



## Département de Technologie Chimique Industrielle

### Rapport de Soutenance

En vue de l'obtention du diplôme  
de Licence Professionnelle en :  
**Génie Chimique**

### Thème :

**Etude rhéologique des peintures**

#### Réalisé par :

M<sup>elle</sup> HADDOU Manal

#### Encadré par :

- Mr. BELKACEMI Samir (Encadreur) MAA / Institut de technologie
- Mr. CHERIGUI Moustapha (Tuteur) Tuteur / PIGMA COLOR -BOUIRA

#### Corrigé par :

- M<sup>me</sup> BETTAYEB Souhila MAA / Examinatrice/ Institut de technologie

# Remerciements

*Ce travail est l'aboutissement d'un dur labeur et de beaucoup de sacrifices, je remercie d'abord au Créateur de l'univers qui m'a doté d'intelligence, et ma maintenu en santé pour mener à bien cette année d'étude. Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon stage et qui m'ont aidée lors de la rédaction de ce mémoire.*

*Je voudrais dans un premier temps remercier, mon directeur de mémoire BELKACEMI Samir, pour l'orientation, la confiance, la patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité.*

*Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance aux personnes suivantes, pour leur aide dans la réalisation de ce mémoire :*

*Monsieur : CHERIGUI Moustapha*

*Monsieur : REZINI Abdelkader*

*Mademoiselle : SOUHYLA*

# *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire à mes très chers parents*

*Et maman "HADDOU Tourkia," et ma tante "Fatiha"*

*Qui m'ont toujours poussé et motivé dans mes études, sans eux je n'aurai  
certainement pas fait cela .*

*Ce mémoire représente l'aboutissement de soutien qu'ils m'ont prodigués tout  
au long de ma scolarité.*

*Qu'ils en soient par ce modeste travail.*

*A mes frères : Antar, Farouk, Mohamed , Ayoub*

*A mes chères amies : Rima, khaoula, Hasna imane ,Nadjet , Meriem*

## Liste des tableaux

<b>Tableau I-1</b> : Différences propriétés entre M/D .....	13
---	----

## Liste des figures

### Chapitre I : Généralités sur la peinture

<b>Figure I-1</b> : Situation géographique de la société .....	2
<b>Figure I-2</b> : Organigramme de la société .....	3
<b>Figure I-3</b> : Echantillon de Peinture .....	4
<b>Figure I-4</b> : Liant (résine) .....	4
<b>Figure I-5</b> : Pigment .....	5
<b>Figure I-6</b> : Charge .....	5
<b>Figure I-7</b> : Solvant .....	6
<b>Figure I-8</b> : Additif .....	6
<b>Figure I-9</b> : Procédé de fabrication des peintures .....	9
<b>Figure I-10</b> : Tension superficielle d'une solution de mouillant dans l'eau .....	13

### Chapitre II: Généralités sur la rhéologie

<b>Figure II-1</b> : Forces de frottement s'exerçant sur deux couches adjacentes lors d'un cisaillement.....	19
<b>Figure II-2</b> : Gradient de déplacement dans un mouvement de cisaillement plan.....	21
<b>Figure II-3</b> : Interprétation géométrique de $\epsilon$ .....	22
<b>Figure II-4</b> : Interprétation géométrique de $\epsilon$ dans un cas particulier.....	22
<b>Figure II-5</b> : Exemple de rhéogramme.....	26
<b>Figure II-6</b> : Réhéogramme newtonien.....	26
<b>Figure II-7</b> : Gradient de vitesse en fonction de contrainte de cisaillement ( fluide Newtonien).....	30
<b>Figure II-8</b> : fluide pseudo plastiques dans les peintures dispersion.....	31
<b>Figure II-9</b> : Gradient de vitesse en fonction de contrainte de cisaillement (fluide PP avec limite d'écoulement).....	31
<b>Figure II-10</b> : Gradient de vitesse en fonction de contrainte de cisaillement (fluide dilatatant) .....	32
<b>Figure II-11</b> : Rhéogramme d'un fluide pseudoplastique thixotrope .....	33
<b>Figure II-12</b> : Rhéogramme d'un fluide pseudoplastique rhéopectique .....	34
<b>Figure II-13</b> : Rhéomètre plan-plan .....	35
<b>Figure II-14</b> : Cylindres coaxiaux .....	36

<b>Figure II-15: Géométrie con-plan .....</b>	<b>37</b>
---	-----------

### **Chapitre III : Cas pratique d'étude rhéologique des peintures**

<b>Figure III-1 :_Test d'applicabilité sur carte contraste .....</b>	<b>39</b>
--	-----------

<b>FigureIII-2: Evolution de la viscosité en fonction de gradient de cisaillement.....</b>	<b>40</b>
--	-----------

Remerciements.....	i
Liste des tableaux.....	ii
Liste des figures.....	iii

## Sommaire

Introduction.....	8
-------------------	---

### Chapitre I : Généralités sur la peinture

I.1. Présentation de la société .....	2
I.1.1. Historique .....	2
I.1.2. Situation géographique .....	2
I.1.3. Organisation des ateliers de la société.....	3
I.1.4. Organigramme de la société .....	3
I.2. Généralités sur la peinture .....	4
I.2.1. Définition.....	4
I.2.2. Composants de la peinture :.....	4
I.2.2.2. Pigments .....	5
I.2.2.3. Charges .....	5
I.2.2.4. Solvants .....	6
I.2.2.5. additifs (Adjuvants) :.....	6
I.2.3. Différentes gammes de peintures .....	7
I.2.3.1. Peinture pour bâtiments :.....	7
I.2.3.2. Peinture industrie :.....	7
I.2.3.3. Peinture carrosserie : .....	7
I.2.3.4. Peinture boiserie : .....	7
I.2.3.5. Peinture décorative : .....	7
I.2.4. Types de la peinture.....	8
I.2.4.1. Peinture en phase aqueuse .....	8
I.2.4.2. Peinture en phase solvant .....	8
I.2.5.1. Préparation des matières premières .....	9
I.2.5.2. Procédé de fabrication .....	9

I.2.6.Généralité sur les différents additifs .....	10
I.2.6.1.Phase eau : .....	10
I.2.6.1.1.Agent dispersants .....	10
I.2.6.1.2.Agents mouillants .....	11
I.2.6.1.2.1. Différences Mouillant / Dispersant .....	13
I.2.6.1.3.Agents antimousses .....	14
I.2.6.1.4.Agents Biocides .....	14
I.2.6.1.5.Régulations de PH .....	14
I.2.6.1.6.Agents Epaississants.....	14
I.2.6.2.Phase solvant .....	16
I.2.6.2.1.Agent mouillant .....	16
I.2.6.2.2.Agent dispersant .....	16
I.2.6.2.3.Agent siccatif .....	16
I.2.6.2.4.Agent plastifiant .....	16
I.2.6.2.5.Agents anti-peaux.....	17

