



# Formulation et alimentation

Beaucoup d'industries de l'alimentation ont axé leur stratégie sur l'innovation, et développent continuellement de nouveaux produits afin de s'adapter à la demande. Cela exige une bonne connaissance des propriétés physico-chimiques des aliments de base et des procédés de fabrication. Il faut également être capable d'évaluer les goûts des consommateurs afin de pouvoir leur proposer des produits à même de les séduire ...

Quelques exemples d'innovations dans l'industrie alimentaire : le « simili-poulet », à base de protéines végétales et meilleur que le vrai poulet ; les assiettes mangeables ; le champagne en comprimés effervescents ; les glaces végétales ; les condiments en forme de crayon, à tailler soi-même pour assaisonner les plats ; les perles d'alginate remplies de sirop au rhum pour agrémenter les desserts ; la praline fourrée de bière liquide ; les jus de fruits pressés à froid qui conservent au mieux les nutriments essentiels ; le vinaigre en paillettes ; les spaghettis d'algues ; la mousse de fruits en bombe aérosol ; la peinture comestible, etc.

## *Au menu*

---

Formulation d'une boisson à l'aide d'un plan de mélange (p. 2)

Optimisation de la rhéologie d'une sauce béchamel (p. 4)

Obtention et destruction des mousses (p. 6)

Comment mesurer la texture des aliments ? (p. 10)

Annexes (p. 11)

Références (p. 24)

# 1. Formulation d'une boisson à l'aide d'un plan de mélange

Vous souhaitez lancer sur le marché une nouvelle boisson, un cocktail de fruit composé des trois ingrédients suivants :

- jus d'orange (composant 1),
- jus de citron (composant 2),
- sirop de framboise (composant 3).

Afin d'optimiser la formulation de ce cocktail il est possible d'associer les plans d'expérience à l'analyse sensorielle. Chaque expérience correspond à un cocktail et la réponse est une note donnée par un testeur estimant le goût de chaque cocktail. L'optimum de formulation sera déterminé en cherchant le maximum de la note moyenne (pour plusieurs testeurs) pour chaque cocktail. Dans un deuxième temps, nous verrons que l'on peut faire mieux en mettant en évidence des groupes de testeurs ayant la même façon de noter les cocktails, et nous chercherons à comprendre pourquoi ces testeurs sont ainsi regroupés (analyse en composante principale).

## Construction du plan de mélange

Les teneurs respectives des 3 composants sont notées  $x_1$ ,  $x_2$  et  $x_3$ . La contrainte fondamentale des mélanges impose que :

$$x_1 + x_2 + x_3 = 1$$

Pour cette raison on utilise une représentation triangulaire des mélanges (voir annexe, **document 1**). Toutefois, tous les mélanges contenus dans ce triangle ne sont pas intéressants à tester. Par exemple, un mélange contenant en majorité du sirop de grenadine n'aurait aucune chance d'être sélectionné ! On commence donc par réduire le domaine expérimental en imposant les contraintes suivantes :

$$0,60 < x_1 < 0,90$$

$$0,05 < x_2 < 0,35$$

$$0,05 < x_3 < 0,35$$

A ce domaine correspond un nouveau triangle équilatéral, contenu dans le premier (second triangle du **document 1** de l'annexe). On choisira un *plan de mélange centré augmenté* (réseau de Scheffé), les points étudiés étant représentés dans le domaine d'expérience et numérotés de 1 à 10. Voici la matrice d'expérience :

N° cocktail	X1	X2	X3	% orange	% citron	% framboise
1	1	0	0	90	5	5
2	0	1	0	60	35	5
3	0	0	1	60	5	35
4	1/2	1/2	0	75	20	5
5	1/2	0	1/2	75	5	20
6	0	1/2	1/2	60	20	20
7	1/3	1/3	1/3	70	15	15
8	2/3	1/6	1/6	80	10	10
9	1/6	2/3	1/6	65	25	10
10	1/6	1/6	2/3	65	10	25

La seule réponse sera réponse étudiée sera la note attribuée à chaque cocktail par différents testeurs (analyse sensorielle). Les 10 cocktails seront goûtés et une note leur sera attribuée sur une échelle de 0 à 100. Le plus mauvais recevra systématiquement la note 0 et le meilleur la note 100. La fiabilité du testeur sera évaluée de la manière suivante : 2 cocktails identiques seront introduits dans l'ensemble des cocktails proposés. La série du testeur est retenue s'il a été capable d'évaluer ces deux cocktails avec une différence inférieure à 30.

## Travail à réaliser

1. Réalisez les 10 cocktails dans des quantités suffisantes pour le nombre de testeurs. Plusieurs classes pourront être conviées à la dégustation, alors prévoyez large ! (plus il y a de testeurs, mieux c'est)  
*Note : Une petite touche d'extrait de vanille pourra être ajoutée à chaque cocktail (strictement dans les mêmes proportions pour ne pas introduire un biais).*
2. Placez les cocktails au réfrigérateur. Ils devront tous être consommés à même température pour ne pas introduire un biais.
3. Pour éviter un biais dû à l'anticipation du goût, les testeurs ne devront pas être capables d'identifier le cocktail qui leur sera attribué : on peut par exemple leur attribuer une lettre, la correspondance avec les numéros réels étant connue seulement par celui qui conduit l'expérience. Par ailleurs, une lettre sera également attribuée au cocktail doublé.
4. Chaque testeur sera isolé des autres testeurs si possible (boîtes) ; devant lui sera placée une bande de papier d'environ 1 m de long, graduée de 0 à 100. Il aura à placer chacun des 11 cocktails à sa disposition devant une graduation (les notes 0 et 100 seront systématiquement attribuées). Il est possible de proposer un aliment à croquer entre deux dégustations afin que les papilles ne soient pas saturées par la précédente dégustation (ex : biscotte).
5. Chaque testeur remplira une fiche avec les notes attribuées à chaque cocktail, et différentes informations : âge, sexe, et autres informations que vous pourrez juger pertinente (fumeur ou non /fumeur par exemple).

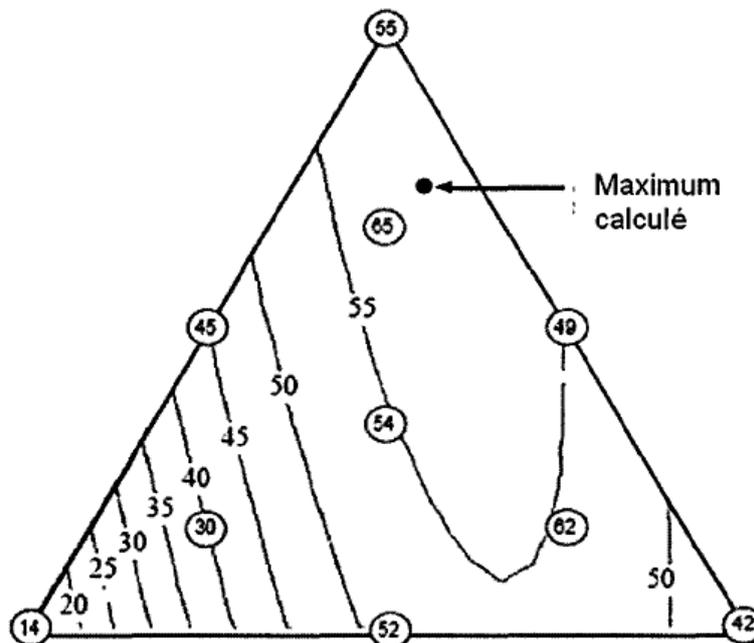
### Modèle mathématique et courbes d'isoreponse

Différents modèles peuvent être testés pour décrire la réponse en fonction de la composition du cocktail, les coefficients  $a_i$ ,  $a_{ij}$  et  $a_{ijk}$  ci-dessous correspondant à des termes constants à déterminer en fonction des réponses obtenues) :

- Degré 1 :  $Y = a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3$
- Degré 2 :  $Y = a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{23}X_2X_3$
- Degré 3 :  $Y = a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{23}X_2X_3 + a_{123}X_1X_2X_3$

Il est plus simple d'utiliser un modèle de degré 1. Cependant, si ce modèle ne donne pas des résultats satisfaisants, on passera à un modèle de degré 2, prenant en compte les interactions, et éventuellement de degré 3. Une fois les coefficients déterminés (à partir des moyennes des réponses d'un grand nombre de testeurs) il est possible de tracer des courbes dites *d'isoreponse*, c'est-à-dire les lieux géométriques correspondant à une même réponse dans le domaine d'expérience. L'optimum de formulation peut alors être déterminé en cherchant le maximum de la note moyenne.

Exemple :



## Travail à réaliser

6. A l'aide d'un tableur ou d'un logiciel de plans d'expériences calculez les moyennes des notes pour chaque cocktail, après avoir éliminé les testeurs non pertinents.
7. A l'aide du logiciel, déterminez l'expression mathématique de Y en fonction de  $X_1$ ,  $X_2$  et  $X_3$ .
8. Comparez les valeurs expérimentales de Y aux valeurs calculées afin d'estimer la validité de votre modèle. Conclusion ?
9. A partir des courbes d'isoréponse, déterminez l'optimum de formulation pour ce cocktail.

### Analyse en composantes principales (ACP)

*Note : l'analyse en composante principale n'est pas au programme de formulation du BTS Métiers de la Chimie, et ne pourra en aucun cas faire partie des compétences exigibles à l'examen. Nous l'utilisons ici comme une illustration de ce qu'il est possible d'obtenir à l'aide des plans d'expériences.*

Le résultat obtenu précédemment permet de satisfaire la plus part des consommateurs potentiels. Toutefois, il ne constitue qu'un compromis, chaque individu étant susceptible de préférer un autre mélange. Pour optimiser davantage la formulation, l'idée est cette fois de s'intéresser à la population des testeurs et examiner s'il est possible d'établir des groupes. Ex : ceux qui ont des préférences pour des saveurs sucrées (sirop de framboise) ou bien acides (citron). Il peut ainsi être plus stratégique de commercialiser deux produits différents qui satisferont davantage leur cible. L'analyse en composantes principales est bien adaptée pour ce genre d'étude. Le principe de l'ACP est détaillé en annexe, **document 2**.

## Travail à réaliser

10. Avec l'aide d'un enseignant, programmez une ACP à partir des résultats précédents.
11. Faites apparaître les valeurs propres pour chaque axe et sélectionnez les axes pertinents à conserver.
12. Interprétez la signification de ces différents axes et isolez différentes populations comme indiqué dans le **document 2**. Quels groupes distingue-t-on ?
13. Y a-t-il un lien entre ces groupes et les caractéristiques des individus (sexe, âge, etc.) ?
14. Représentez les courbes isoréponses pour chaque groupe. Conclusion ?

