.778	1.9 *	0.022	0.001	0.0 *	0.126	0.025	0.1 *	-0.335	0.177	2.2 *
LQB **	1.823	0.806	9.4 *	0.885	0.190	3.1 *	-0.125	0.004	0.1 *	-0.024	0.000	0.0 *
LOB **	0.043	0.000	0.0 *	-0.118	0.003	0.0 *	1.998	0.813	3.3 *	-0.875	0.156	1.4 *
ONB **	-0.682	0.771	3.3 *	0.336	0.187	1.1 *	-0.154	0.040	0.4 *	0.032	0.002	0.0 *
PAB **	-0.440	0.377	0.6 *	-0.260	0.132	0.3 *	-0.335	0.219	0.8 *	0.371	0.267	2.2 *
RAB **	0.565	0.230	1.2 *	-0.618	0.276	2.1 *	-0.681	0.335	4.2 *	-0.102	0.007	0.2 *
ROB **	-0.518	0.634	1.8 *	0.099	0.023	0.1 *	0.150	0.053	0.4 *	0.306	0.222	3.2 *
SAB **	0.264	0.053	0.3 *	-1.057	0.852	6.1 *	-0.341	0.089	1.0 *	-0.090	0.006	0.2 *
SOB **	0.019	0.000	0.0 *	-0.619	0.305	0.8 *	0.930	0.691	2.8 *	0.002	0.000	0.0 *
VIB **	-0.549	0.554	0.8 *	0.247	0.113	0.2 *	0.283	0.148	0.5 *	-0.092	0.016	0.1 *
LIB **	-0.774	0.574	0.8 *	0.407	0.159	0.3 *	-0.398	0.152	0.5 *	-0.008	0.000	0.0 *
GRB **	0.028	0.001	0.0 *	-1.056	0.930	3.3 *	-0.050	0.002	0.0 *	-0.063	0.003	0.0 *
CPB **	-0.742	0.628	0.6 *	0.359	0.147	0.2 *	-0.337	0.129	0.3 *	0.290	0.096	0.4 *
REB **	0.895	0.626	2.8 *	-0.444	0.154	1.0 *	-0.502	0.197	2.1 *	0.141	0.015	0.4 *

ANNEXE 3

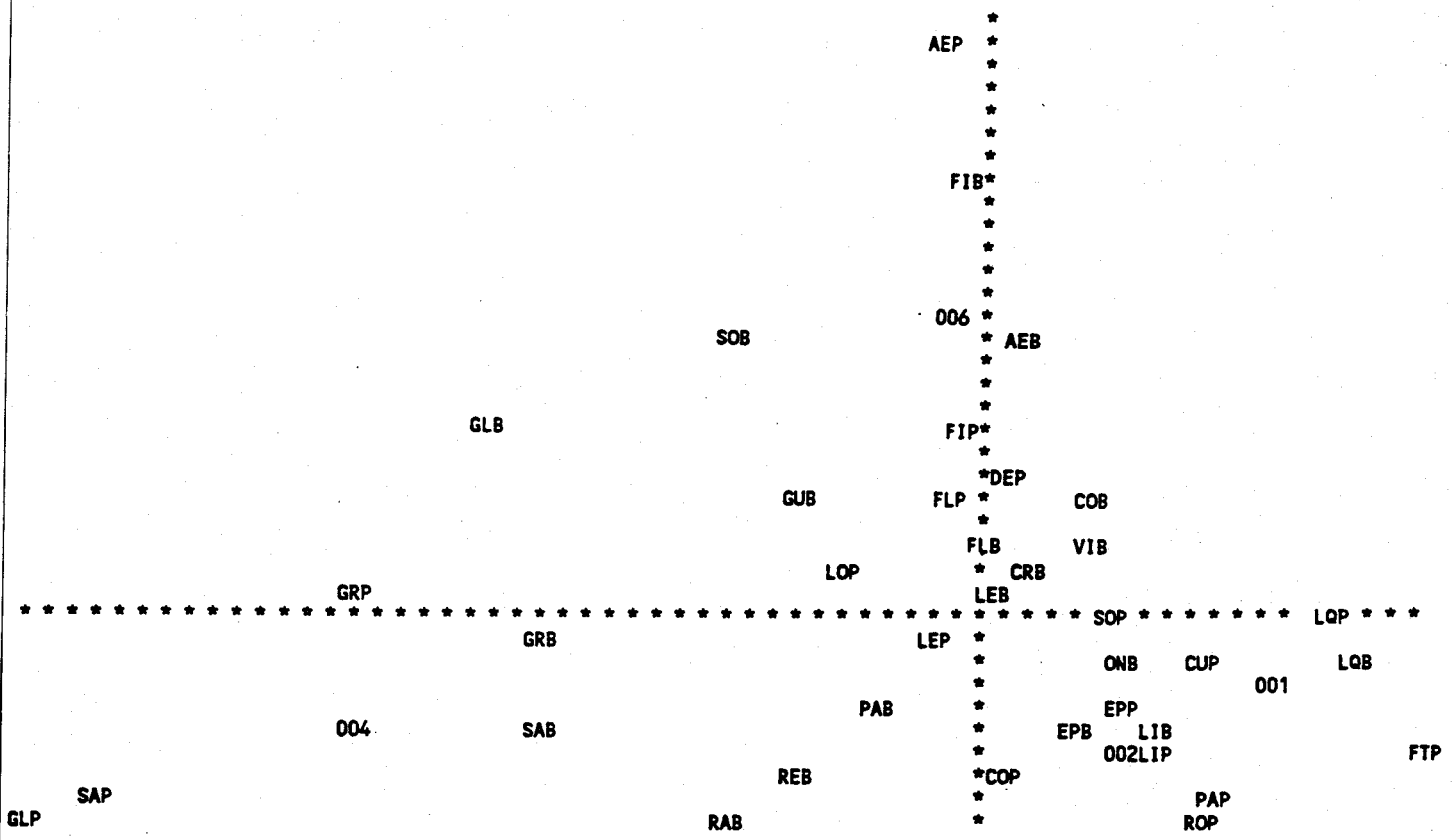
REPRESENTATION SIMULTANEE DES LIGNES (Observations) ET COLONNES (Variables) ***
PLAN 1 3 AXE 1 HORIZONTAL AXE 3 VERTICAL