## **Chapitre II : Généralité sur la rhéologie**

II.1 Introduction .....	18
II.2. Définition de la rhéologie.....	18
II.3. Grandeurs physiques intervenant en rhéologie .....	18
II.3.1. Mouvement laminaire de cisaillement, contraintes de cisaillement.....	18
II.3.2. Déformation et vitesse de cisaillement (shear strain and rate).....	20
II.3.3. Equation rhéologique d'état, rhéogrammes .....	24
II.3.4. Viscosités .....	25
II.3.5. Limite du régime laminaire-Nombre de Reynolds.....	28
II.4. Différents types de la rhéologie .....	28
II.4.1. Fluides Newtoniens :.....	28
II.4.2. Fluide pseudo plastique.....	29
II.4.3. Fluides dilatants : .....	31
II.4.4. Notion de thixotropie et de rhéopexie .....	32
II.5. Mesure des caractéristiques rhéologiques des fluides.....	33
II.5.1 Rhéomètre plan- plan .....	33

II.5.2 Rhéomètre de couette .....	34
II.5.3 Rhéomètre cône-plan.....	36

### **Chapitre III : Cas pratique d'étude rhéologique des peintures**

III.1. Introduction.....	38
III.2. Etude rhéologique de peintures commerciales .....	38
III.2.1. Test d'applicabilité .....	39
III.3. Etude de cas revêtement .....	39
III.3.1. Rhéologie à forts gradients de cisaillement et épaisseurs de films de peintures	39
III.3.1.2. Méthodologie .....	40
Résultats .....	41
Conclusion .....	41
Conclusion générale.....	42
Références bibliographiques.....	43

# **Introduction**

# Introduction

Les produits de finition (peintures, vernis, lasures...) ont un double rôle : protéger et décorer.

La peinture est la finition la plus utilisée. Elle protège principalement des salissures et de l'eau. Elle décore par sa couleur et son aspect : mat, satiné ou brillant.

Une peinture est un mélange de plusieurs composants dont les qualités et le dosage déterminent les aptitudes.

L'usage de la peinture en décoration date des peintures dans les cavernes de l'époque paléolithique. Dans la Grèce antique, on se servait largement de la peinture en architecture, en sculpture, pour la décoration des navires, pour la décoration des intérieurs et la peinture au chevalet. Durant plusieurs siècles, la peinture, fabriquée laborieusement par des artisans est restée un luxe. Ce n'est qu'au 18ème siècle, que la peinture commence à être produite en grande quantité. Après la Première Guerre mondiale, les chimistes s'intéressent à la technologie de la peinture et, vers les années 1950, l'industrie de la peinture représente un domaine important du génie chimique [1].

La rhéologie associée à l'étude des fluides complexes est omniprésente couramment dans les milieux industrielles tels que l'industrie des polymères, des peintures, pharmaceutiques, agroalimentaire, etc.

La caractérisation rhéologique permet une meilleure transformation et la mise en forme de tels matériaux. Ainsi, il est important de déterminer les différents rhéogrammes en termes de contraintes de cisaillement et de viscosité en fonction de taux de cisaillement à différentes températures [2].

Le présent document, décrit la rhéologie des peintures, ainsi ce mémoire comprend trois chapitres :

- Le premier chapitre comprend une présentation de l'entreprise où je devrais réaliser mon stage à savoir PIGMA COLOR, suivi de généralités sur les peintures et les additifs.
- Le deuxième chapitre : constitue une initiation et généralités sur la rhéologie.
- Le troisième chapitre : traite un cas pratique d'une étude rhéologiques des peintures.

Et enfin on termine par une conclusion générale.

# **Chapitre I : Généralités sur la peinture**

## **Chapitre I : Généralités sur la peinture**

### **I.1. Présentation de la société [3]**

#### **I.1.1.Historique**

La société PIGMA COLOR a été fondée en février 2007, née d'une véritable passion pour la fabrication et la réalisation de la peinture. Elle est organisée suivant la structure juridique de SARL.

La SARL PIGMA COLOR a débuté en 2007 avec la fabrication de 15 colories de teintes. Depuis et progressivement, la société a développé et varié sa production pour arriver au stade actuel, C'est une entreprise à responsabilité limitée. Passant d'une petite à une moyenne entreprise, PIGMA compte 140 employés avec un capital de 50 000 000.00 DA.

#### **I.1.2.Situation géographique**

La société s'étend sur une superficie de 6542 m<sup>2</sup> au niveau de la zone industrielle SIDI KHALED OUED EL BARDI, BOUIRA.



**Figure I.1 : Situation géographique de la société**

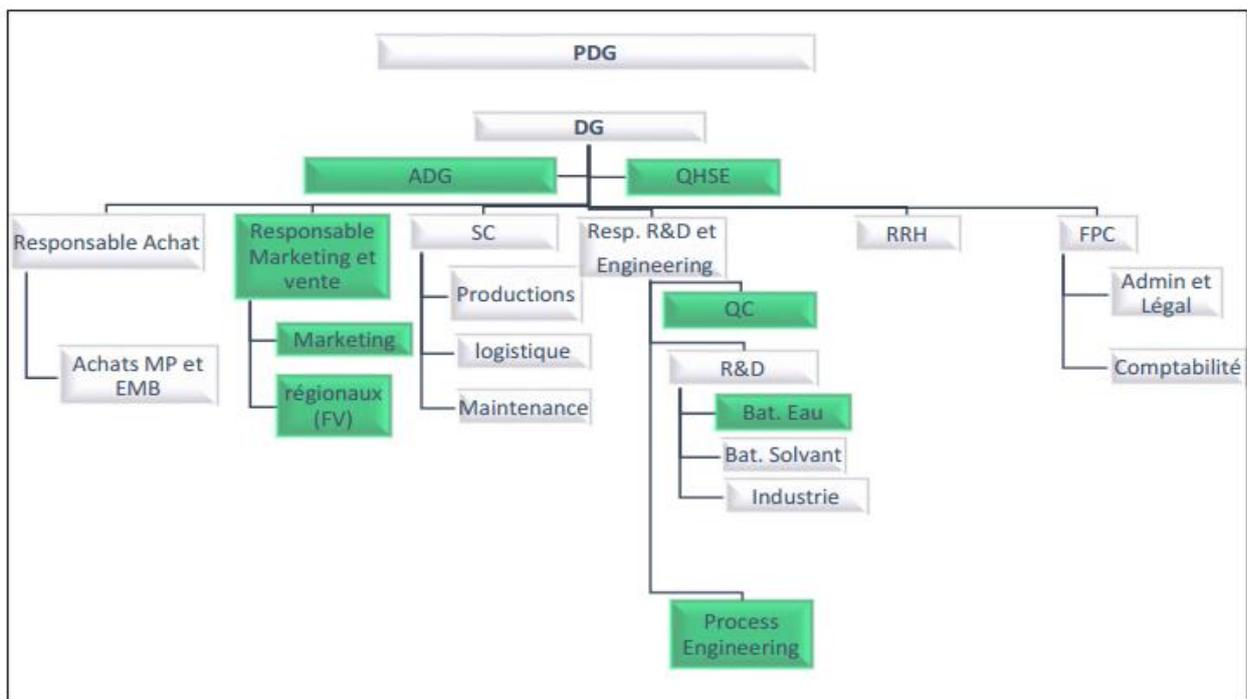
### I.1.3. L'organisation des ateliers de la société