## 2. Optimisation de la rhéologie d'une sauce béchamel

Votre société a décidé de fabriquer en continu (au moyen d'un système de pompage et d'échangeurs de chaleur) une sauce béchamel « sans morceaux ». Pour ce faire, le procédé retenu est schématiquement le suivant :

- Mélange des ingrédients dans une cuve, sous agitation mécanique thermostatée
- Pompage du produit
- Chauffage dans un échangeur tubulaire à une température de 80° C
- Chambrage : maintien à température pendant 15 minutes
- Refroidissement dans un échangeur de chaleur, à température de 20° C
- Conditionnement

Le responsable de fabrication fait appel à vous pour caractériser la rhéologie du produit à différents stades de ce procédé, afin de pouvoir l'optimiser. Vous disposez dans votre laboratoire de différents viscosimètres rotatifs, à cylindres coaxiaux ou à système cône & plateau.

Deux échantillons ont été prélevés pour réaliser ce produit :

- Echantillon A, issu de la première étape de mélange
- Echantillon B, recueilli dans la zone de refroidissement

L'échantillon A est étudié à l'aide d'un viscosimètre à cylindres coaxiaux dont les dimensions géométriques sont :

Hauteur  $H = 10$  cm

Rayon intérieur  $R_i = 2,5$  cm

Rayon extérieur  $R_e = 2,64$  cm

Vous avez réalisé les mesures et obtenu les résultats suivants pour 4 températures différentes : 20, 40, 60 et 80° C :

<b>Produit A</b>	<b>20° C</b>	<b>40° C</b>	<b>60° C</b>	<b>80° C</b>
N (tr.min <sup>-1</sup> )	C (mN.m)	C (mN.m)	C (mN.m)	C (mN.m)
0,493	0,00754	0,00329	0,00159	0,000833
1,238	0,0189	0,00826	0,00399	0,00209
3,109	0,0476	0,0207	0,0100	0,0525
7,809	0,119	0,0521	0,0251	0,0132
19,61	0,300	0,131	0,0632	0,0331
49,27	0,754	0,329	0,159	0,0833

Remarque : la grandeur  $C$  correspond au couple appliqué au cylindre par le moteur de l'appareil autrement dit le produit  $F.R_i$ ,  $F$  étant la force appliquée (en N).

L'échantillon B est étudié avec un système cône plan dont les dimensions sont :

Angle du cône  $\alpha = 2^\circ$

Rayon du cône  $r = 4$  cm

Les résultats sont les suivants :

<b>Produit B</b>	<b>20° C</b>	<b>40° C</b>	<b>60° C</b>	<b>80° C</b>
N (tr.min <sup>-1</sup> )	C (mN.m)	C (mN.m)	C (mN.m)	C (mN.m)
0,333	33,59	21,78	16,90	14,13
0,837	42,29	27,42	21,28	17,79
2,103	53,24	34,52	26,79	22,39
5,283	67,02	43,46	33,73	28,19
13,90	84,38	54,71	42,46	35,49
34,91	106,2	68,88	53,45	44,68

## Travail à réaliser

1. Montrez qu'avec les deux types de viscosimètres, la viscosité dynamique est proportionnelle au rapport  $C/N$  et déterminez les rapports de proportionnalité.
2. Représentez graphiquement la viscosité dynamique à 20° C en fonction de la vitesse de rotation pour les produits A et B. Quelles sont vos conclusions ?
3. Justifiez le choix des deux viscosimètres.
4. Pour une vitesse de rotation constante (3,109 tr.min<sup>-1</sup> pour A et 2,103 tr.min<sup>-1</sup> pour B) représentez l'évolution de la viscosité dynamique en fonction de la température. Quelles sont vos conclusions ?

### 3. Obtention et destruction des mousses

*Cet ensemble d'activité est consacré aux mousses alimentaires : celles que l'on désire, et celles que l'on cherche à détruire ! L'objectif est de se familiariser avec les procédés industriels d'obtention des mousses, les facteurs permettant leur obtention et leur stabilisation, ainsi qu'avec les techniques de contrôle de la moussabilité et de la stabilité. On étudiera enfin quelques antimousses employés dans l'alimentaire, notamment la cinétique de démoussage.*

*Formulation d'une mousse au chocolat industrielle*



Votre mission est d'améliorer la formule d'une mousse au chocolat commercialisée par votre entreprise, afin d'en optimiser la consistance. Voici cette formule :

Ingrédients	Pourcentage massique
Crème à 40 % de matière grasse	15
Sucre	10
Poudre de cacao	5
Lait écrémé en poudre	4
Alginate de sodium	0,5
Carraghénane	0,25
Ester d'acide lactique de diglycérides	0,5
Lait entier	QSP

Les étapes de fabrication sont les suivantes :

- Phase 1 : préparation du mélange ou « mix »  
Les différents ingrédients sont dispersés à l'aide de mélangeurs, durant 30 à 60 minutes, à une température d'environ 50 à 60° C. Le mélange est ensuite filtré, porté à 70° C environ, puis homogénéisé de manière à obtenir une émulsion (passage dans une valve de pression de l'ordre de 150 à 250 bar).
- Maturation du mix  
Le mélange est refroidi durant 4 à 12h à une température de l'ordre de 2 à 4° C. Cette étape est très importante pour l'obtention d'une mousse stable, car elle permet au mélange d'atteindre sa viscosité définitive.
- Phase 2 : foisonnement  
C'est la phase de fabrication de la mousse : de l'azote est injecté dans la phase liquide, le plus souvent à l'aide de mélangeurs dynamiques de type rotor-stator (voir figure ci-dessous).

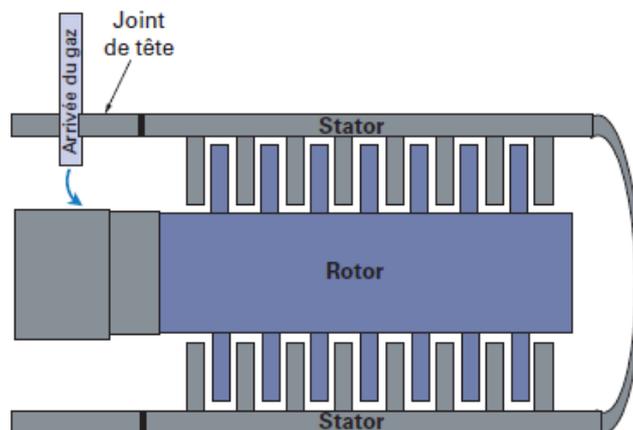


Schéma en coupe longitudinale d'un mélangeur dynamique.

La paroi du stator est thermostatée (circulation d'eau froide)

Les premières démarches consisteront à fabriquer cette mousse en laboratoire en reproduisant au mieux les différentes étapes du procédé, afin de la caractériser.

## Travail à réaliser

1. Le **document 3** en annexe indique le principe de fabrication des mousses alimentaires. Le **document 4** donne une représentation simplifiée des deux étapes de cette fabrication. Le **document 5** traite de la caséine du lait.
  - 1.1. Qu'est-ce qu'une émulsion ? Quelle est la cause physico-chimique de son instabilité ?
  - 1.2. Dans la formule de la mousse au chocolat, quelles matières premières permettent d'assurer la stabilité de l'émulsion ? Expliquez.
  - 1.3. Pourquoi la caséine se charge-t-elle négativement à  $\text{pH} > 4,6$  et positivement à  $\text{pH} < 2,5$  ? Justifiez cela à partir de sa structure chimique.
  - 1.4. En quoi la caséine permet-elle de stabiliser le lait ? En quoi permet-elle de favoriser la formation de mousse ?
  - 1.5. Indiquez les différents facteurs responsables de la stabilisation de la mousse lors du foisonnement.
2. Indiquer une structure chimique possible pour l'ester d'acide lactique et de diglycérides, en vous aidant des structures de ces deux derniers composés (annexe, **document 6**). A quel type de tensioactif a-t-on affaire ici ? Identifiez la partie hydrophile et justifiez son hydrophilie.
3. Le **document 7** en annexe indique la structure de l'alginate et de la carraghénane. Quel est leur rôle ? Décrivez, à l'aide d'un schéma, leur mode d'action.
4. Expliquez le rôle de l'abaissement de température lors de la maturation du mix.
5. Fabriquez environ 300 g de mousse en respectant le mode opératoire suivant :
  - A l'aide d'un agitateur mécanique à hélice, mélanger la crème, le lait entier et le sucre
  - Tout en maintenant l'agitation, porter le mélange à une température de  $75^\circ\text{C}$
  - Introduire les poudres
  - Introduire l'ester, l'alginate et la carraghénane
  - Poursuivre l'agitation jusqu'à obtention d'un mélange homogène, puis remplacer l'agitateur mécanique par un homogénéiseur rotor-stator à  $1500\text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$  de manière à émulsifier plus efficacement le mélange
  - Prélever la quantité nécessaire de mélange pour déterminer sa densité  $d_L$  au pycnomètre (on prendra soin auparavant de ramener le mélange prélevé à température ambiante)
  - Refroidir à température ambiante, puis à l'aide d'un bain de glace, tout en agitant à l'aide de l'agitateur à hélice de manière à incorporer de l'air dans le mélange (foisonnement)
  - Stopper l'agitation lorsque la consistance de la mousse paraît satisfaisante
6. Mesurez la densité  $d_M$  de la mousse au pycnomètre (à température ambiante).
7. Montrez que le taux de foisonnement (voir annexe, **document 8**) peut être calculé à partir de la relation suivante :

$$\Phi = \frac{d_L}{d_M} - 1$$

Déduisez-en le taux de foisonnement de votre mousse au chocolat.

8. Déduisez de la valeur précédente la fraction volumique  $\varepsilon$  de gaz dans la mousse.

**Conservez votre mousse au chocolat pour l'analyse rhéologique.**

### Etude d'additifs moussants pour l'alimentaire

Afin d'améliorer la texture de la mousse, il peut être intéressant d'employer des agents foisonnants. Différentes possibilités s'offrent à vous :

- La lécithine de soja
- Le poloxamère (nom commercial : pluronic)
- Un monoglycéride acétylé, stabilisateur de mousse (nom commercial : Radiamuls AMG)
- Une poudre de blanc d'œuf foisonnant
- Le lactosérum

Le **document 9** de l'annexe vous indique la formule chimique de certains de ces composés. Le lactosérum est une protéine dont la structure chimique est assez proche de celle de la caséine. Il s'agit de comparer le pouvoir moussant de ces additifs, ainsi que la stabilité des mousses qu'ils permettent d'obtenir. Vous étudierez ainsi l'influence de divers facteurs, tels que la concentration en agent foisonnant, le pH et la température.