POINT VU : CUP	POINT CACHE : CRP
POINT VU : AEP	POINT CACHE : FOP
POINT VU : EPP	POINT CACHE : FDP
POINT VU : EPP	POINT CACHE : GUP
POINT VU : GLP	POINT CACHE : RAP
POINT VU : GLP	POINT CACHE : VIP
POINT VU : ROP	POINT CACHE : CUB
POINT VU : GLP	POINT CACHE : DEB
POINT VU : EPP	POINT CACHE : EPB
POINT VU : FTP	POINT CACHE : FTB
POINT VU : SOP	POINT CACHE : FDB
POINT VU : AEP	POINT CACHE : LOB
POINT VU : EPP	POINT CACHE : CPB
POINT VU : ONP	POINT CACHE : 005

ANNEXE 3

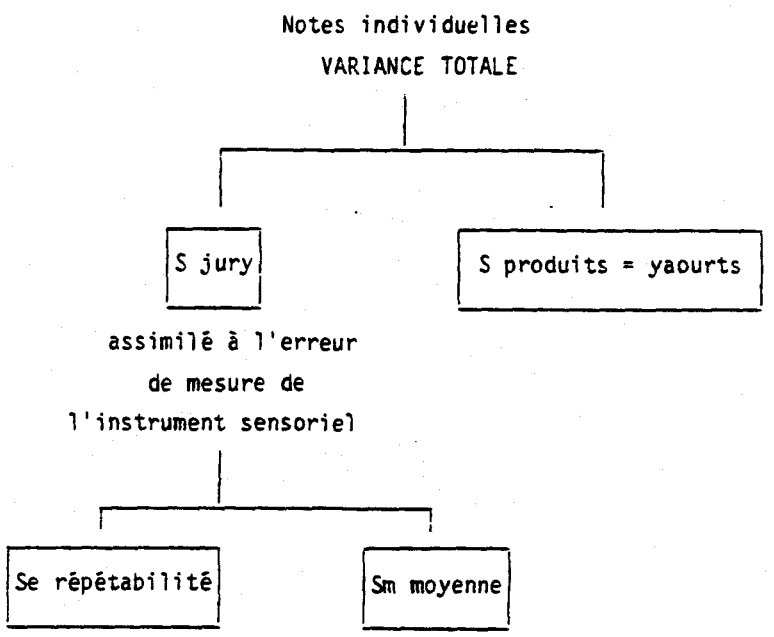
REPRESENTATION SIMULTANEE DES LIGNES (Observations) ET COLONNES (Variables) ***
PLAN 2 3 AXE 2 HORIZONTAL AXE 3 VERTICAL



POINT VU :	CUP	POINT CACHE :	CRP
POINT VU :	AEP	POINT CACHE :	FOP
POINT VU :	EPP	POINT CACHE :	FDP
POINT VU :	EPP	POINT CACHE :	GUP
POINT VU :	EPP	POINT CACHE :	ONP
POINT VU :	GLP	POINT CACHE :	RAP
POINT VU :	GLP	POINT CACHE :	VIP
POINT VU :	ROP	POINT CACHE :	CUB
POINT VU :	GLP	POINT CACHE :	DEB
POINT VU :	FTP	POINT CACHE :	FTB
POINT VU :	SOP	POINT CACHE :	FDB
POINT VU :	AEP	POINT CACHE :	LOB
POINT VU :	CRB	POINT CACHE :	ROB
POINT VU :	EPP	POINT CACHE :	CPB
POINT VU :	FLB	POINT CACHE :	003
POINT VU :	EPP	POINT CACHE :	005

ANNEXE 4

DEMARCHE SUIVIE POUR APPROCHER LA REPETABILITE DU JURY D'EVALUATION SENSORIELLE



- On effectue un traitement statistique par analyse de la variance ; ceci permet de trouver, sous réserve que les produits soient significativement différents pour le critère concerné des groupes homogènes de produits par une typologie.

- On fait l'hypothèse qu'au sein de ce groupe trouvé homogène par l'ensemble du jury, un dégustateur doit aussi noter de la même façon tous les produits du groupe.

- On cherche l'écart-type du dégustateur pour chaque groupe de yaourts ; ensuite, on fusionne (tests de BARTLETT) les écarts types obtenus sur chaque groupe, pour obtenir un écart-type caractérisant le dégustateur sur un descripteur.

- La même démarche de fusion des écarts-types individuels des juges permet de connaître Sr écart type du jury pour un descripteur.

S = écart-type

ANNEXE 5

COMPTE-RENDU DE SEANCE D'EVALUATION SENSORIELLE

SODIMA -CRI

SEANCE D'EVALUATION SENSORIELLE

ORGANISATEUR :

DATE ET HEURE :

PRODUITS :

TITRE ETUDE :

NOMBRE DE PRODUITS A DEGUSTER :

NOMBRE DE DEGUSTATEURS :

NOMBRE DE PRODUITS PAR DEGUSTATEUR :

NOMBRE DE REPETITIONS (1 EN GENERAL) :

FICHE EVALUATION SENSORIELLE :

CODAGE DES PRODUITS :

NOMS DES DEGUSTATEURS :

FICHIER DE TRAITEMENT DES DONNEES :

OBSERVATIONS :

ANNEXE 6

EDITION DES VALEURS PROPRES ET TABLEAU DES COORDONNEES DES VARIABLES EN A.C.P. : EXEMPLE DES CORRELATION SENSORIELLES/RHEOLOGIQUE

- EDITION DES VALEURS PROPRES -

AXE	VALEUR PROPRE	INERTIE EXPLIQUEE %	% CUMULE	HISTOGRAMME
1	7.39	52.76	52.76	==========
2	2.35	16.79	69.56	=======
3	1.24	8.84	78.40	====
4	.86	6.16	84.56	==
5	.76	5.41	89.98	==
6	.52	3.72	93.70	=
7	.35	2.48	96.18	=
8	.21	1.49	97.68	=
9	.12	.87	98.55	
10	.10	.73	99.28	
11	.08	.55	99.82	
12	.02	.13	99.96	
13	.01	.04	100.00	
14	.00	.00	100.00	