- ✚ **Administration Générale** : (Direction générale et administration, service marketing et vente, service recherche et développement, service achats et approvisionnements, service finance et comptabilité, service ressources humaines, service hygiène sécurité et environnement).
- ✚ **Un atelier de stockage des matières premières**
- ✚ **Un atelier de production** : fabrication des peintures, et conditionnement.
- ✚ **Un laboratoire** : pour le contrôle de qualité du produit fini, matière première et développement des nouveaux produits.
- ✚ **Un atelier de stockage des produits finis** ce dépôt sert aussi de plateforme d'expédition, pour la livraison aux distributeurs, à travers tout le territoire national..

### I.1.4. L'organigramme de la société

La société PIGMA COLOR contient six services situés au même niveau hiérarchique.

Elle a choisi une structure fonctionnelle, les fonctions fondamentales sont toutes situées au même niveau et rattachées directement à la direction générale.



**Figure I.2 : Organigramme de la société**

## **I.2. Généralités sur la peinture**

### **I.2.1. Définition**

Une peinture est une préparation fluide (liquide, pâteuse ou pulvérulente) qui peut s'étaler en couche mince sur différents matériaux dit (subjectiles) pour former les films de la peinture, après séchage ou réticulation (durcissement), un revêtement mince. Pour remplir son rôle, le système de la peinture doit être adhérent, continu, imperméable et durable dans le temps. Son aspect esthétique (brillance, couleur) doit être conservé [4].



**Figure I.3 : Echantillon de Peinture**

### **I.2.2. Composants de la peinture**

#### **I.2.2.1. Liants**



**Figure I.4 : Liant (résine)**

Constituant principal d'une peinture, d'un vernis ou d'une lasure. C'est une substance d'origine naturelle ou synthétique. Elle peut se présenter sous une forme

liquide, sous une forme visqueuse ou même sous une forme solide.

En fonction de sa nature chimique, le rôle d'un liant est d'assurer des caractéristiques bien particulières à une peinture. Il procure aussi une parfaite cohésion entre tous les composants constituant la peinture. De plus, il est garant d'une bonne adhérence sur un support [5].

### **I.2.2.2. Pigments**



**Figure I.5 : Pigment**

Substance colorée d'origine minérale, organique. Elle s'incorpore dans les peintures, les vernis ou les lasures. Elle se présente sous la forme de fines particules insolubles dans un milieu en suspension. Cette matière chimique colorante ne se dissout pas mais se disperse [5].

### **I.2.2.3. Charges**



**Figure I.6 : Charge**

Substance minérale d'origine naturelle blanche ou légèrement colorée. Ces particules sont pratiquement insolubles dans un milieu en émulsion, en suspension ou en dispersion.

Une matière de charge présente un très mauvais pouvoir opacifiant. Elle s'introduit principalement dans les peintures ou les préparations assimilées. Elle permet d'arriver à un taux de

matières pulvérulentes optimum. En effet, il est difficile de réaliser un bon équilibre uniquement avec des pigments.

Une charge aide aussi à améliorer les caractéristiques chimiques, physiques ou mécaniques d'une peinture. Les charges interviennent trop souvent pour juste abaisser le prix de revient d'une formule [5].

#### **I.2.2.4. Solvants**



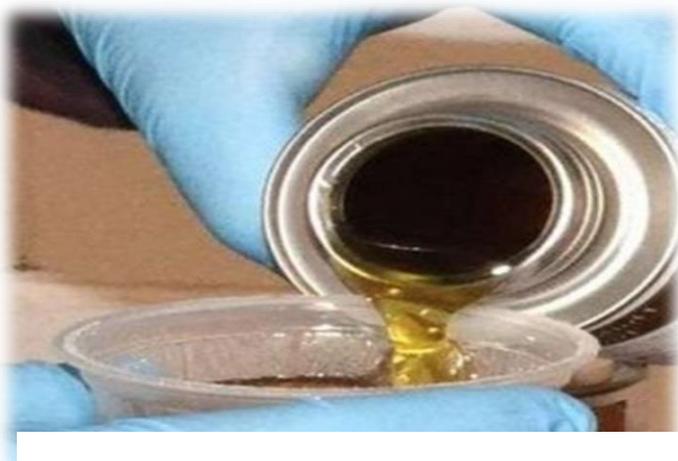
**Figure I.7 : Solvant peinture et vernis**

Le solvant est une substance importante dans la formulation et la fabrication des peintures. Notamment pour le réglage de sa viscosité de telle sorte que son application est adéquate. Les solvants sont aussi des composées qui servent à solubiliser le liant polymère (résines) et pour faciliter l'étalement sur le support. Après leur utilisation, ils sont éliminés du film par

évaporation pendant le séchage. A l'exception de l'eau, les solvants sont aussi appelées composés organiques volatils (COV).

Il est possible de regrouper les nombreux solvants utilisés dans les peintures en cinq familles distinctes : les hydrocarbures, les alcools, les éthers de glycol, les esters et les cétones [5].

#### **I.2.2.5. Additifs (Adjuvants)**



**Figure I.8 : Additif**

Ce sont des substances de diverses natures chimiques incorporées dans les peintures pour développer certaines propriétés

Spécifiques(viscosité, effet stabilisateur...) [5].

### **I.2.3. Différents gammes de peintures [3]**

#### **I.2.3.1. Peinture pour bâtiments**

- Enduit.
- Peinture vinylique phase eau.
- Peinture Satinée phase eau.
- Fixateur.
- Revêtement plastique épais

#### **I.2.3.2. Peinture industrie**

- Apprêt cellulosique.
- Laque cellulosique.
- Peinture anticorrosion.
- Peinture de signalisation routière.
- Peinture pour sol industriel.
- Peinture marine

#### **I.2.3.3. Peinture carrosserie**

- Mastic.
- Laque carrosserie.
- Laque cellulosique

#### **I.2.3.4. Peinture boiserie**

- Vernis lasure.
- Vernis cellulosique.
- Vernis polyuréthane.
- Colle bois

#### **I.2.3.5. Peinture décorative**

- A fleur.
- Stuc.
- Sablé (doré, argenté et d'autres couleurs selon le besoin du client)

## **I.2.4. Types de la peinture**

### **I.2.4.1. Peinture en phase aqueuse**

On les appelle aussi peintures à l'eau, ou la base est constituée de liants solubles dans l'eau. on trouve plusieurs types comme :

#### **I.2.4.1.1. Peinture vinylique**

C'est un mélange d'eau, de pigments et d'acétate de polyvinyle (PVA). L'acétate de polyvinyle est un composé chimique utilisé aussi dans la fabrication d'adhésifs [6].