### Travail à réaliser

9. Identifier les groupes hydrophobes et hydrophiles pour chacun de ces composés.
10. Expliquez pourquoi fouetter un blanc d'œuf provoque la formation de mousse lorsqu'on le bat en neige. Pourquoi la mousse est-elle plus abondante lorsqu'on rajoute du sel et du citron (ou du vinaigre) ?
11. Évaluez la moussabilité des différents agents foisonnants (*chaque étudiant pourra choisir l'un des tensioactifs*), ainsi que la stabilité moussante à 10 minutes, en réalisant pour chacun un test de Ross Miles (annexe, **document 10**).
12. Si votre laboratoire est équipé d'un tensiomètre, évaluez la tension superficielle de chacune des solutions précédentes. Peut-on faire une corrélation entre ces mesures et les résultats des tests de Ross-Miles ? Expliquez.
13. Choisissez l'un des paramètres suivants et mettez un œuvre un mode opératoire permettant de déterminer leur influence sur la moussabilité et la stabilité : concentration en agent foisonnant, pH, température. *Cette étude pourra également être menée à partir d'un plan factoriel de niveau 3.*
14. Déduisez de l'étude précédente les conditions optimales permettant d'obtenir une mousse abondante et stable.
15. Le **document 11** de l'annexe traite des mécanismes de déstabilisation des mousses.
  - 15.1. Expliquez le mécanisme de mûrissement d'Ostwald, sachant que selon la loi de Laplace la pression intérieure des bulles d'air est donnée par l'expression suivante, où  $\sigma$  est la tension superficielle du liquide et  $r$  le rayon de la bulle :
$$P = P_{atm} + \frac{2\sigma}{r}$$
  - 15.2. On utilise, pour la fabrication industrielle des mousses au chocolat, de l'azote pour réaliser l'étape de foisonnement. Expliquez ce choix, sachant que l'azote est deux fois moins soluble dans l'eau que l'air.
  - 15.3. En raisonnant à partir du concept de tension superficielle, proposez une cause du phénomène de coalescence.

### Propriétés rhéologiques et texturométriques des mousses

La fermeté d'une mousse peut être évaluée par des mesures rhéologiques car elle est directement liée à la contrainte seuil. La mousse au chocolat fabriquée précédemment sera comparée à deux mousses commerciales, si possible de textures différentes.

### Travail à réaliser

16. A l'aide d'un rhéomètre, tracer les courbes de viscosité et d'écoulement des différentes mousses.
17. Nommez le comportement rhéologique de chacune d'entre elle.
18. Précisez, à l'aide d'une mesure complémentaire, les contraintes seuils de chaque mousse.
19. Concluez quant à leurs fermetés respectives.

*Etude complémentaire (ou alternative) possible : fermeté d'un blanc d'œuf monté en neige en fonction du pH.*

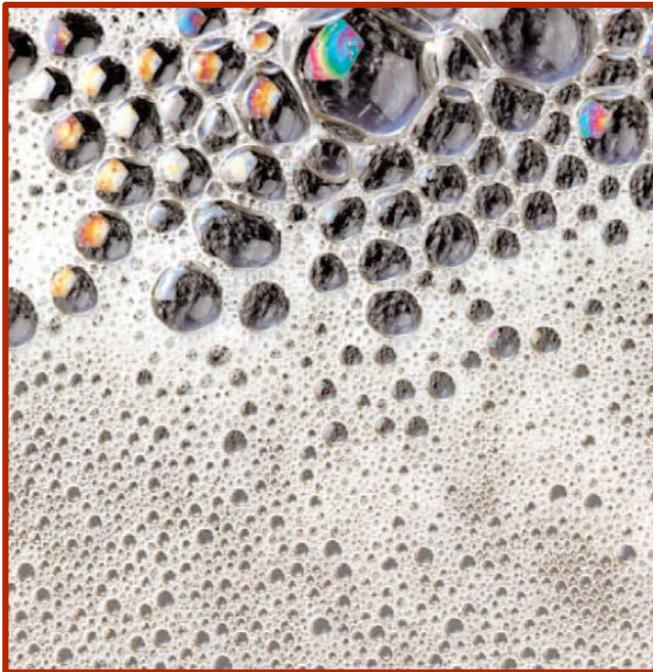
Voir Journal of rheology, rheology of foam.

### Etude d'un antimousse pour l'alimentaire

Votre société commercialise également des confitures. Or, lors de la production de celles-ci, une mousse abondante est produite, ce qui n'est pas souhaitable. La solution est d'employer un antimousse alimentaire tel que le polydiméthylsiloxane ou diméthicone (E 900) ou un mélange de mono- et di-glycérides d'acides gras (E 471).

### Travail à réaliser

20. Selon vous, quel mécanisme est à l'origine de la production de mousse lors de la fabrication de la confiture ?
21. Vous trouverez en annexe, **document 12**, la fiche technique d'un antimousse alimentaire à base de polydiméthylsiloxane.
  - 21.1. Quelle est la formule générale de ce composé ?
  - 21.2. Expliquez son mode d'action : comment provoque-t-il la destruction de la mousse ?
  - 21.3. Quelle quantité d'antimousse commercial faut-il ajouter pour une production de 500 kg de confiture ?
  - 21.4. Quels sont les différents facteurs qui pourront nécessiter d'adapter cette quantité ?
22. A l'aide d'un disperser (ou d'un mélangeur), fabriquez une mousse en employant une solution d'agent foisonnant.
23. Proposez un protocole permettant de suivre la cinétique de démoussage.
24. Mettez en œuvre ce protocole et tracez la courbe  $V=f(t)$  pour différentes concentrations.
25. Quelle est votre conclusion ? Critiquez également votre protocole.



## 4. Comment mesurer la texture des aliments ?

### *Qu'est-ce que la texture ?*

3 facteurs font qu'un consommateur apprécie ou non un aliment : son apparence, son goût et sa texture. Cette troisième caractéristique est complexe et multidimensionnelle car elle fait intervenir le toucher, la vue, l'ouïe ... il n'est donc pas possible de quantifier la texture par une grandeur unique, il faudrait ainsi parler de propriétés texturales (voir annexe, **document 13**), en général liées aux propriétés mécaniques et rhéologiques de l'aliment considéré, autrement dit son comportement lorsqu'il est déformé, désintégré et lorsqu'il s'écoule sous l'action d'une force. Différents éléments permettent de percevoir une texture :

- Avant la mise en bouche : des indices visuels tels que la couleur, la brillance, la granulométrie, l'hétérogénéité, donnent des informations sur la texture du produit. Des informations complémentaires peuvent être obtenues par la manipulation des aliments, par exemple l'agitation avec la cuillère ou la découpe du produit.
- Désintégration de la structure de l'aliment pendant la mastication.
- Rôle des éléments structuraux sur l'impression globale perçue lorsque les aliments sont dans la bouche. La sensibilité de la bouche au toucher et à la taille des particules, la dentition, la déglutition, les mouvements de la langue par rapport au palais et la salive sont autant de facteurs qui peuvent affecter la perception de la texture. La sensibilité de la langue et du palais est bien supérieure à celle de la plupart des autres parties du corps : des tailles de particules aussi petites que 25 µm peuvent être détectées par le palais. Ainsi, la texture sensorielle dans la complexité de sa perception dépend directement de la structure et des propriétés du produit aux différentes échelles (du macroscopique au microscopique) et de la dynamique éventuelle de cette structure au cours de l'évaluation.

### *Comment mesurer la texture ?*

Deux grands types de méthodes peuvent être employés pour évaluer la texture :

- **L'analyse sensorielle** : la texture est évaluée et notée par un panel de testeurs, puis les résultats sont traités par des outils de statistique tels que l'analyse en composante principale (ACP, voir section 1). Le problème est que ces méthodes coûtent énormément de temps et d'argent car elles nécessitent de recruter et former un panel sensoriel, et de vérifier la performance de ce panel dans le temps afin de s'assurer que les données produites soient fiables.
- **L'approche instrumentale** (texturométrie) : des techniques telles que la rhéologie ou l'analyse de texture permettent de caractériser les propriétés mécaniques liées à la texture.

Toute la difficulté est d'établir une corrélation entre les mesures instrumentales et les résultats obtenus par analyse sensorielle. C'est précisément cet aspect que nous allons étudier.

## Travail à réaliser

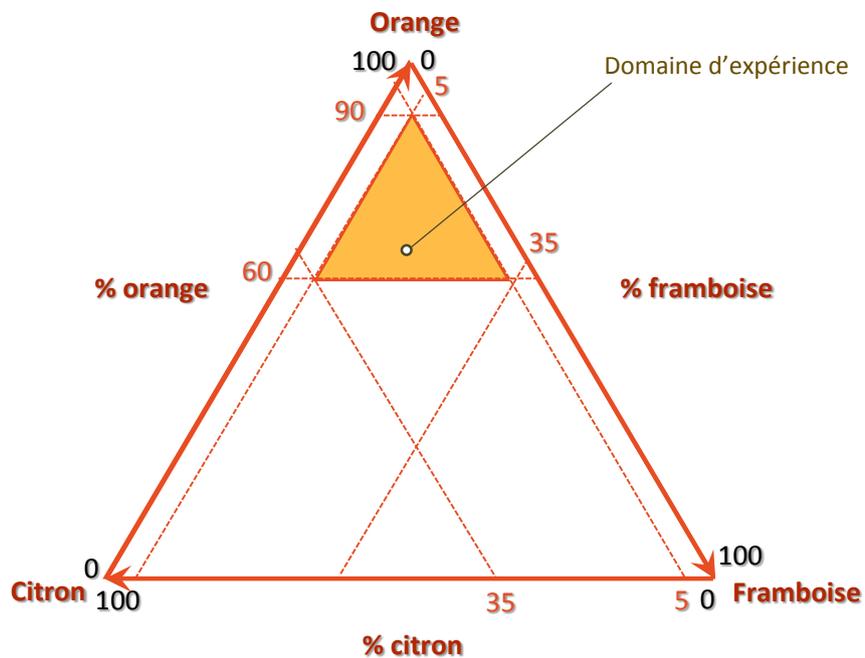
Vous avez à votre disposition 10 aliments dont vous avez à évaluer la texture :

Macaron, surimi, fromage type « apéricube », fromage type « babybel », carambar, mini saucisson, chocolat au lait, palet breton, pomme.