FICHIER : c:reges_01 + ANALYSE DES VARIABLES +

+ VARIABLES PRINCIPALES +

VAR	AXE N° 1 COOR.	COS2	AXE N° 2 COOR.	COS2	AXE N° 3 COOR.	COS2	CUM. COS2
VAP	.760	.58	-.542	.29	.084	.01	.88
VPL	.858	.74	-.388	.15	.078	.01	.89
N	-.526	.28	-.727	.53	.042	.00	.81
TEP	.866	.75	.108	.01	-.074	.01	.77
FIL	-.073	.01	.729	.53	.383	.15	.68
LIS	.024	.00	-.185	.03	-.840	.71	.74
BEP	.891	.79	-.022	.00	-.029	.00	.79
BON	.479	.23	.211	.04	-.514	.26	.54
SEU	.611	.37	.570	.32	-.111	.01	.71
ST	-.325	.11	.574	.33	-.234	.05	.49
K	.921	.85	.264	.07	.006	.00	.92
BRK	.895	.80	-.024	.00	.162	.03	.83
V10	.980	.96	.033	.00	.044	.00	.96
V50	.963	.93	-.176	.03	.076	.01	.96

ANNEXE 7

7(A) : FICHIER GENERAL DES VARIABLES, MESUREES SUR DIFFERENTS LOTS DE YAOURT BRASSE, POUR L'ETUDE DES CORRELATIONS ENTRE L'EVALUATION SENSORIELLE ET LA RHEOLOGIE DU YAOURT BRASSE

LISTE DES VARIABLES DU FICHIER

No	SIGLE	DESIGNATION	TYPE(*)
1	VAP	VISCOSITE A CONTRAITE MAXIMALE	CPC
2	VPL	VISCOSITE PLASTIQUE	CPO
3	N	INDICE D'ECOULEMENT	-
4	TEP	TEXTURE EPAISSE EN POT	NOTE/5
5	FIL	TEXTURE FILANTE EN POT	NOTE/5
6	LIS	TEXTURE LISSE EN POT	NOTE/5
7	BEP	TEXTURE EPAISSE EN BOUCHE	NOTE/5
8	BON	TEXTURE ONCTUEUSE EN BOUCHE	NOTE/5
9	SEU	SEUIL D'ECOULEMENT	Pascal
10	ST	SURFACE DE THIXOTROPIE	Pa s-1
11	K	COEFFICIENT DE CONSISTANCE	Pa s^n
12	BRK	VISCOSITE BROOKFIELD	CPOB
13	V10	VISCOSITE APPARENTE A 10 sec-1	CPO
14	V50	VISCOSITE APPARENTE A 50 sec-1	CPO

EDITION DES DONNEES

No	VAP	VPL	N	TEP	FIL	LIS	BEP
1	667.000	624.000	.400	2.650	3.130	2.500	3.050
2	896.000	821.000	.390	2.350	2.680	3.250	2.000
3	519.000	492.000	.380	3.050	2.930	3.000	2.750
4	477.000	51.060	.470	1.220	2.680	5.000	1.080
5	515.400	475.000	.370	2.770	2.650	4.500	3.060
6	3149.000	2639.000	.410	4.470	2.950	4.330	4.670
7	1408.500	1230.500	.350	4.200	2.380	5.000	3.820
8	706.000	651.000	.390	2.890	2.540	4.270	3.350
9	520.000	389.000	.320	2.950	3.800	3.500	3.020
10	633.000	430.000	.310	3.020	4.200	2.120	3.110
11	649.000	502.500	.380	3.030	2.920	4.450	3.720
12	607.000	469.500	.380	2.840	2.380	3.160	4.230
13	531.000	490.000	.370	2.540	3.040	3.710	3.200
14	627.000	444.000	.290	2.810	3.240	4.520	2.800
15	457.500	335.500	.310	2.660	2.910	4.450	2.480
16	1056.000	728.000	.330	3.690	3.330	3.910	3.510
17	1088.000	966.000	.330	3.070	2.830	4.140	2.940
18	723.000	522.000	.340	2.670	3.650	4.620	3.520
19	1769.000	1274.000	.350	3.360	1.950	4.450	3.690
20	778.000	601.000	.330	3.480	2.510	4.380	2.950
21	693.000	476.500	.310	2.790	4.160	4.000	3.070
22	599.000	556.500	.340	2.810	4.000	4.000	3.430
23	1296.000	1211.000	.380	3.620	2.680	4.210	3.540
24	468.000	381.500	.370	2.490	3.100	4.280	2.320
25	753.000	555.000	.290	2.490	3.240	4.200	3.070
26	1208.000	863.500	.340	3.640	3.450	4.280	3.930
27	230.000	1158.000	.270	4.190	3.460	4.050	3.980
28	318.000	270.500	.400	2.220	3.000	4.270	2.030
29	339.000	273.500	.330	2.610	3.160	4.260	2.460
30	1262.000	918.000	.370	3.580	2.370	4.200	4.080
31	1012.000	702.500	.270	3.420	3.150	4.220	3.500
32	424.000	327.000	.300	3.160	3.420	4.210	2.720
33	1014.000	709.000	.290	3.250	3.220	4.200	3.570
34	1845.000	1167.500	.310	3.900	3.080	4.170	4.400
35	1285.000	899.000	.330	3.410	2.850	4.200	3.650
36	624.000	478.500	.340	3.900	3.700	4.140	3.600
37	474.000	317.500	.370	3.300	3.270	4.130	3.250
38	253.000	220.000	.430	2.300	3.110	4.330	1.980
39	292.000	255.500	.430	2.700	3.160	4.310	2.610
40	208.000	181.500	.410	2.200	3.240	4.330	2.560
41	159.000	132.000	.310	3.500	3.910	4.040	2.560
42	468.000	381.500	.370	2.490	3.100	4.280	2.320
43	753.000	555.000	.290	2.490	3.240	4.200	3.070
44	1208.000	863.500	.340	3.640	3.450	4.280	3.930
45	230.000	1158.000	.270	4.190	3.460	4.050	3.980
46	318.000	270.500	.400	2.220	3.000	4.270	2.030
47	339.000	273.500	.330	2.610	3.160	4.260	2.460
48	1262.000	918.000	.370	3.580	2.370	4.200	4.080
49	1012.000	702.500	.270	3.420	3.150	4.220	3.500

ANNEXE 7 (A) - suite -

50	424.000	327.000	.300	3.160	3.420	4.210	2.720
51	1014.000	709.000	.290	3.250	3.220	4.200	3.570
52	1845.000	1167.500	.310	3.900	3.080	4.170	4.400
53	1285.000	899.000	.330	3.410	2.850	4.200	3.650