#### **I.2.4.1.2. Peinture acrylique**

Autrefois appelée peinture à l'eau. Elle se compose d'un mélange de pigments liés par une Résine acrylique, à laquelle elle doit son nom. Elle est plus utilisée à l'extérieur pour sa Résistance aux intempéries [7].

#### **I.4.1.1.3. Peinture satinée**

Peinture satinée à base de résines alkydes en émulsion et acryliques, pour la décoration Intérieure et extérieure, sans odeur [8].

### **I.2.4.2. Peinture en phase solvant**

Les peintures qui se diluent au solvant organique. On cite :

#### **I.2.4.2.1. Peinture Glycérophtalique**

C'est une peinture contenant une résine glycérophtalique, elle sèche par oxydation de son liant et par évaporation des solvants organiques qu'elle contient [7].

#### **I.2.4.2.2. Peinture époxydique**

Composée d'une base contenant des liants polymères époxydiques, qui réagissent en contact avec le durcisseur pour un séchage chimique [7].

#### **I.2.4.2.3. Peinture polyuréthane**

C'est une peinture à deux composants, résines polyesters ou acryliques qui durcissent en présence d'une résine iso cyanate. Souvent employée pour les sols [7].

### I.2.5. Technique de fabrication d'une peinture

La fabrication industrielle des peintures consiste à réaliser en atelier de production, les formules mises au point sur quelques kilogrammes dans un laboratoire d'étude, et ce à l'aide d'un matériel approprié aux tonnages à fournir.

#### I.2.5.1. Préparation des matières premières

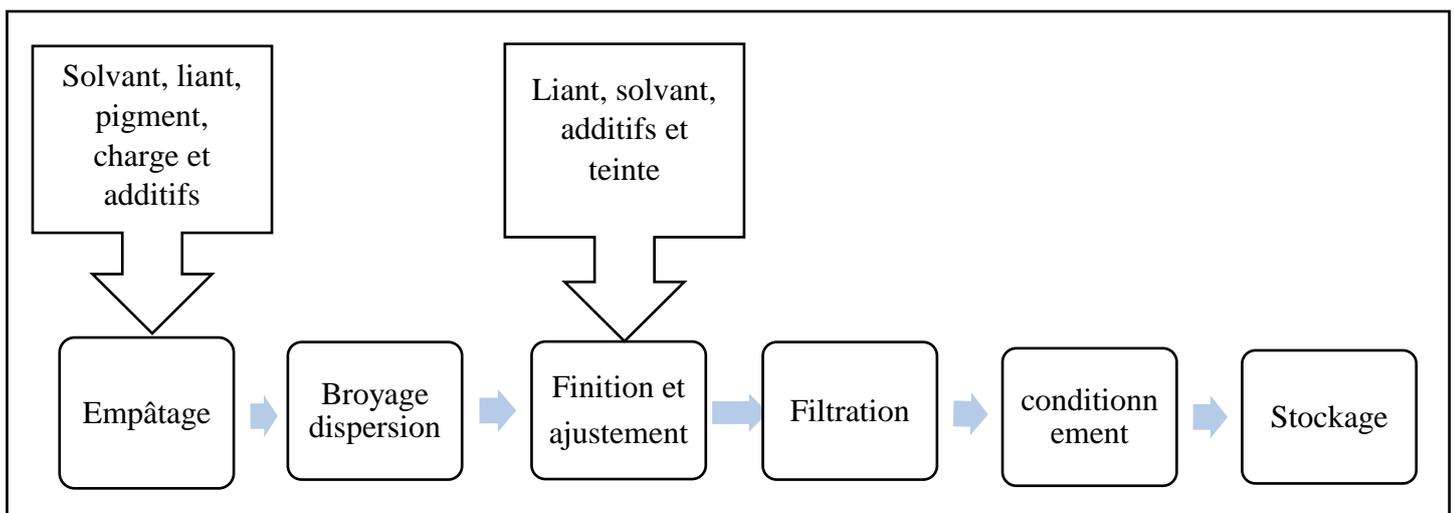
Les matières premières peuvent faire l'objet d'un prétraitement tel que par exemple :

- une pré-dispersion.
- un pré-mélange ou une pré-dissolution.
- un traitement granulométrique (broyage d'agglomérats de pigments).
- une préparation des pigments sous forme de poudre.

La préparation des pigments sous forme de poudre sèche consiste à filtrer la suspension de base des synthèses et récupérer les pigments sous forme d'agrégats (par exemple par Filtration) et de les sécher, les broyer par la suite.

#### I.2.5.2. Procédé de fabrication

Fabriquer une peinture ou encre consiste à disperser les matières pulvérulentes dans une solution ou une dispersion de résine. C'est parfois le même processus qui est utilisé dans la fabrication des colles et adhésifs qui contiennent des charges minérales. Le processus peut se schématiser de la façon suivante :



**Figure I.9 : Procédé de fabrication des peintures**

- **Empâtage** : Au cours duquel les éléments solides (pigments et charges) sont dispersés dans une partie du liant ; des solvants et d'adjuvants [9].
- **Le broyage et dispersion** : Les forces de cisaillement développées dans cette phase doivent être supérieures aux forces de cohésion qui unissent les particules pour désagglomérer les pigments et charges et avoir un mélange uniforme et obtenir la finesse maximale recherchée pour le film [10].
- **La finition et ajustement** : Au cours de cette étape les compléments sont bien répartis de façon homogène dans la pâte c'est-à-dire réserver un temps de mélangeage suffisant pour éviter une ré agglomération des particules. Donc le broyage de formule est complété, la teinte est ajustée et la peinture est conduite aux caractéristiques désirées [9].
- **La filtration** : la filtration est effectuée pour enlever les impuretés et pour attraper de petites particules dûes au broyage .Les peintures peuvent être filtrées par une multitude de moyens et l'utilisation finale du produit détermine le type de filtration. L'utilisation des filtres de 40 à 80 µm est recommandée pour la filtration des peintures et laques de finition [11].
- **Conditionnement** : remplir la peinture dans des bidons ou futs et qui seront palettisés.
- **Le stockage** : Dans les bâtiments de stockage à l'abri et sous une température ambiante.