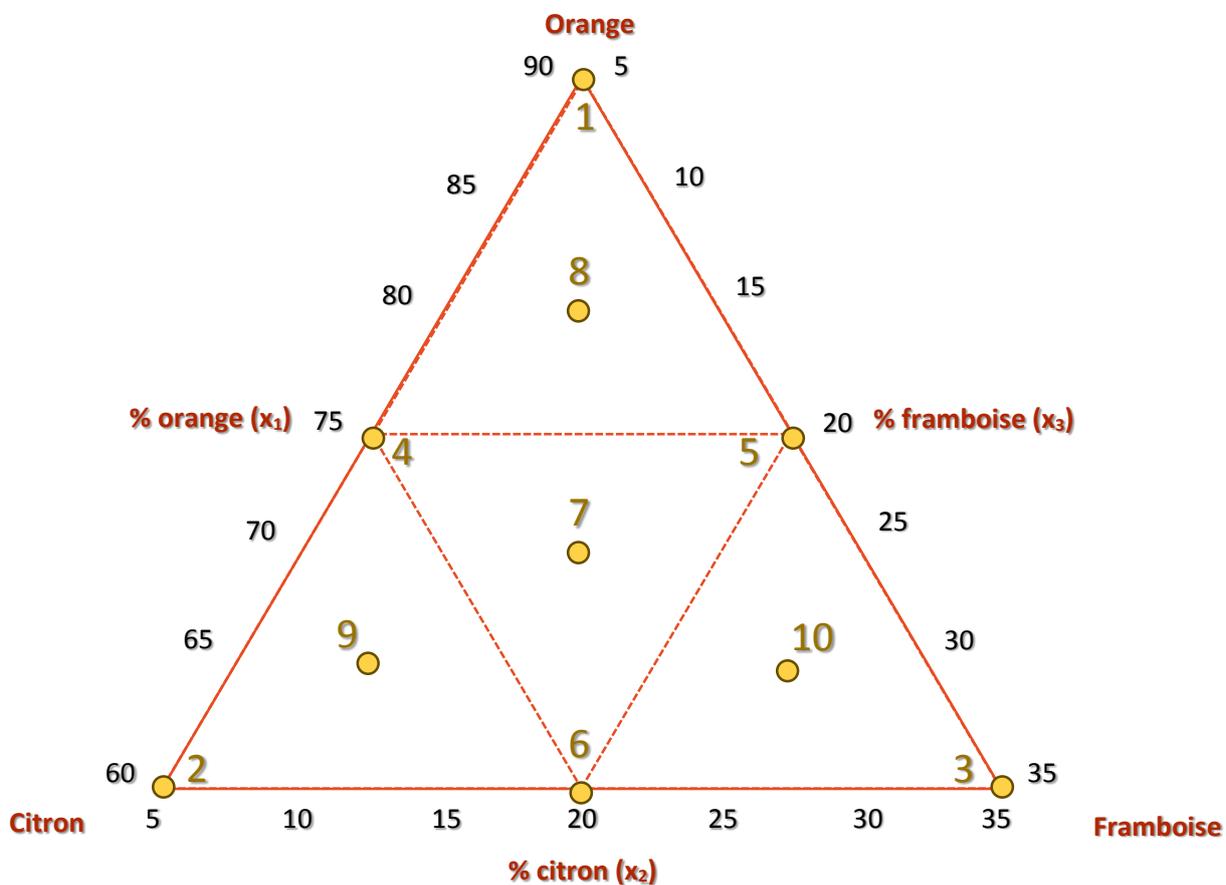
1. Évaluez les différents paramètres structuraux de ces aliments en leur attribuant une note de 0 à 10. Vous pourrez vous aider des échelles de référence (annexe, **document 14**).
2. À l'aide d'un texturomètre (annexe, **documents 15 et 16**) réalisez un profil de texture pour chacun de ces aliments (annexe, **document 17**).
3. Évaluez, à partir de ce profil, les différents paramètres texturaux des aliments à étudier.
4. Évaluez, pour chaque paramètre textural, la corrélation entre l'analyse sensorielle et la TPA.
5. Quelles sont vos conclusions ?
6. Quels points du protocole précédent devraient être améliorés pour obtenir des résultats plus fiables ?

# ANNEXE

Document 1 : plan de mélange – représentation triangulaire des cocktails



Domaine d'expérience, plan de Scheffé :



## Document 2 : analyse en composantes principales

Pour décrire le principe de l'ACP, on considère maintenant que chaque cocktail représente un axe gradué, l'ensemble définissant un espace à 10 dimensions. Dans cet espace, chaque testeur est représenté par un point dont les coordonnées sont les notes qu'il a attribuées aux 10 cocktails. L'ACP consiste en une projection de ce nuage de points sur un espace de plus petite dimension. La projection est effectuée de telle manière que le premier vecteur directeur (vecteur propre) indique la direction de la plus grande variance. L'axe 2, orthogonal au premier, sera dirigé de façon à présenter la deuxième plus grande variance et ainsi de suite.

Le tableau 1 ci-dessous, établi à partir des notes de 39 testeurs, indique les valeurs propres ( $\lambda_i$ ) de chaque axe, le % de variance ( $\frac{\lambda_i}{\sum \lambda_i}$ ) qui correspond au % d'information représentée par l'axe correspondant, et le % de variance cumulée. Cela permet de voir qu'en ne conservant que les 3 premiers axes, 64 % de l'information totale est conservée. Il est donc possible de limiter l'analyse à ces axes.

Axe	Valeur propre	% variance	% variance cumulée
1	3,6	36	36
2	1,5	15	51
3	1,3	13	64
4	1,1	11	75
5	0,7	7	81

Tableau 1 – Valeur propre, % de variance, et % de variance cumulée

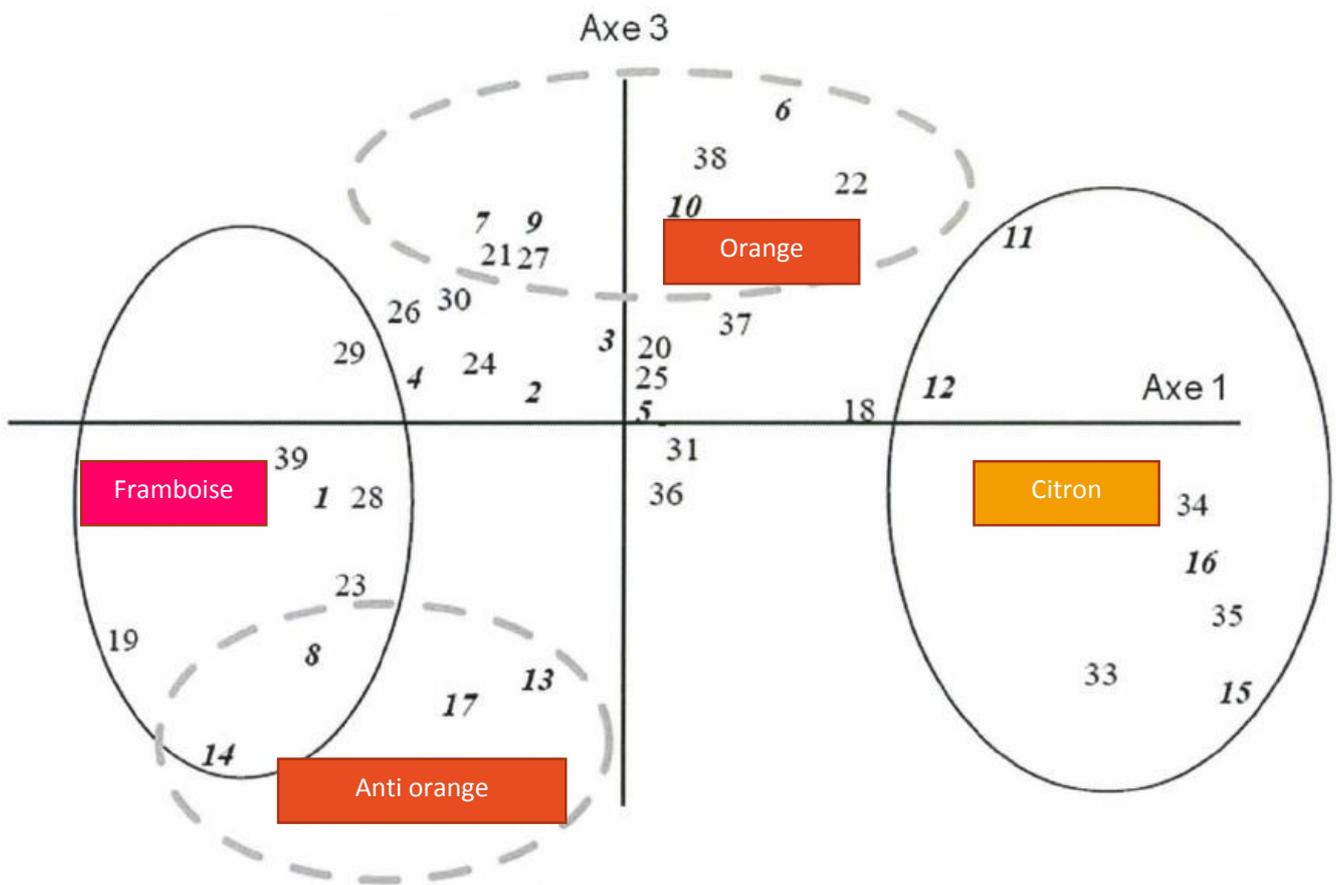
Le tableau 2 indique les combinaisons linéaires de cocktails que représentent les 3 axes retenus. Pour simplifier l'analyse, ne sont conservés pour chaque axe que les cocktails correspondant à  $x^2 > 0,1$ . On a alors les résultats suivants :

- Axe 1 = opposition citron / framboise  
[0,37 cocktail ② + 0,37 cocktail ④ + 0,38 cocktail ⑨] – [0,34 cocktail ③ + 0,44 cocktail ⑩]
- Axe 2 = pas de tendance marquée  
[0,52 cocktail ⑥ + 0,34 cocktail ⑧] – [0,55 cocktail ⑤ + 0,52 cocktail ⑦]
- Axe 3 = axe orange / anti-orange  
[0,47 cocktail ① + 0,62 cocktail ⑧] – [0,38 cocktail ② + 0,23 cocktail ⑥]

Cocktails	Vecteur 1		Vecteur 2		Vecteur 3	
	x	(x) <sup>2</sup>	x	(x) <sup>2</sup>	x	(x) <sup>2</sup>
①	0,27	0,07	0,1	0,01	0,47	0,22
②	0,37	0,14	-0,17	0,03	-0,38	0,14
③	-0,34	0,12	-0,24	0,06	0	0
④	0,37	0,14	0,06	0	-0,15	0,02
⑤	-0,12	0,01	-0,55	0,3	0,37	0,14
⑥	-0,3	0,09	0,52	0,27	-0,23	0,05
⑦	0,27	0,07	-0,43	0,18	-0,04	0
⑧	0,15	0,02	0,34	0,12	0,62	0,38
⑨	0,38	0,14	0,09	0,01	-0,17	0,03
⑩	-0,44	0,19	-0,13	0,02	-0,06	0

Tableau 2 – Coordonnées et carrés des coordonnées des 10 cocktails sur les 3 premiers axes

Les axes 1 et 3 font donc nettement apparaître des groupes différents, que l'on peut faire apparaître en projetant le nuage de points dans l'espace plan (axe1, axe3).