No	BON	SEU	ST	K	BRK	V10	V50
1	4.050	2.238	175.600	6.591	9.266	1653.874	630.326
2	3.250	2.950	151.500	8.390	10.066	2057.426	771.589
3	3.800	2.060	245.300	7.006	9.266	1678.972	619.591
4	2.220	.895	.000	1.352	.700	398.519	170.027
5	4.300	2.775	236.800	7.590	8.600	1777.569	645.486
6	3.750	5.729	39.600	13.320	18.600	3420.140	1324.671
7	4.630	4.476	146.150	11.685	15.200	2613.580	918.956
8	4.100	3.044	153.100	7.400	7.400	1814.654	680.544
9	3.980	9.011	213.900	9.011	9.666	1881.108	630.188
10	3.100	11.550	171.400	10.410	9.900	2123.747	700.097
11	4.240	8.060	184.200	7.609	7.750	1823.480	672.918
12	4.000	8.150	225.700	7.417	8.000	1777.468	655.938
13	4.210	2.780	217.100	7.292	8.600	1707.777	620.143
14	3.860	10.650	192.300	11.300	9.100	2201.674	702.760
15	3.490	9.490	341.100	9.391	5.366	1915.860	631.567
16	3.760	11.100	101.800	11.100	8.133	2371.115	807.253
17	3.810	4.030	113.000	11.640	8.700	2486.466	846.525
18	4.150	9.930	167.100	9.248	10.533	2021.465	699.398
19	3.720	9.850	136.700	11.590	8.600	2592.331	911.485
20	3.940	8.157	282.500	10.350	8.533	2210.904	752.709
21	4.170	11.200	144.300	10.550	11.400	2152.308	709.512
22	3.650	2.500	169.700	8.962	10.733	1958.949	677.768
23	3.580	2.327	181.300	10.360	9.200	2482.751	916.209
24	3.870	6.624	271.900	7.016	7.266	1643.138	596.671
25	4.140	9.400	187.600	11.300	8.000	2201.674	702.760
26	4.110	10.295	95.800	11.200	11.166	2448.141	847.021
27	4.120	14.230	800.400	16.200	13.400	3014.477	931.675
28	3.950	5.400	424.300	5.160	5.900	1294.794	493.473
29	4.000	6.980	506.500	7.400	8.030	1580.743	538.169
30	4.320	9.670	101.100	10.100	11.200	2365.408	858.947
31	4.220	10.700	163.200	13.350	9.900	2484.152	767.769
32	4.010	8.240	396.600	9.000	8.233	1794.344	582.050
33	4.160	10.500	135.500	12.500	8.633	2435.479	777.389
34	4.360	12.980	69.200	13.950	12.666	2845.943	938.170
35	4.140	10.470	113.000	11.700	10.266	2499.283	850.888
36	4.200	8.320	172.900	8.800	8.066	1923.539	665.517
37	4.200	6.714	289.100	6.430	5.766	1505.898	546.835
38	3.980	4.565	500.400	4.100	3.366	1102.303	440.927
39	4.000	4.470	422.400	4.300	4.233	1156.074	462.436
40	4.000	4.560	647.000	4.100	3.800	1052.746	407.744
41	3.520	5.990	974.900	6.200	5.466	1264.863	416.965
42	3.870	6.624	271.900	7.016	7.266	1643.138	596.671
43	4.140	9.400	187.600	11.300	8.000	2201.674	702.760
44	4.110	10.295	95.800	11.200	11.166	2448.141	847.021
45	4.120	14.230	800.400	16.200	13.400	3014.477	931.675
46	3.950	5.400	424.300	5.160	5.900	1294.794	493.473
47	4.000	6.980	506.500	7.400	8.030	1580.743	538.169
48	4.320	9.670	101.100	10.100	11.200	2365.408	858.947
49	4.220	10.700	163.200	13.350	9.900	2484.152	767.769
50	4.010	8.240	396.600	9.000	8.233	1794.344	582.050
51	4.160	10.500	135.500	12.500	8.633	2435.479	777.389
52	4.360	12.980	69.200	13.950	12.666	2845.943	938.170
53	4.140	10.470	113.000	11.700	10.266	2499.283	850.888

ANNEXE 7

7(B) : ETUDE DE LA RELATION LINEAIRE ENTRE L'ASPECT EPAIS (TEP) ET LE COEFFICIENT DE CONSISTANCE (K)

REGRESSION DE TEP

VARIABLE	COEFFICIENT	ECART-TYPE	STUDENT	CONFIANCE	
CONSTANTE	1.6304	.1810	9.0096	100.00	***
K	.1539	.0182	8.4622	100.00	***

ANALYSE DE LA VARIANCE POUR TEP

	SOMME DES CARRES	DDL	CARRE MOYEN	F CALC.	CONFIANCE
REGRESSION	11.9948	1	11.9948	71.61	100.00
RESIDUS	8.5427	51	.1675		
TOTAL	20.5375	52	.3950		

ECART-TYPE RESIDUEL Sr= .4093 DDL = 51

COMPARAISON DE L'ECART-TYPE RESIDUEL AVEC L'ERREUR DE MESURE:
So = .4300 NUo = 50
STATISTIQUE CALCULEE (Sr/So)**2 = .9059 CONFIANCE = 36.31
L'AJUSTEMENT DE LA REGRESSION AUX POINTS EXPERIMENTAUX EST SATISFAISANT .

P.R.E.V.I.S.I.O.N.

POINT
K = 5.0000

PREVISION TEP = 2.4000 ECART-TYPE DE LA PREVISION So= .4210
S(Yo) est calculé à partir de l'écart-type résiduel.