## **I.2.6.Généralité sur les différents additifs**

### **I.2.6.1.Phase eau**

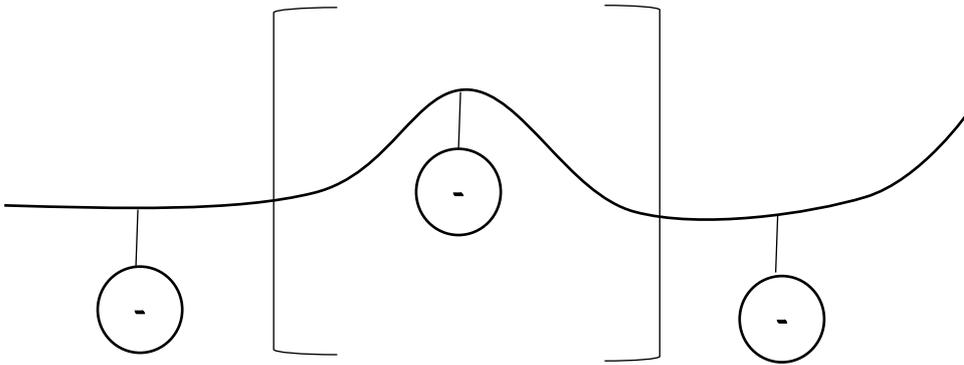
#### **I.2.6.1.1.Agent dispersants [12]**

Sont des agents qui s'absorbent à la surface des particules minérales et qui forment entre elles une barrière évitant leur ré agglomération. Ce qui a pour effets :

- d'amener et de maintenir les particules minérales à l'état unitaire
- de permettre l'augmentation de la concentration de la suspension
- de contrôler les caractéristiques rhéologiques de la suspension

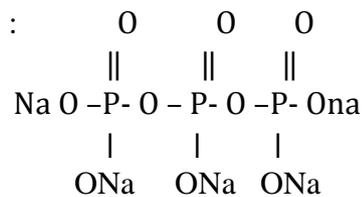
a) **Nature des agents dispersants** : Tous les dispersants efficaces connus à ce jour sont anionique et leur charges négatives constituent une barrière électrostatique qui s'oppose à la réagglomération des particules minérales.

Ce sont des molécules linéaires, en général sans dissymétrie, portant des groupements électro-négatifs.



Les familles principales sont :

- Les poly phosphates :



- Les poly posphonates

- Les lignosulfonates

- Les polymères carboxyliques , en particulier les polyacrylates , sont des molécules très stables et parce qu'elles sont obtenues par polymérisation , peuvent être modifiées de façon presque illimitée et résoudre de nombreux problèmes particuliers.

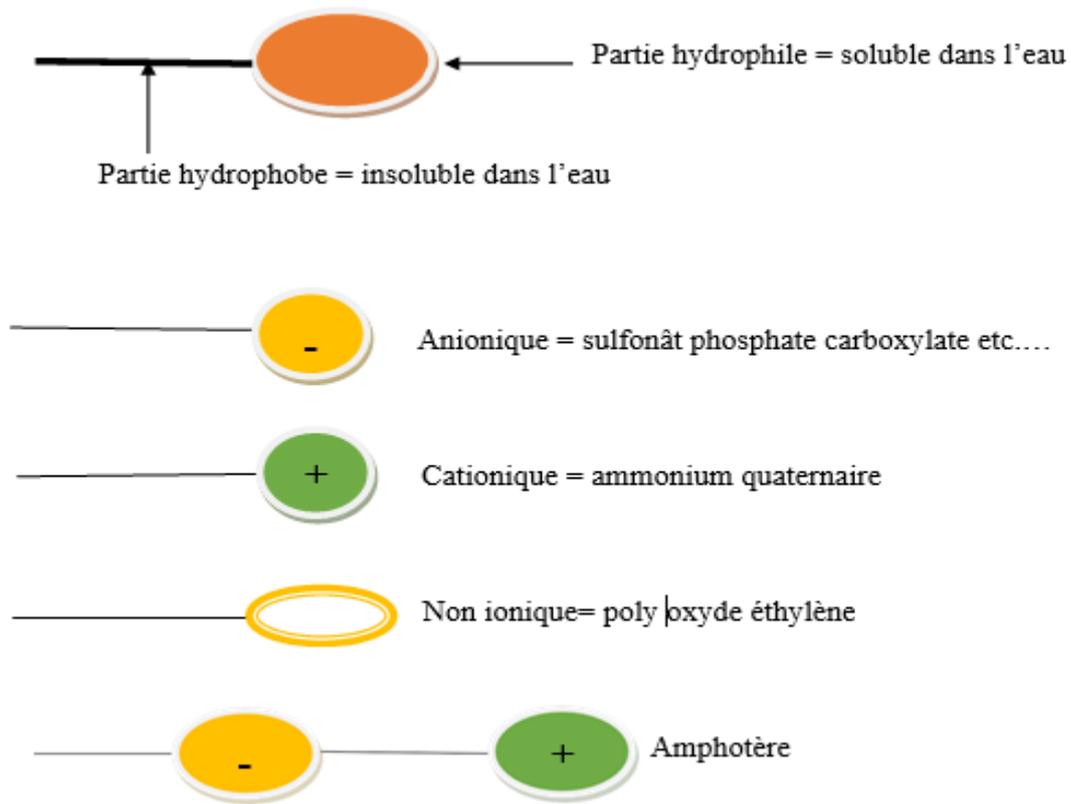
**Mécanisme** : Adsorption à la surface des minéraux (sans orientation des molécules) apportant une charge négative à leur surface qui se traduit par un potentiel qu'on appelle le potentiel ZETA.

### I.2.6.1.2. Agents mouillants [12]

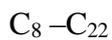
Sont des agents qui, à faible concentration, abaissent la tension superficielle des liquides (et aussi des solides) et facilitent la mise en contact :

- entre 2 liquides non miscible= émulsion
- entre 1 liquide et un solide insoluble = mouillage
- entre un liquide et un gaz

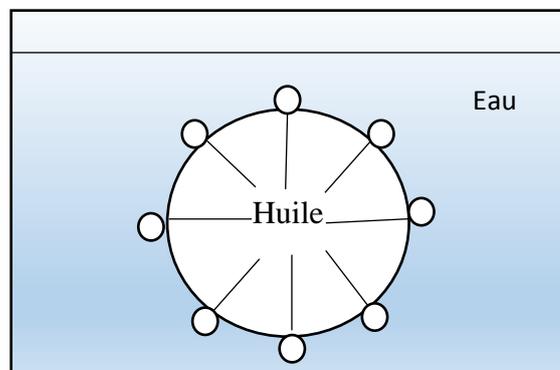
a) **Nature des agents mouillants** : Produits dont la molécule est dissymétrique :