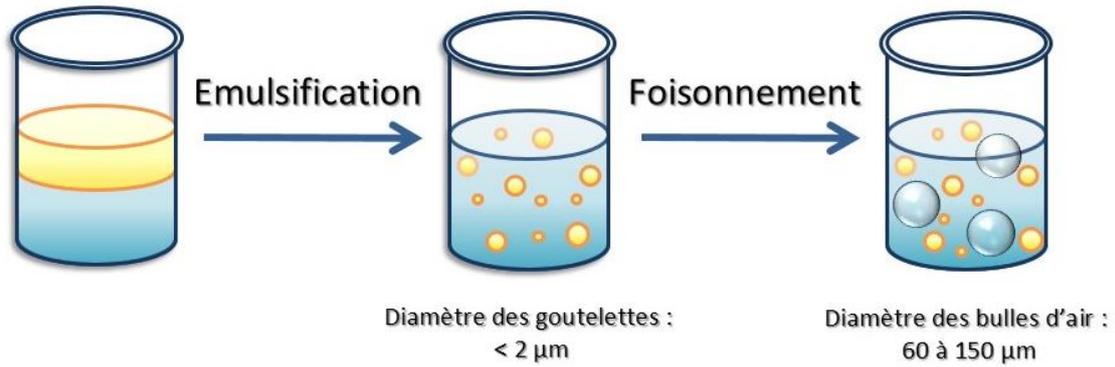
On peut alors choisir de formuler des cocktails qui cibleront certaines populations : pro-citrons et anti-framboises, pro-oranges, anti-oranges, etc.

### Document 3 : Les mousses laitières (source : Techniques de l'ingénieur J2268, mars 2007)

De plus en plus, l'industrie alimentaire tend à diversifier son offre. Outre les traditionnelles mousses au chocolat, avec ou sans crème Chantilly, elle fabrique à présent des mousses à base de yoghurt, de fromage frais, avec ou sans fruits... La variété des produits proposés résulte directement de l'origine et de la diversité des matières premières, ainsi que des différences des taux de matière grasse introduits... Les crèmes glacées constituent un type particulier de mousses laitières. Ce sont des mousses « solides », du fait de la présence des cristaux de glace qui contribuent à la stabilisation des bulles de gaz. Elles contiennent jusqu'à 50 % d'air en volume.

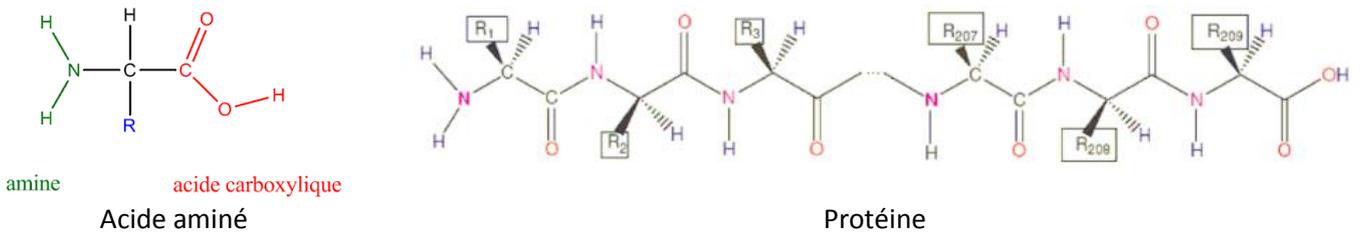
La fabrication de ces mousses part toujours d'une émulsion, en général de type huile/eau. Les globules gras sphériques du lait ou de la crème sont d'abord dispersés dans une phase aqueuse, ou matrice, contenant des protéines laitières (solubles comme les caséines ou insolubles comme les lactoglobulines) et des additifs (agents de texture et/ou tensioactifs), de nature et à des concentrations différentes. Les mousses laitières industrielles actuelles contiennent systématiquement des protéines (présentes en tant qu'ingrédient principal dans le cas du lait ou additionnées) qui jouent le rôle « d'agents foisonnants ». Elles contiennent simultanément des agents « gélifiants » qui contribuent à figer la phase continue. Jusqu'à ces dernières années, c'est essentiellement la gélatine qui était utilisée à cet effet. Ces émulsions sont foisonnées ultérieurement par addition de gaz, de l'azote de préférence, afin de produire mousses au chocolat, crème fouettée ou mousse de fromage...

Document 4 : Foisonnement des émulsions

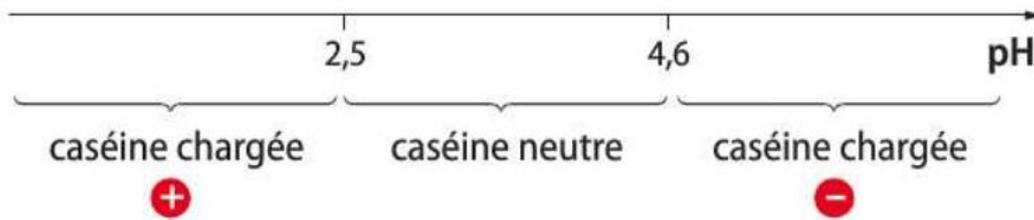


Document 5 : La caséine du lait

Le lait est un mélange complexe, composé principalement d'eau (90%) dans laquelle sont dispersées des gouttelettes de matière grasse. Cette émulsion est stabilisée par la caséine du lait qui est une protéine, c'est-à-dire un polyamide naturel constitué de monomères appelés acides aminés.

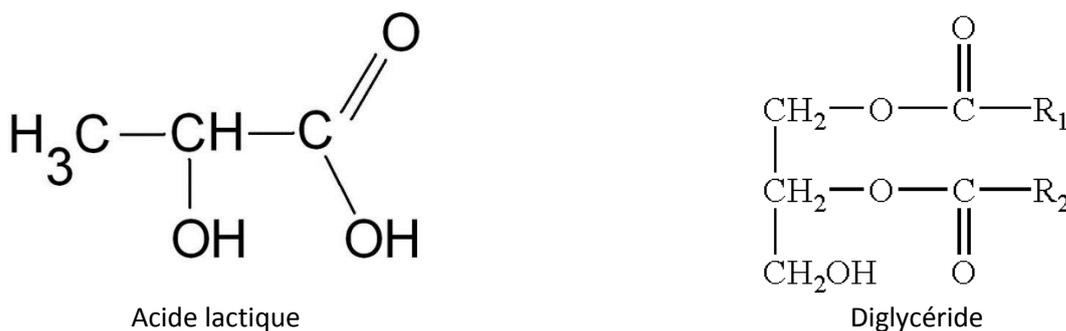


La charge électrique de la caséine varie avec le pH (voir figure ci-dessous). Ainsi pour un pH supérieur à 4,6 la caséine est globalement chargée négativement.

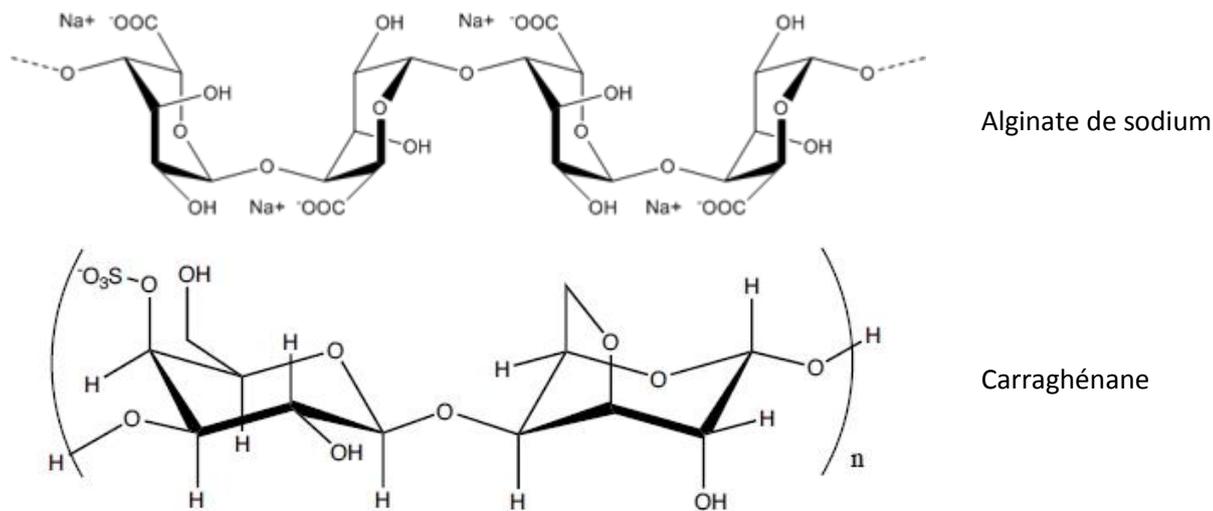


Le pH du lait étant de 6,5 la caséine y est alors chargée négativement.