INTERVALLE DE CONFIANCE

1.557995 <= TEP <= 3.241976

YO = 3.000000 MOYENNE DE NO = 5 VALEUR(S)
XO = 8.898462
6.300940 <= XO <= 11.42984
YO = 3.000000 MOYENNE DE NO = 1 VALEUR(S)
XO = 8.898462
3.338845 <= XO <= 14.39193

ANNEXE 7

7(C) : ETUDE DE LA RELATION LINEAIRE ENTRE L'ASPECT FILANT (FIL) ET L'INDICE D'ECOULEMENT (n)

REGRESSION DE FIL

VARIABLE	COEFFICIENT	ECART-TYPE	STUDENT	CONFIANCE	
CONSTANTE	4.4783	.4418	10.1367	100.00	***
N	-3.9662	1.2710	-3.1205	99.70	***

ANALYSE DE LA VARIANCE POUR FIL

	SOMME DES CARRES	DDL	CARRE MOYEN	F CALC.	CONFIANCE
REGRESSION	1.7667	1	1.7667	9.74	99.70
RESIDUS	9.2535	51	.1814		
TOTAL	11.0202	52	.2119		

ECART-TYPE RESIDUEL Sr= .4260 DDL = 51

COMPARAISON DE L'ECART-TYPE RESIDUEL AVEC L'ERREUR DE MESURE:
So = .6700 NUo = 50
STATISTIQUE CALCULEE (Sr/So)**2 = .4042 CONFIANCE = .08
L'AJUSTEMENT DE LA REGRESSION AUX POINTS EXPERIMENTAUX EST SATISFAISANT .

ANNEXE 8

INFLUENCE DE L'E.S.D. AUGMENTE PAR ADJONCTION CROISSANTE DE POUDRE DE LAIT ECREME SUR LES CARACTERISTIQUES RHEOLOGIQUES DU YAOURT BRASSE

X = E.S.D. g/kg	variation de la grandeur Y (pour Δ E.S.D= +10 g/kg	143.3	150	156.7	159.1	164.6	171.4	Pourcentage de Confiance dans la relation linéaire entre X et Yi
Y1 = TEP	+ 3/10	1.56	2.06	6.28	6.28	7.78	9.44	99 %
Y2 = seuil d'écoulement (Pa)	+ 3	1.01	1.91	4.54	5.07	6.74	9.50	99 %
Y3 = Viscosité plastique (mPa.s)	+ 272	-	-	58	115	219	464	99 %
Y4 =surface de thixotropie ($mPa.s^{-1}$)	- 632	-	-	1152	710	414	128	95 %
Y5 = coefficient K ($Pa.s^n$)	+ 4.7	-	-	7.9	9.4	11.6	15.2	99 %
Y6 = indice n (-)	- 0.02	-	-	0.244	0.248	0.236	0.216	95 %
Y7 = "Viscosité Brookfield" (cpoB)	+3150	1767	2753	4780	6213	7900	10300	99 %

valeurs instrumentales sont des moyennes de 3 observations sur 3 pots différents, la note sensorielle est une moyenne de 9 observations emises par 9 juges selon une échelle spécifique TEP variant de 0 = liquide à 10 = très épais.

ANNEXE 9

INFLUENCE COMPAREE DE FACTEURS DU PROCEDE DE FABRICATION : DEUX ETUDES PRELIMINAIRES COMPLEMENTAIRES

Ces deux études ont été effectuées en conditions pilotes.

9.1 Effets comparés du taux d'extrait sec, du taux de matière grasse, du ferment

3 facteurs de variation différents ont été étudiés sous forme d'un plan d'expérience complet (PE2). Les modalités de variation et le domaine expérimental sont présentés dans le tableau A. 12 essais dont 4 au centre du domaine expérimental ont été réalisés au stade pilote selon la matrice expérimentale (tableau B) où sont reportées les caractéristiques observées sur les yaourts obtenus.

1.2.2 Résultats

Les aléas de mesure et du procédé mis en oeuvre sur la variabilité de chaque réponse sont reportés sur le tableau C.

Ils permettent de mettre en évidence les effets significatifs représentés sur le même tableau.

* L'effet d'une augmentation d'E.S.D. de 8 g/kg entraine une augmentation de 0,9 Pa. s^n du coefficient de consistance et une diminution de 0,016 de l'indice d'écoulement n. Les variations perçues sensoriellement ne sont pas suffisamment significatives.

* L'effet d'une augmentation du taux de matière grasse de 25 à 36 g/kg pour une teneur en matière sèche non grasse du lait constante entraine une augmentation du coefficient de consistance de 1 Pa. s^n, une diminution de l'indice d'écoulement de 0,008 et se traduit par une différence de plus de 4000 cpoB de la "Viscosité Brookfied". Seul l'aspect épais est significativement perçu plus élevé (1.2 pt/5).

Abréviation	Désignation du facteur	Modalité haute	Modalité basse	Unités
X1	Extrait sec dégraissé	185	193	g/kg
X2	Taux de matiere grasse	36	25	g/kg
X3	Ferment utilisé	22P	KA68	-

TABLEAU A : **MODALITES DE VARIATION ET DOMAINE EXPERIMENTAL UTILISE POUR L'ETUDE DES EFFETS DE L'E.S.D., DE LA MATIERE GRASSE ET DU FERMENT**

		ESD	MG	FER.		BRK.	TEP	BEP	FIL	SEU	VPL	ST	K	n
	−	25	25	KA68										
	+	50	36	22P										
4.	1	−	−	−		7266	2.49	2.32	3.10	4.68	381	2719	7	.365
1.	2	+	−	−		8000	2.49	3.07	3.24	7.53	555	1876	11.3	.291
9.	3	−	+	−		11166	3.64	3.97	3.45	12.08	863	958	11.2	.338
8.	4	+	+	−		13400	4.19	3.98	3.46	23	1158	8004	16.2	.269
3.	5	−	−	+		5900	2.22	2.03	3.00	3.18	270	4243	5.2	.397
2.	6	+	−	+		8030	2.61	2.46	3.16	3.39	273	5065	7.4	.326
10.	7	−	+	+		11200	3.58	4.08	2.37	12.6	918	4011	10.1	.371
7.	8	+	+	+		9900	3.42	3.50	3.15	10.12	702	1632	13.5	.274
n°	effets DTB	A_1	B_2	C_3										
5	9.1	0	0	0		8233	3.16	2.72	3.42	4.24	317	3966	9	.303
6	9.2	0	0	0		8633	3.25	3.57	3.22	10.14	709	1355	12.5	.290
11	9.3	0	0	0		12660	3.90	4.40	3.08	14.45	1167	692	13.7	.314
12	9.4	0	0	0		10266	3.41	3.65	2.85	12.85	899	1130	11.7	.332
	9.5	0	0	0										

TABLEAU B : **MATRICE EXPERIMENTALE REALISEE POUR ETUDIER LES EFFETS COMPARES DU TAUX D'EXTRAIT SEC, DU TAUX DE MATIERE GRASSE ET DU FERMENT**

* L'effet du changement de ferment dans la fabrication du yaourt brassé se traduit par des variations rhéologiques qui ne sont pas suffisamment supérieures à l'aléa du au procédé de fabrication. La tendance est néanmoins à l'augmentation de n du fait de l'emploi du ferment 22P plutôt que KA68. L'évaluation sensorielle indique simplement une tendance à l'augmentation de l'aspect filant.