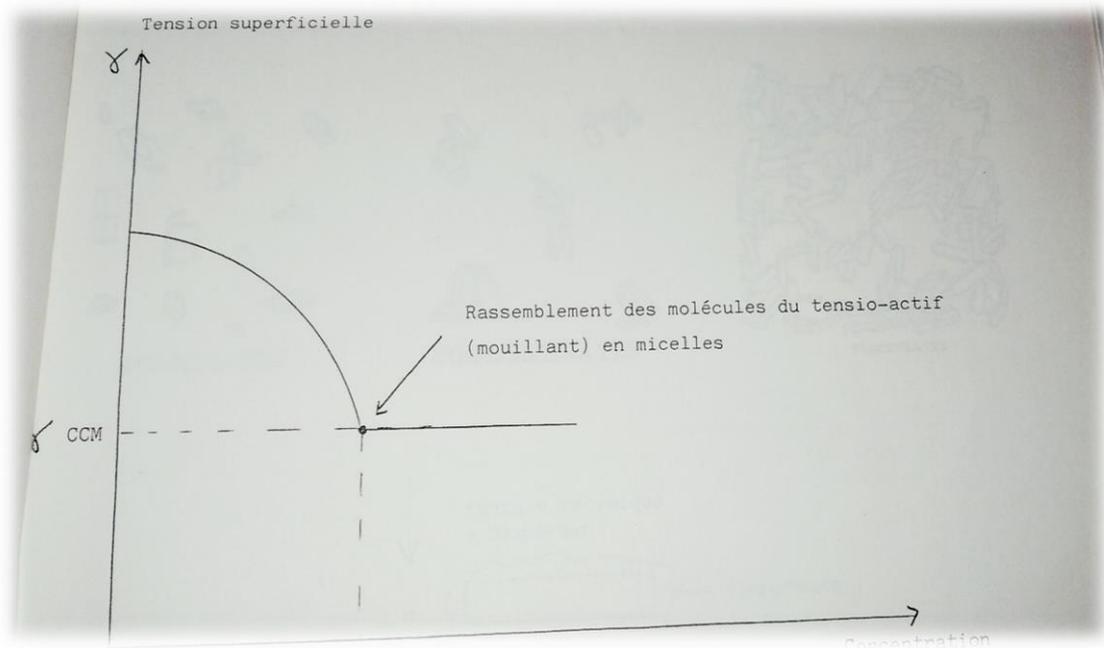
La partie hydrophobe ou chaîne grasse est en général une chaîne hydrocarbonée en



b) **Mécanisme** : concentration de l'agent mouillant aux interfaces par différence de solubilité dans les différentes phases avec orientation des molécules



Dans le cas d'une solution de mouillant dans l'eau ,on constate :



**Figure I.10 :** *Tension superficielle d'une solution de mouillant dans l'eau*

### I.2.6.1.2.1. Différences Mouillant / Dispersant

<u>Propriétés</u>	<u>Mouillant</u>	<u>Dispersant</u>
Modifie la tension superficielle	<i>Oui</i>	<i>Non</i>
Aptitude à former des émulsions	<i>Oui</i>	<i>Non</i>
Modifie le pouvoir mouillant	<i>Oui</i>	<i>Non</i>
Peu entrainer des mousses	<i>Oui</i>	<i>Non</i>
Molécule asymétrique	<i>Oui</i>	<i>Non</i>
Mécanisme_:		
• <i>par orientation des molécules aux interfaces</i>	<i>Oui</i>	<i>Non</i>
• <i>par adsorption</i>	<i>Non</i>	<i>Oui</i>
Effet électrostatique	<i>Non</i>	<i>Oui</i>
Formation de micelles	<i>Oui</i>	<i>Oui</i>
Aptitude à disperser des pigments en milieu aqueux	<i>Non</i>	<i>Oui</i>

**Tableau I-1 :** *Différentes propriétés entre M/D*

Les propriétés énoncées dans ce tableau sont des règles générales pour chacune des familles. La liste n'est pas exhaustive.

Il faut toutefois noter que certaines molécules particulières peuvent cumuler les effets dispersant et mouillant [12].

#### **I.2.6.1.3. Agents antimousses**

Ces composés organiques, solutions de polymères sans ou avec silicone, permettent d'éliminer la mousse qui se forme pendant la dispersion des matières pulvérulentes lors de la fabrication des peintures [13].

#### **I.2.6.1.4. Agents Biocides**

Ils permettent la prévention du développement des micro-organismes pendant le stockage de la peinture mais aussi pendant sa durée d'usage sous forme de feuil. Ce sont composés comprennent les bactéricides et les fongicides [13].

#### **I.2.6.1.5. Régulations de PH**

Est un produit liquide (solution de soude) régler le pH de l'eau, En dessous de 7,0 le pH de l'eau est trop acide , au-dessus de 8,0 il est considéré comme trop basique [13].

#### **I.2.6.1.6. Agents Epaisissants [12]**

Ce sont des composés minéraux (Benton) ou synthétiques (copolymères acryliques, Polyuréthanes) qui permettent d'ajuster les propriétés rhéologiques des peintures.

**a) Leurs effets :** c'est l'additif qui va permettre l'ajustement final de la rhéologie et suivant l'application recherchée, adapter :

- La pseudo-plasticité ;
- La limite d'écoulement ;
- La thixotropie ;
- La viscosité sous cisaillement élevé ;
- Eventuellement une combinaison de ces différentes caractéristiques.

Cet additif joue aussi un deuxième rôle en tant qu'agent de rétention d'eau.

**b) Nature :** ce sont des polymères hydrosolubles d'origine naturelle ou synthétique :

- Dérivés cellulosique
- Dérivés « acryliques » obtenus selon la même chimie que les dispersant mais différents par leur poids moléculaire.
- Polyuréthane hydrosolubles.

#### **I.2.6.1.6.1. Epaisissants cellulosiques**

Ils sont obtenus à partir de la cellulose sur laquelle on condense un certain nombre de molécules d'oxyde d'éthylène, ou propylène ou le chlorure de méthyle pour obtenir respectivement l'hydroxyéthyl cellulose (HEC), l'hydroxypropyl cellulose(HPC), la méthyl-cellulose (MC) ainsi que des éthers mixtes.

Indépendamment de sa constitution chimique, la viscosité d'une solution d'éther cellulosique dépend largement de la masse moléculaire de la cellulose de départ.

Pour le cas des pseudo plastique avec seuil d'écoulement il faudrait employer des éthers cellulosiques de très bas poids moléculaire mais en quantité importante afin d'avoir une rhéologie plus newtonienne il faudrait employer des éthers cellulosiques de très bas poids moléculaire mais en quantité importante, ce qui n'est pas possible pour des problèmes de sensibilité à l'eau du film de peinture ainsi obtenu.

#### **I.2.6.1.6.2. Epaisissants acryliques**

Ce sont soit des homopolymères obtenus à partir de l'acide acrylique, acide méthacrylique ou l'acrylamide, soit des copolymères obtenus à partir des mêmes monomères avec en plus des esters acryliques en proportions diverses. En dehors de cette composition chimique qui joue un rôle direct sur la rhéologie, interviennent aussi le poids moléculaire ; la répartition moléculaire, le fait que le polymère soit réticulé ou non. Tous ces facteurs font que les possibilités offertes par les polymères acryliques hydrosolubles pour modifier la rhéologie sont très grandes, et pourront s'adapter à chaque application. Il faut noter que les poids moléculaires de ces épaisissants se situent en général entre  $10^5$  et  $10^6$ .