Document 6 : Structures de l'acide lactique et des diglycérides



## Document 7 : Structures de l'alginate de sodium et de la carraghénane



## Document 8 : Taux de foisonnement des mousses

Le taux de foisonnement permet d'évaluer la quantité d'air présente dans une mousse. Il correspond au rapport suivant,  $V_G$  et  $V_L$  désignant respectivement le volume de gaz et le volume de liquide dans la mousse :

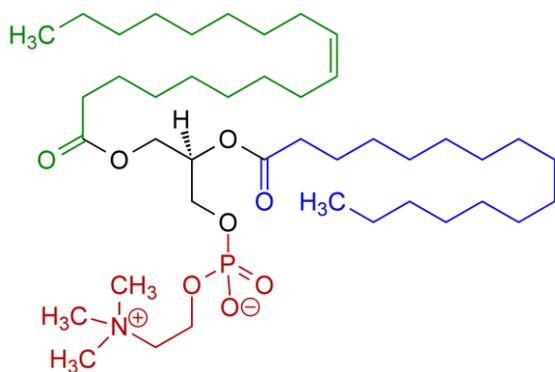
$$\Phi = \frac{V_G}{V_L} \text{ (exprimé en \%)}$$

**Tableau I - 1 : Teneur en gaz de quelques aliments foisonnés parmi les plus courants.**

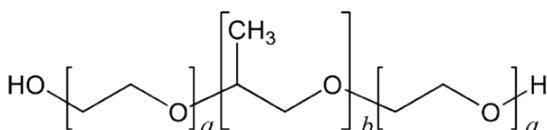
<i>Produit foisonné</i>	<i>Emulsion*</i>	$\Phi$	<i>Produit foisonné</i>	<i>Emulsion*</i>	$\Phi$
Beurre foisonné	(E/H)	0,2-0,3	Crème glacée et sorbets	(H/E)	1,5-2
Biscuiterie (fourrages)	(-)	0,1-0,3	Fromages à tartiner	(H/E)	0,05-0,2
Blanc en neige	(-)	5-6	Meringue	(-)	7,5-8
Charcuterie (mousses ...)	(H/E)	0,3-0,4	Mousse de fruits	(H/E)	0,3-0,4
Confiserie (marshmallow ...)	(-)	2-3	Mousses de légumes	(H/E)	0,3-0,4
Crème chantilly et toppings	(H/E)	0,7-2	Pâtisserie (génoise ...)	(H/E)	0,3-0,5

\* précise si la phase continue est une émulsion huile-dans-eau (H/E), eau-dans-huile (E/H) ou n'est pas une émulsion (-).

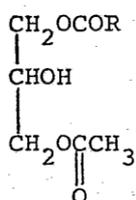
## Document 9 : Structures de quelques agents foisonnants



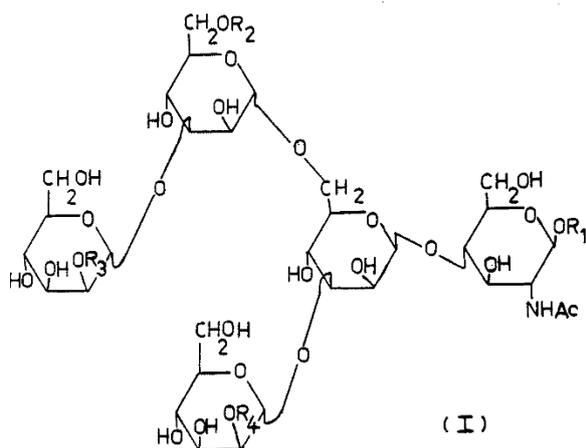
Lécithine



Poloxamère (Pluronic)



Monoglycérade acétylé (Radiumuls AMG)



Ovalbumine du blanc d'œuf

L'ovalbumine se déroule pour former un film autour des bulles d'air :

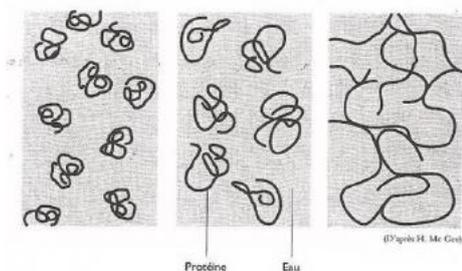


Schéma de la dénaturation

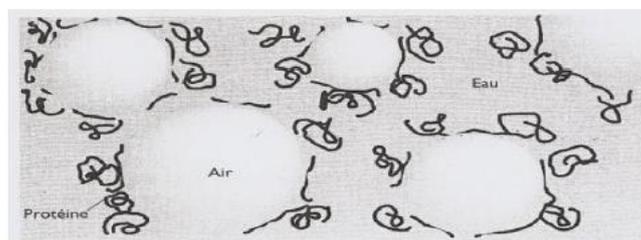
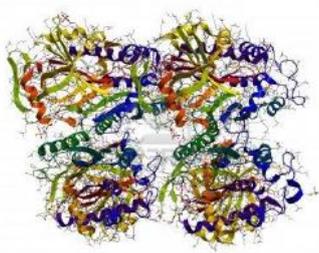


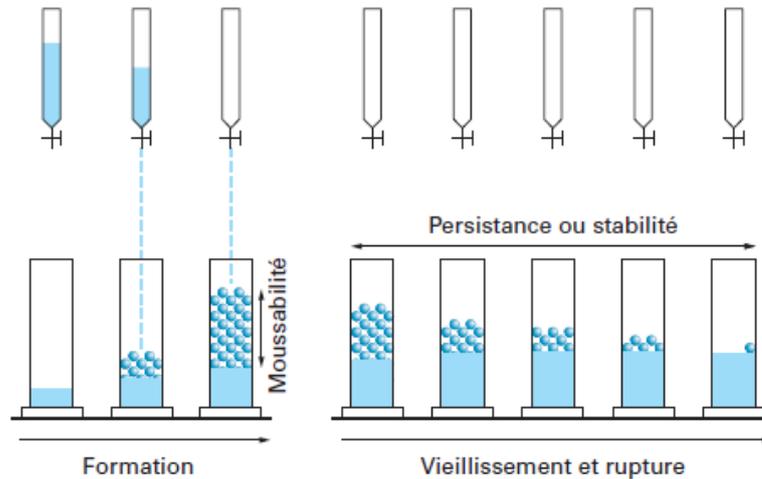
Schéma de la mousse



Structure moléculaire réelle de l'ovalbumine (on voit bien les enroulements des chaînes macromoléculaires)

## Document 10 : Test de Ross-Miles

Le test de Ross-Miles permet d'évaluer le pouvoir moussant d'un liquide, c'est-à-dire son aptitude à former une mousse. Il consiste à verser une quantité de ce liquide (200 mL) depuis une certaine hauteur (90 cm) dans un cylindre gradué contenant déjà le même liquide (50 mL). La hauteur de la colonne de mousse formée est une mesure de la moussabilité de la solution à la température de l'expérience.



Après avoir versé la solution, on peut suivre la variation de la hauteur de mousse dans la colonne en fonction du temps et prendre, comme estimation de la stabilité de la mousse, le temps pour qu'une fraction ou la totalité de la mousse disparaisse.

### Mode opératoire

#### Matériel

- Ampoule à décanter
- Eprouvette graduée de capacité 1 litre
- Chronomètre

#### Protocole

- Remplir l'éprouvette avec 50 mL de solution à étudier
- Introduire une partie du liquide dans l'ampoule à décanter jusqu'au trait de 150 mm
- Verser dans l'ampoule à décanter 500 mL de solution
- Laisser couler la solution en une seule fois jusqu'à ce que le niveau arrive au trait de 150 mm
- Noter le temps d'écoulement
- Mesurer le volume de mousse 30 s, 3 min et 5 min après arrêt de l'écoulement
- Exprimer les résultats en millilitres de mousse formés, 30 s, 5 min et 10 min après l'écoulement
- Effectuer 10 mesures en préparant à chaque fois une nouvelle solution

#### Précautions

- Effectuer tous les versements le plus doucement possible afin d'éviter la formation de mousse
- Ne mesurer que le volume de la mousse (pas du liquide)
- Si le niveau supérieur de la mousse présente une dépression au centre pendre, comme lecture, la moyenne entre le centre et les bords

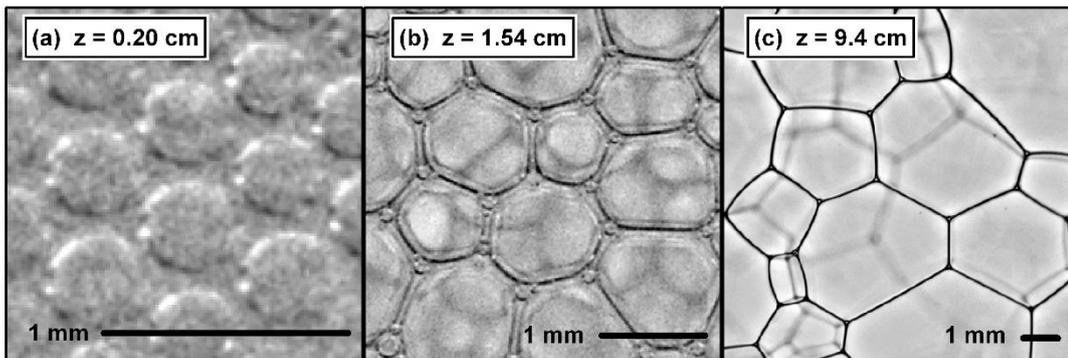
La stabilité moussante au temps  $t$  est donnée par la relation suivante :

$$S_m = \frac{\text{hauteur de mousse au temps } t}{\text{hauteur de mousse initiale}}$$

## Document 11 : Instabilité des mousses et mécanismes de rupture

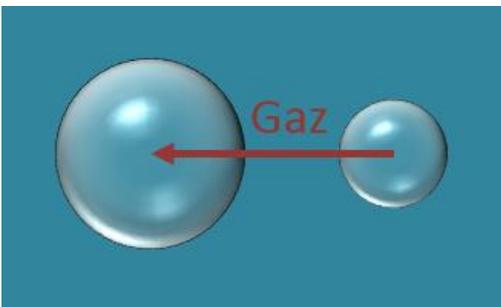
Une mousse est un système fondamentalement instable. Les bulles dispersées constituent autant de points de haute énergie matérialisés par des tensions de surface très élevées. Ainsi, la mousse tend à se déstabiliser pour revenir à un état minimal d'énergie en limitant la surface de contact des bulles avec la phase continue, induisant la formation de deux phases distinctes. En l'absence des mécanismes capables de ralentir voire d'inhiber la séparation des phases, le film liquide qui entoure les bulles de gaz continue à s'amincir jusqu'à sa rupture induisant la destruction de la mousse. Les trois mécanismes de déstabilisation des mousses sont :

### Le drainage



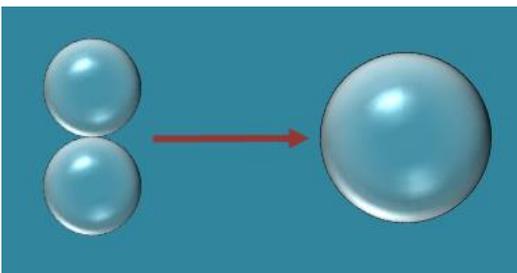
Sous l'effet de la gravitation, le liquide de la mousse s'écoule du haut vers le bas jusqu'à disparition des films d'eau autour des bulles d'air. Or la probabilité qu'un film éclate dépend de son épaisseur : plus une mousse draine vite, plus elle est instable.