Les conclusions qui peuvent retenues dans ces conditions expérimentales sont l'influence plus forte du taux de matière grasse que de l'E.S.D. sur les caractéristiques sensorielles et rhéologiques d'aspect épais, de viscosité. Par-contre, l'E.S.D. semble affecter plus l'indice d'écoulement n. Quant au changement de ferment, il n'affecterait que l'aspect filant.

Caractéristique de texture Facteurs de variation	Viscosité Brookfield (cpoB)	Texture épaisse pot/bouche		Texture filante	n	K	VPL	SEU	ST
aléa sm+p	700	0.33	0.68	0.24	0.018	2	353	6.8	523
E.S.D. = + 4 g/kg	NS	NS	NS	NS	-0.008	0.46	NS	NS	NS
Matière grasse = + 5.5 g/kg	2000	0.6	0.5	NS	-0.004	0.46	NS	NS	NS
Ferment utilisé KA68 22P	NS	NS	NS	-0.2	+ 0.013	NS	NS	NS	NS

TABLEAU C : **EFFETS COMPARES DE L'EXTRAIT SEC DEGRAISSE DE LA MATIERE GRASSE ET DU FERMENT SUR LA TEXTURE DU YAOURT BRASSE**

Seuls les effets significatifs (α = 10 %) par rapport à l'aléa de fabrication sont considérés, un effet Non significatif est noté NS.
A noter que seule la surface de thixotropie est affectée par les interactions entre les facteurs de variation.

FACTEURS	MODALITES		
	-	0	+
X1 taux de matière grasse sur le produit fini (E.S.D. constant)	1.2 %		3.2 %
X2 Contre-pression lors du traitement de lissage (bars)	3 bars		0 bars
X3 Vitesse de refroidissement après	rapide 6°C en 2 h		lente 11°C 2 h

TABLEAU D : DOMAINE EXPERIMENTAL ETUDIE

		M.G	Liss.	V.AEF		BRK	TEP	BEP	FIL	ONC	NAC
	-	1.2	3	RAP							
	+	3.2	0	LENT							
15	1	-	-	-		4600	2.36	2.13	3.52	3.81	2.94
35	2	+	-	-		6600	2.66	2.49	3.78	3.61	3.15
11	3	-	+	-		7000	2.89	3.45	3.40	3.18	3.46
31	4	+	+	-		11800	3.71	3.96	4.46	3.95	3.63
16	5	-	-	+		5900	2.36	2.41	3.63	3.72	3.34
36	6	+	-	+		8400	2.51	2.31	4.40	3.27	3.54
12	7	-	+	+		8500	2.92	3.04	3.89	3.64	3.49
32	8	+	+	+		12900	3.62	4.03	4.81	4.06	3.60

TABLEAU E : **STRUCTURE DES ESSAIS REALISES ET MOYENNES 14 NOTES D'EVALUATION SENSORIELLE OBTENUES POUR CHAQUE DESCRIPTIVE**

Le yaourt brassé est réalisé dans les conditions pilote déjà décrites, sauf le traitement thermique de la base laitière réalisé en ligne, sur échangeur à plaques APV.

9.2 Effets comparés du taux de matière grasse, de la pression de lissage et de la vitesse de refroidissement du caillé

9.2.1 Méthode

Les trois facteurs étudiés comparativement sous forme d'un plan d'expérience complet 2^3 sont reportés sur le tableau D.

Hormis la "Viscosité Brookfield", seule l'évaluation sensorielle a été mise en oeuvre pour juger des effets sur la texture après 8 jours de fabrication des yaourts brassés au stade pilote (tableau E).

9.2.2 Résultats

Le tableau F permet de dégager les éléments suivants :

1°) Le traitement mécanique joue le plus grand rôle sur la viscosité Brookfield, la texture épaisse en bouche et en pot. A cause du lissage à 3 bars, la perte de texture perçue en bouche est plus importante que celle perçue en pot (-0,8 point/5).

2°) L'augmentation du taux de matière grasse de 1,2 % à 3,2 % entraine une élévation de plus de 3000 cpoB de la viscosité, ceci se traduit par des notes d'évaluation sensorielle de la texture épaisse à tendance plus élevée (+ 0.5 point/5).

3°) Une vitesse de refroidissement plus lente a tendance à augmenter la "viscosité Brookfield", sans que cela se traduise par une perception de l'aspect épais significativement plus élevée.