Ces épaisissants acryliques agissent en milieu neutre ou alcalin. Ainsi lorsqu'on procède à leur neutralisation par addition d'une base, le polymère, qui est insoluble à l'origine, devient hydrosoluble et gonfle fortement.

### **I.2.6.1.6.3. Epaississants polyuréthanes**

Ce sont des produits hydrosolubles comportant une partie hydrophile et une partie hydrophobe. Ils sont en général présentés en solution dans un mélange eau éthers de glycol.

Ces épaississants, de nature non ionique, montrent un caractère associatif très marqué notamment avec les latex utilisés en peinture : leur pouvoir épaississant dépend pour beaucoup de la nature et du type d'émulsifiant des liant.

En règle générale, leur emploi confère à la peinture des propriétés rhéologiques particulières, notamment :

- Seuil d'écoulement faible (bon rendu et bon étalement)
- Viscosité à haut gradient de vitesse assez élevée (d'où bon garnissant)

Ils seront surtout utilisés dans les peintures brillantes, satinées, mates extérieur.

### **I.2.6.2.Phase solvant**

#### **I.2.6.2.1.Agent mouillant**

#### **I.2.6.2.2.Agent dispersant**

#### **I.2.6.2.3.Agent siccatif :**

Sont des produits à base de sels métalliques d'acide organique naturels (naphténique) ou d'acide organique synthétique (octoate), ajoutés aux huiles et aux peintures glycérophtaliques pour accélérer la réticulation et le durcissement du film de peinture après application . Ils favorisent la fixation de l'oxygène de l'air sur les doubles liaisons des huiles ou acides gras de ces résines. Les métaux engagés dans les siccatifs sont le cobalt, le calcium, le zirconium, le manganèse et le zinc [13].

#### **I.2.6.2.4.Agent plastifiant**

Généralement des composés liquides qui modifient les propriétés rhéologiques des mélanges polymères, améliorent la mise en œuvre et la souplesse du produit fini, sa tenue aux chocs et aux basses températures [14].

#### **I.2.6.2.5. Agents anti-peaux**

Ce sont des agents antioxydants, empêchant la réticulation, dans les récipients, des liants qui sèchent par fixation d'oxygène et ainsi empêcher la formation d'une peau en surface. Cet empêchement est provisoire car les anti-peaux sont volatils et quittent le film en même temps que les solvants. Le plus connu est la Méthyl-éthyl-cétoxime (MECO) [14].

# **Chapitre II : Généralités sur la rhéologie**

## **II.1 Introduction**

Sur le plan étymologique, la rhéologie est une discipline qui traite de l'écoulement et de déformations des matériaux sous l'action de contraintes : c'est à dire que sans champ d'étude devrait être très étendu. En réalité, la rhéologie a des objectifs plus précis : devant l'impuissance de la théorie de l'élasticité et de la mécanique des fluides (théorie élaborées il y a plus d'un siècle) à décrire et à expliquer les propriétés de matériaux au comportement mal défini et intermédiaire entre celui de solide élastique parfait et celui de fluide newtonien, il est apparu nécessaire d'élaborer une discipline nouvelle.

Elle s'est constituée de façon autonome à partir de 1928 et s'est développée très rapidement depuis. Son intérêt est rendu chaque jour plus évident par l'apparition d'un nombre sans cesse croissant de substances au comportement complexe : pâtes, boues, suspension, émulsion, polymères... [15].

## **II.2. Définition de la rhéologie**

Etymologiquement, La rhéologie est une branche de la physique. Elle consiste en l'étude de l'écoulement, de la déformation et plus généralement de la viscosité de matériaux sous l'effet de contraintes [16].

## **II.3. Grandeurs physiques intervenant en rhéologie [15]**

### **II.3.1. Mouvement laminaire de cisaillement, contraintes de cisaillement**

#### **II.3.1.1. Mouvement laminaire de cisaillement**

Un matériau soumis à un ensemble de forces est susceptible de se déformer, les mouvements des différents points du matériau dépendant bien entendu de la répartition et de l'intensité des forces appliquées.

Pour certaines distributions de ces forces un mouvement appelé mouvement laminaire de cisaillement est engendré.

Ce mouvement est difficile à définir rigoureusement sans faire appel à un formalisme mathématique qui dépasserait de loin le niveau de cet exposé. Il est cependant possible d'en donner une présentation intuitive :

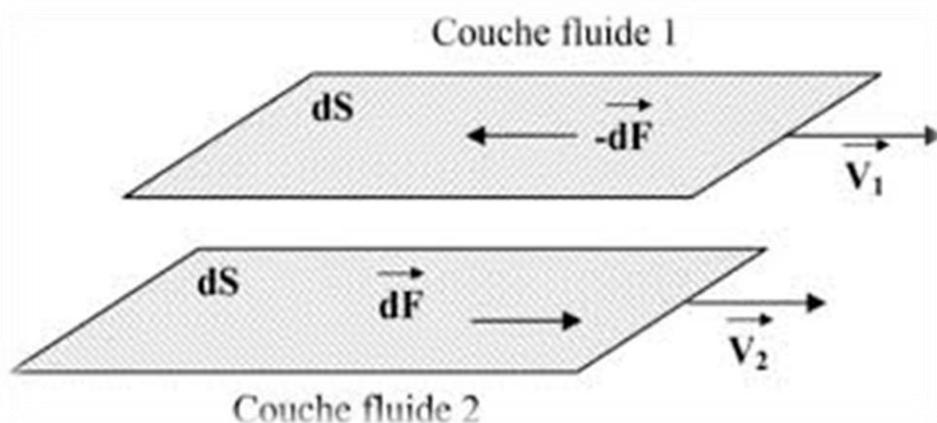
- Un mouvement laminaire de cisaillement est un mouvement au cours duquel le matériau présente une structure en lamelles, en couches adjacentes, d'épaisseurs infiniment minces ; la déformation du matériau s'effectue par un glissement relatif des différentes couches les unes sur les autres, sans qu'il y ait de transfert de matière d'une couche à l'autre ; c'est un mouvement strictement ordonné et stratifié qui se produit sans brassage du matériau et sans variation de son volume.

La forme des couches dépend bien entendu de la géométrie du problème et par conséquent des conditions expérimentales.

### II.3.1.2. Contrainte de cisaillement (shear stress)

Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, les couches sont animées de mouvement relatif les unes par rapport aux autres : deux couches successives, au contact l'une de l'autre, se déplacent relativement l'une par rapport à l'autre. Il en résulte l'apparition de forces de frottement qui s'exercent tangentiellement à la surface de la couche : ces forces tangentielles sont appelées forces de cisaillement.