### Le mûrissement d'Ostwald



C'est un phénomène qui correspond à une évolution lente de la distribution des tailles des bulles vers les tailles les plus élevées. Les petites bulles se vident dans les grosses par diffusion à travers les films liquides. Les grosses bulles, plus volumineuses, remontent plus rapidement en surface pour y disparaître.

### La coalescence



Deux bulles au moins fusionnent pour former une bulle plus grosse.

Technical Data Sheet



**AF1314 FG(4017)**  
**Silicone Antifoam 14% Solids Food Grade**

**Introduction**

Antifoam **AF1314 FG** is a highly active silicone emulsion based on activated polydimethylsiloxane. It has been specially formulated to prevent, control or destroy foam in liquid systems.

**Key Features**

- **Food contact approved**
- **Effective in hot or cold aqueous processes**
- **Easily dispersible in water**
- **Sterilisable**

**Applications**

**AF1314FG** is approved as a processing aid in applications where its use may bring it into contact with food.

It is also approved as a component during the manufacture of articles, which in their finished state are intended to be brought and /or are brought temporarily or permanently into contact with foodstuffs.

Typical applications include:-

Pharmaceutical production – fermentation processes for the manufacture of antibiotics etc.

Chemical production- fermentation processes for food acids eg citric, tartaric acid etc.

Enzyme production

Yeast manufacture and related industries eg alcohol distilling, brewing and fermentation

Washing of vegetables and fruit

Washing and cleaning of shellfish, poultry etc

Fruit juice extraction and soft drinks manufacture

Glucose syrup, confectionery and preserve production

**How to Use**

**AF1314 FG** can be used either as supplied or diluted with water to the desired concentration, depending on the characteristics of the system i.e. temperature, pH, volume of foaming/foamable liquor, degree of agitation, composition and dosing system available.

Dilution of **AF1314 FG** should be used within 12 hours from preparation. All equipment used to prepare dilutions of **AF1314 FG** should be thoroughly cleaned before refilling with diluted product and to prevent contamination by micro-organism, the container should be closed after usage. If the diluted antifoam is separated it is recommended to gently stir the emulsion to homogenize the system.

Concentration of **AF1314 FG** required for good foam control depends on the process where it is employed. If there is no previous experience of a foam problem, it is generally suggested to start with a concentration of 50 ppm of active silicone and then to adjust the amounts upwards or downwards in order to determine the most cost effective concentration.

**Recommendations regarding the concentration of silicones in foodstuffs**

The F&DA and W.H.O. and various other authorities record that, where permitted, the concentration of Polydimethylsiloxane in the final food for consumption do exceed 10ppm

Property*	Test Method	Value
Colour:		White
Appearance:		Milky Liquid
Solids Content:		15 %
Active Content:		10 %
Specific Gravity	BS 5350 Part B1	1.0
Viscosity	Brookfield	38000mPas
FDA Approved		Yes
Silicone Antifoam		Yes

**Suitable Diluents**

Water

**Health and Safety**

Available on request

**Packages**

200 kg. Drums, 1000 kg IBC.

**Storage and Shelf Life**

Over six months. This product should be stored between 5 and 30°C in clean sealed containers. The product should not be allowed to freeze.

Revision Date: 06/02/2008

\* The details are merely typical properties not specifications.

## Document 13 : Les différentes propriétés texturales

Elles peuvent être classées en 3 groupes :

### Caractéristiques mécaniques

Primaires :

- Dureté (hardness) : force requise pour comprimer une substance entre les molaires, ou entre la langue et le palais.
- Cohésion (cohesiveness) : déformation nécessaire pour provoquer la rupture entre les molaires.
- Viscosité (viscosity) : force nécessaire pour aspirer un liquide dans une cuillère.
- Élasticité (elasticity) : capacité d'un matériau à reprendre sa forme initiale après déformation.
- Adhésivité (adhesiveness) : aptitude à adhérer aux surfaces de contact, en particulier le palais, les dents et la langue, pendant la mastication.

Secondaires :

- Fracturabilité (fracturability) : force à laquelle le matériau casse ; propriété liée à la cohésion et à la dureté.  
Autres caractéristiques liées à la fracturabilité :
  - Fragilité (brittleness) : tendance à craquer, à se fissurer sans déformation préalable importante.
  - Croustillant (crispness) : aptitude à produire un son lors de la mastication (pour être croustillant, un aliment doit être fragile et dur).
  - Friabilité (crumbliness) : tendance à se rompre facilement en petites particules irrégulières.
- Masticabilité (chewiness) : énergie nécessaire pour mastiquer un aliment solide pour l'amener à un état propice à la déglutition. Propriété liée à la dureté, la cohésion et l'élasticité (la notion de temps intervient également dans la masticabilité).
- Texture gommeuse (gumminess) : texture d'un produit dont la densité perdure tout au long de la mastication.

### Caractéristiques géométriques

- Taille des particules : granulosité (graininess, grittiness)
- Forme de particules et arrangement : fibrosité (fibrosity), texture feuilletée (flakiness), pulposité (pulpiness), texture mousseuse (foaminess), texture spongieuse (sponginess), etc.

### Autres caractéristiques

- Humidité (moisture content)
- Contenance en graisse (fat content)

Paramètres texturaux	Descripteur de texture
<i>Caractéristiques mécaniques</i>	
Dureté	Mou → ferme → dur
Cohésion	
Fracturabilité	Grumeleux → croquant → cassant
Masticabilité	Tendre → caoutchouteux → dur
Texture gommeuse	Friable → farineux → pâteux
Viscosité	Liquide → visqueux
Elasticité	Plastique → élastique
Adhésivité	Collant → gluant → glissant
<i>Caractéristiques géométriques</i>	
Taille des particules	Granuleux, sableux, grossier, etc.
Forme de particules et arrangement	Fibreux, cellulaire, cristallin, mousseux, etc.
<i>Autres caractéristiques</i>	
Humidité	Sec → humide → mouillé → aqueux → juteux
Contenance en graisse	Huileux, gras

Tableau récapitulatif des propriétés texturales

## Document 14 : Produits de référence pour l'évaluation de la texture

Dureté	Fracturabilité	Viscosité	Masticabilité	Adhésivité
Fromage fondu à la crème	Muffin	Eau	Pain frais	Margarine
Blanc d'œuf	Œuf dur	Crème légère	Saucisse de Francfort	Fromage fondu
Saucisse de Francfort	Cracker	Crème épaisse	Bonbon gélifié	Fromage frais
Fromage Gouda	Biscotte	Lait concentré	Steak à point	Crème chantilly
Olives vertes	Cookie	Sirop d'érable	Caramel mou	Nutella
Cacahuètes	Sablé	Chocolat fondu	Carambar	
Carottes	Barre céréalière	Glaçage de pudding		
Cacahuètes pralinées		Confiture de lait		
Sucre Candi				

*Echelles de référence pour les propriétés mécaniques*

Granulosité		Forme de particules	
Propriété	Produit de référence	Propriété	Produit de référence
Poudreux (powdery)	Sucre glace, poudre de cacao	Feuilleté (flaky)	Pâte feuilletée
Crayeux (chalky)	Meringue sèche, pâte dentifrice	Fibreux (fibrous)	Poulet
Grenu (grainy)	Semoule de blé dur	Pulpeux (pulpy)	Orange
Granuleux (gritty)	Poire, sablé, boudoir (côté sucré)	Cellulaire (cellular)	Pomme, gâteau
Grossier (coarse)	Flocons d'avoine cuits	Aéré (aerated)	Crème chantilly
Grumeleux (lumpy)	Fromage blanc non battu	Brioché, soufflé (puffy)	Brioche
Perlé (beady)	Tapioca cuit, œufs de lompe	Cristallin (crystalline)	Sucre semoule

*Produits de référence pour les propriétés géométriques*

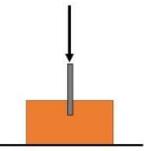
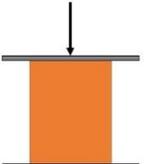
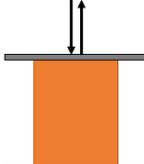
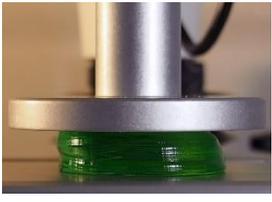
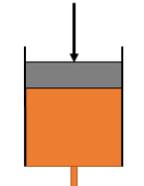
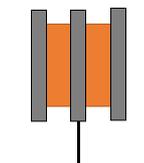
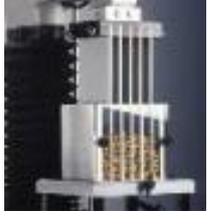
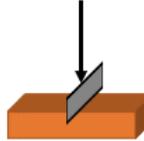
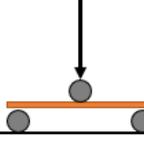
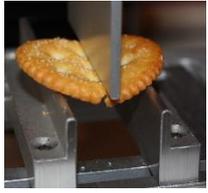
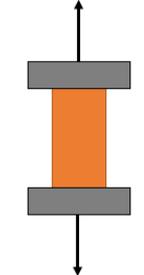
## Document 15 : Principe de fonctionnement du texturomètre