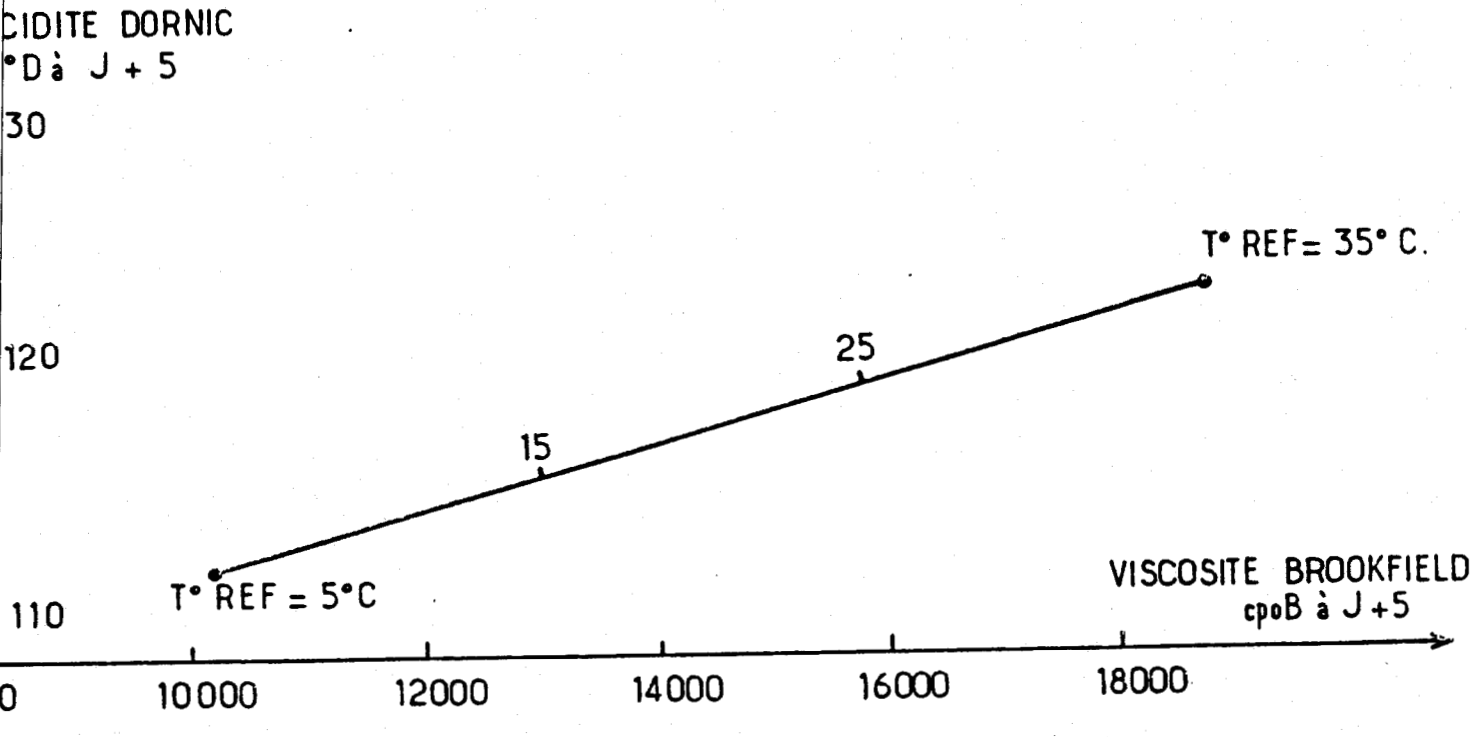
4°) Aucun des 3 facteurs n'explique de façon significative les variations de note filante.

FACTEURS	Viscosité Brookfield et Note Sensorielle				
	BRK	TEP	BEP	ACI	FIL
Matière grasse 1,2 % / 3,2 %	+ 3400	+ 0.5/5	+0.4/5	NON	NON
Contre-pression de lissage 0 / 3 bars	OUI - 3670	OUI - 0.8/5	OUI -1.3/5	NON	NON
Vitesse de refroidissement 6°C / 11 °C 2 h après conditionnement	NON (+1400)	NON	NON	NON	NON
N.B. : ces 3 facteurs n'ont aucune influence significative sur l'aspect filant, l'aspect lisse, l'aspect ontueux du yaourt					

TABLEAU F : EFFET DE LA MATIERE GRASSE, DE LA CONTRE-PRESSION DE LISSAGE ET DE LA VITESSE DE REFROIDISSEMENT SUR LA TEXTURE ET L'ACIDITE

ANNEXE 10

COMPROMIS ENTRE LA "VISCOSITE BROOKFIELD" ET L'ACIDITE DORNIC EN FONCTION DE LA TEMPERATURE EN SORTIE DU REFROIDISSEUR DU YAOURT BRASSE



ANNEXE 11

EXPRESSION DES ALEAS DE REPETABILITE DU PROCEDE, UTILISEE POUR COMPARER LES CARACTERISTIQUES DES YAOURTS TEMOINS ET ESSAIS

CARACTERISTIQUES	ALEAS DE PROCEDE ET DE MESURE	
	Ecart-type	ddl
E.S.T/M.G (g/kg)	-	-
Acidité (°D) /note/5	8.7 / 0.06	2 / 2
VISCOSITE BROOKFIELD	1256	2
SEUIL D'ECOULEMENT (N. n^{-2} = Pa)	0.37	2
VISCOSITE APPARENTE (centipoises, mPa.s)	73.7	2
VISCOSITE PLASTIQUE (centipoises, mPa.s)	30	2
SURFACE THIXOTROPIE (N.n^{-2}. s^{-1})	19	2
MODELE RHEOLOG -K	0.18	2
n	0.003	2
JURY DEGUST° PDT EPAIS/5	0.05	2
PDT FILANT/5	0.18	2
PDT Hét/LISSE	/	/
BOUCHE EPAIS/5	0.13	2
BOUCHE COLLANT/5	0.29	2
BOUCHE GOUT/5	0.23	2

NUMERATION BACTERIENNE

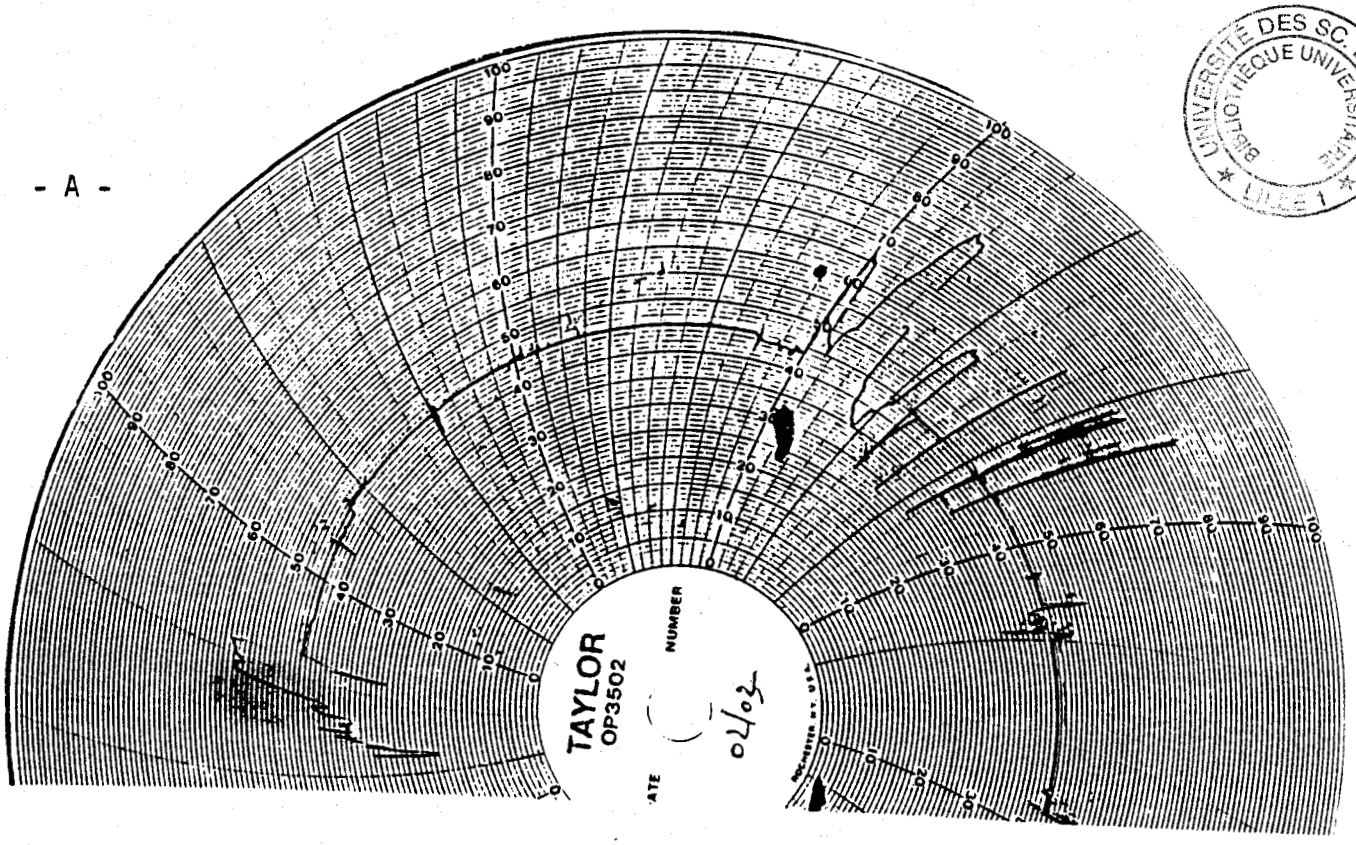
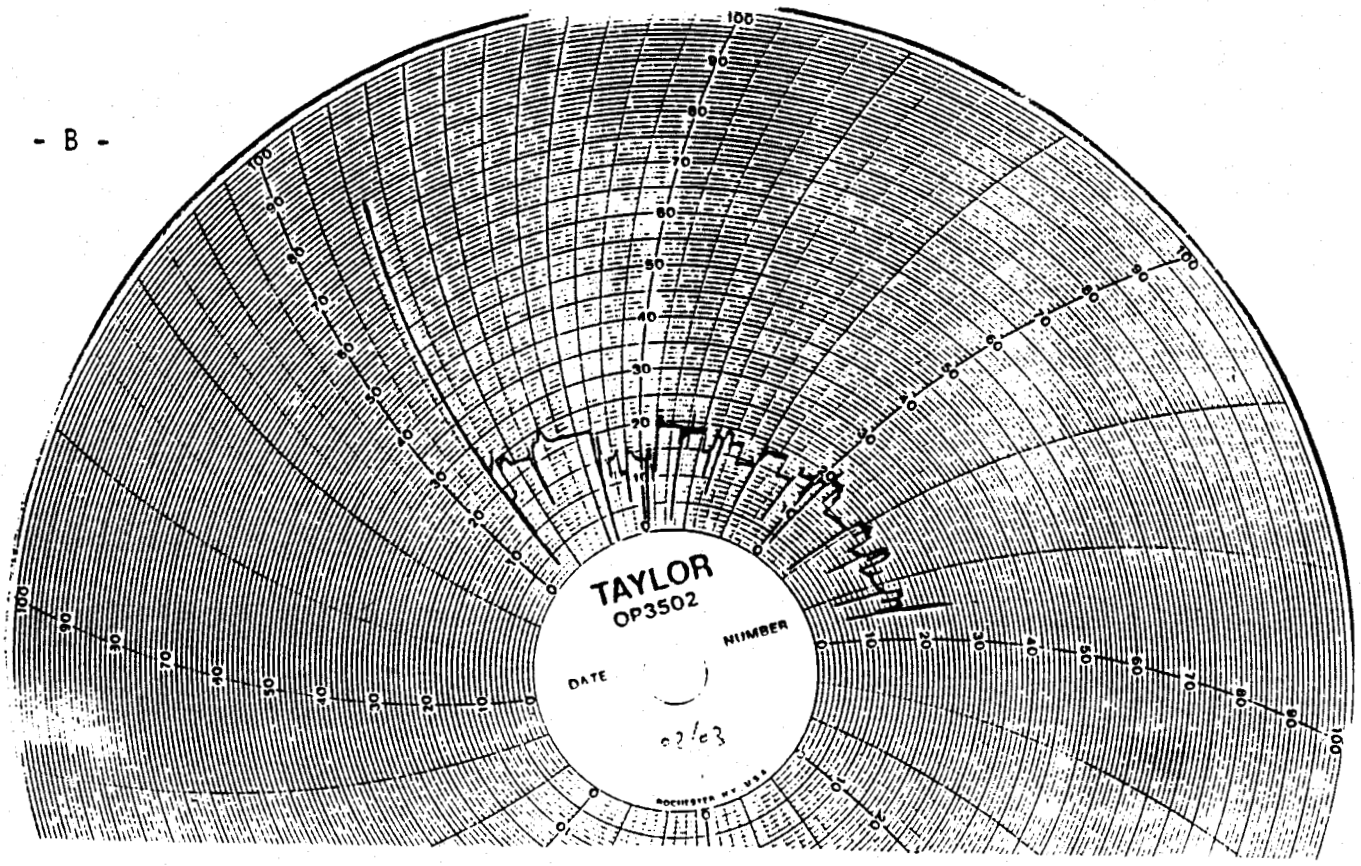
- : S. THERMOPHILUS 8.106
- : L. BULGARICUS 0.7 106

ANNEXE 12

REPRODUCTION DES ENREGISTREMENTS DISQUES ("TAYLOR") DES TEMPERATURES EN SORTIE DE PASTEURISATEUR (A) EN SORTIE DE REFROIDISSEUR (B)

UNIVERSITÉ DES SC. ET TECHNI
BIBLIOTHÈQUE UNIVERSITAIRE
LILLE 1

- A -



- B -