*Texturomètre TA-XT Plus de SMS*

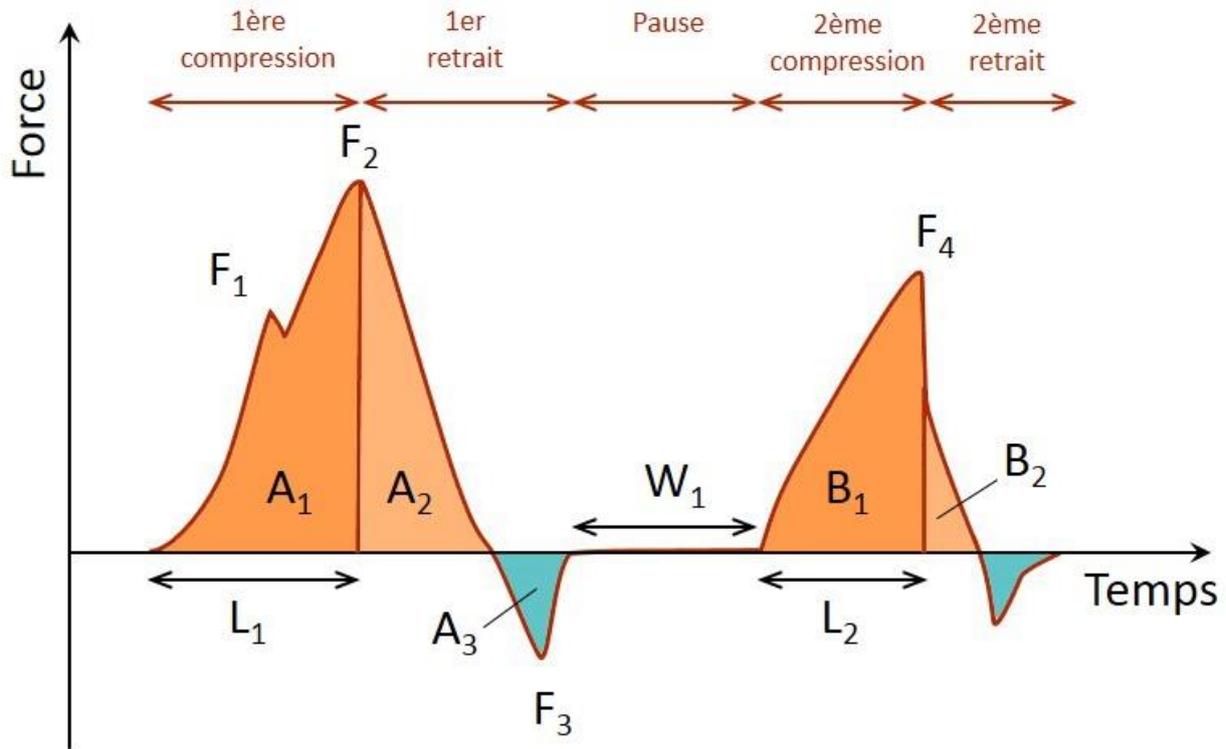
Un texturomètre est un capteur de force : une sonde est fixée à un bras mobile, lequel est mis en mouvement et entre en contact avec le produit. Dès que la sonde touche l'échantillon, elle exerce une force sur celui-ci et, selon le principe de l'action-réaction, l'échantillon exerce une force sur la sonde. C'est cette force qui est mesurée et enregistrée. Le résultat de la mesure est un graphique représentant la force en fonction de la distance parcourue par la sonde. La multiplicité des sondes et des dispositifs de présentation de l'échantillon permet une très grande variété de tests.

## Document 16 : Les principales familles de tests en textuométrie

Test	Principe	Sonde utilisée	Exemples d'application	Illustration
<b>Pénétration</b> 	Une sonde pénètre dans l'aliment et mesure la force nécessaire pour atteindre une certaine profondeur.	Aiguille	Dureté de bonbons Dureté des fruits et légumes Tendreté de viande	
<b>Compression</b> 	Une compression est appliquée à l'aliment et on mesure la résistance de ce dernier.	Sonde plate, cylindrique ou ronde (bille)	Fermeté de fromage Fraîcheur de pain	
<b>Profil de texture</b> (TPA, <i>Texture Profile Analysis</i> ) 	Test imitatif constitué de deux compressions successives de manière à refléter la mastication.	Sonde plate ou cylindrique	Très polyvalent, permet d'obtenir de façon simultanée plusieurs paramètres texturaux	
<b>Extrusion</b> 	Le produit est contenu dans une cellule et une pression lui est appliquée jusqu'à ce qu'il s'écoule par un orifice prévu à cet effet.	Sonde poussoir plate et cellule d'extrusion	Mesure de la consistance (compotes, crèmes)	
<b>Cisaillement</b> 	Une contrainte de cisaillement est appliquée. La force maximale et le travail fourni sont des indices de fermeté et de dureté.	Cellule de Kramer Cellule de Warner-Bratzler	Dureté de petits fruits Croustillant de céréales ou de chips	
<b>Tranchage</b> 	La force nécessaire pour trancher le produit est mesurée.	Lame	Facilité de découpe de la viande	
<b>Flexion</b> 	Une contrainte est appliquée perpendiculairement à la surface de l'échantillon qui se plie avant de rompre.		Cassant d'un biscuit	
<b>Traction</b> 	On mesure la force nécessaire pour étirer l'échantillon d'une longueur donnée.		Résistance à la traction des pâtes, des pizzas, etc.	

## Document 17 : Le profil de texture (TPA)

Le TPA est un test imitatif : il s'agit d'imiter les contraintes subies par le produit lors de la mastication. Deux compressions successives sont réalisées et on obtient une courbe appelée *profil de texture*.



Paramètre textural	Définition sensorielle	Définition instrumentale
<b>Fracturabilité</b>	Force nécessaire pour obtenir une rupture	$F_1$
<b>Dureté</b>	Force nécessaire pour comprimer l'aliment entre les molaires	$F_2$
<b>Résilience</b>	Manière dont un échantillon récupère d'une déformation	$\frac{A_2}{A_1}$
<b>Adhésivité</b>	Effort pour surmonter les forces d'attraction entre l'aliment et la surface de la sonde	$A_3$
<b>Indice d'élasticité</b>	Hauteur à laquelle l'échantillon retrouve sa forme initiale après la première compression	$\frac{L_2}{L_1}$
<b>Cohésivité</b>	Effort de la seconde compression par rapport à celui de la première compression (indice de la déstructuration)	$\frac{B_1}{A_1}$
<b>Texture gommeuse</b>	Difficulté à mâcher un produit semi-solide sans élasticité	$F_1 \times \frac{B_1}{A_1}$
<b>Masticabilité</b>	Effort nécessaire pour mâcher un aliment solide pour pouvoir l'avaler	$F_1 \times \frac{B_1}{A_1} \times \frac{L_2}{L_1}$

---

# RÉFÉRENCES

---

- Bergeron, V. (2003). Antimousses et agents dé moussants - Mécanismes d'action. *Techniques de l'ingénieur*, J2205.
- Bergeron, V. (2003). Antimousses et agents dé moussants - mise en oeuvre industrielle. *Techniques de l'ingénieur*, J2206.
- Breene, W. (1975). Application of texture profile analysis to instrumental food texture evaluation. *Journal of Texture Studies*, 6, 53-82.
- Brummer, R. (2006). *Rheology essentials of cosmetic and food emulsions*. Springer.
- Chavez-Montes, B., Choplin, L., & Schaer, E. (2007). Rheological characterization of wet food foams. *Journal of Texture Studies*, 38, 236-252.
- Chokyun, R. (1975). *Theory, determination and control of physiscal properties of food materials*. D. Reidel Publishing Company.
- Civille, G., & Szczesniak, A. (1973). Guidelines to training a texture profile panel. *Journal of Texture Studies*, 4, 204-223.
- Coussot, P., & Grossiort, J.-L. (2001). *Comprendre la rhéologie, de la circulation du sang à la prise du béton*. EDP Sciences.
- Delacharlerie. (2009). *HACCP organoleptique, guide pratique*. Presses agronomiques de Gembloux.
- Denkov, N. D., Marinova, K. G., & Tcholakova, S. S. (2014). Mechanistic understanding of the modes of action of foam control agents. *Advances in colloid and interface science*, 206, 57-67.
- Erçelebi, E., & Ibanoglu, E. (2008). Effects of ionic strength on the foaming properties of whey protein isolate and egg white in the presence of polysaccharides. *Journal of Food Processing and Preservation*, 33, 513-526.
- Goupy, J. (2001). *Introduction aux plans d'expériences*. Dunod.
- Karakashev, S. I., & Grozdanova, M. V. (2012). Foams and antifoams. *Advances in colloid and interface science*, 176-177, 1-17.
- Kawale, D., & van Nimwegen, A. (2015). The relation between the dynamic surface tension and the foaming behaviour in a sparger setup. *Colloids and surfaces A : physicochemical and engineering aspects*, 481, 328-336.
- Kramer, A., & Szczesniak, A. (1973). *Texture measurement of foods*. D. Reidel publishing company.
- Launay, B., & Cuvelier, G. (1989). Rhéologie et industries alimentaires, cosmétiques et pharmaceutiques. *24ème colloque annuel du groupe français de rhéologie*. Paris: MRT.
- Lawless, T., & Heymann, H. (1999). *Sensory evaluation of food, principles and practices*. Springer.
- Nofar, M., & Park, C. B. (2014). Poly (lactic acid) foaming. *Progress in polymer science*, 39, 1721-1741.
- Pierlot, C. (2010). *Contribution des plans d'expériences à l'oxydation et à la formulation (Habilitation à diriger des recherches)*. Université des sciences et technologies de Lille 1.
- Richardson, M. (2009). *Principal component analysis*. Récupéré sur University of Oxford - Mathematical institute: <http://people.maths.ox.ac.uk/richardsonm/SignalProcPCA.pdf>
- Rodriguez Patino, J. M., Sanchez, C. C., & Niño, R. R. (2008). Implications of interfacial characteristics of food foaming agents in foam formulations. *Advances in colloid and interface science*, 140, 95-113.

- Salager, J.-L., & Choplin, L. (2008). Mousses - Formation, formulation et propriétés. *Techniques de l'ingénieur*, J2200.
- Schorsch, C. (2007). Formulation des mousses laitières. *Techniques de l'ingénieur*, J2268.
- Shlens, J. (2003). *A tutorial on principal component analysis. Derivation, discussion and singular value decomposition*.  
Récupéré sur Princeton University - Department of Computer Science:  
[https://www.cs.princeton.edu/picasso/mats/PCA-Tutorial-Intuition\\_jp.pdf](https://www.cs.princeton.edu/picasso/mats/PCA-Tutorial-Intuition_jp.pdf)
- Slack, A., & Amundson, C. (1986). Foaming and emulsifying characteristics of fractionated whey protein. *Journal of food processing and preservation*, 10, 81-88.
- Szczesniak, A. (1963). Classification of textural characteristics. *Journal of food science*, 28, 385-389.
- This, H. (2008). Dans la famille "mousses au chocolat" ... *L'Actualité Chimique*, 319, 10-13.
- TTC. (2015). *An Overview of Texture Profile Analysis (TPA)*. Récupéré sur TTC-Texture technologies:  
<http://texturetechnologies.com/texture-profile-analysis/texture-profile-analysis.php>