Considérons deux éléments de surface infinitésimaux appartenant aux deux couches consécutives (1) et (2) de vitesse parallèles  $\vec{v}_1$  et  $\vec{v}_2$



**Figure II.1 :** *Forces de frottement s'exerçant sur deux couches adjacentes lors d'un cisaillement*

Si l'on suppose que  $\left| \vec{v}_1 \right| > \left| \vec{v}_2 \right|$ , il est clair que la couche (1) exerce sur la couche (2) une force de cisaillement  $\vec{dF}$  parallèle au mouvement et tendant à accélérer la couche (2). Réciproquement, la couche (2) exerce sur la couche (1) une force de cisaillement  $-\vec{dF}$  tendant à la freiner.

Il est commode de rapporter ces forces de cisaillement à l'unité de surface sur laquelle elles s'exercent ; on définit ainsi ce qu'on appelle la contrainte de cisaillement  $\tau$  :

$$\tau \left( \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right) = \frac{dF}{dS} \dots \dots \dots (1)$$

Où  $dF$  représente la projection algébrique de  $\vec{dF}$  sur un axe orienté parallèlement au mouvement.

$\tau$  étant une force par unité de surface, elle s'exprime en pascals ou en newton/m<sup>2</sup> dans le système international SI, et en dynes/cm<sup>2</sup> dans le système CGS.

Il est clair que la contrainte de cisaillement  $\tau$  est une fonction définie en tout point du matériau et variant en général d'une couche à l'autre (le plus souvent, par raison de symétrie,  $\tau$  demeure constant en tout point d'une même couche).

La contrainte de cisaillement  $\tau$  est la grandeur dynamique fondamentale de la rhéologie.

### II.3.2. Déformation et vitesse de cisaillement (shear strain and rate)

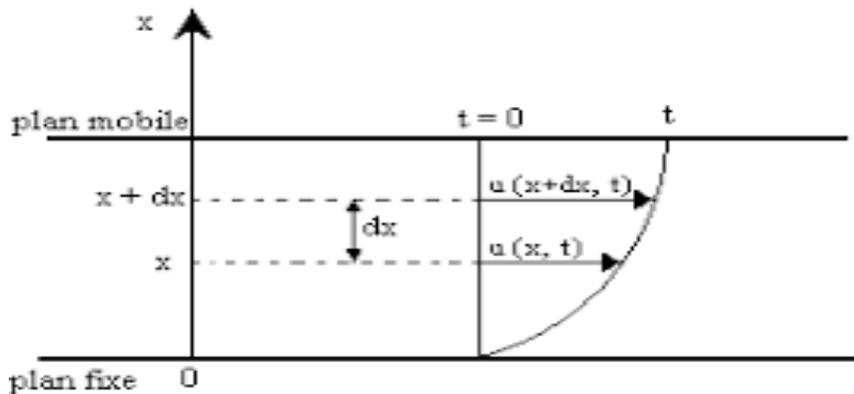
De façon tout à fait générale, en mécanique, on distingue parmi les grandeurs physiques :

- Les grandeurs physiques dynamiques : force, couple..., qui donnent naissance au mouvement.
- Les grandeurs physiques cinématiques : vitesse, accélération..., qui décrivent géométriquement le mouvement.

#### II.3.2.1. Déformation de cisaillement $\varepsilon$

Pour définir la déformation de cisaillement, il est souhaitable d'envisager le cas particulier d'un mouvement laminaire de cisaillement présentant la symétrie plane : par exemple, le

dispositif expérimental où le matériau entre deux plans parallèles, l'un mobile, l'autre immobile.



**Figure II.2 :** Gradient de déplacement dans un mouvement de cisaillement plan.

Considérons les particules de matière qui se trouvent au temps origine (arbitrairement choisi)  $t=0$  dans une certaine section droite. À un instant  $t$  postérieur, chaque particule de matière aura parcouru la distance  $u(x, t)$  où  $x$ , distance séparant la particule de matière du plan solide inférieur, permet de repérer les différentes couches planes du matériau.

On définit la déformation de cisaillement dans le cas de la symétrie plane par la relation :

$$\boldsymbol{\varepsilon}(x, t) = \frac{du(x,t)}{dx} \dots\dots\dots (2)$$

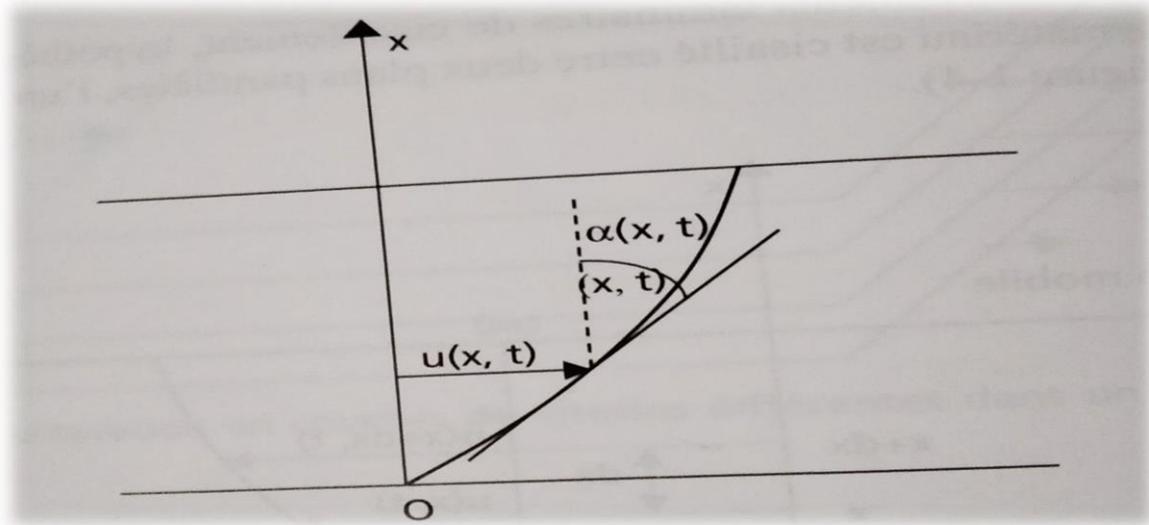
On constate que cette grandeur ne dépend pas du déplacement  $u(x, t)$  lui-même, mais de la variation de ce déplacement lorsqu'on passe d'une couche à une couche infiniment voisine : c'est l'effet de cette variation qui caractérise un mouvement de cisaillement pour lequel les différentes couches ont des déplacements relatifs les uns par rapport aux autres.

La déformation de cisaillement ainsi définie est susceptible d'une interprétation géométrique simple ; il est clair en effet que :

$$\boldsymbol{\varepsilon}(x, t) = \tan \alpha(x, t) \dots\dots\dots (3)$$

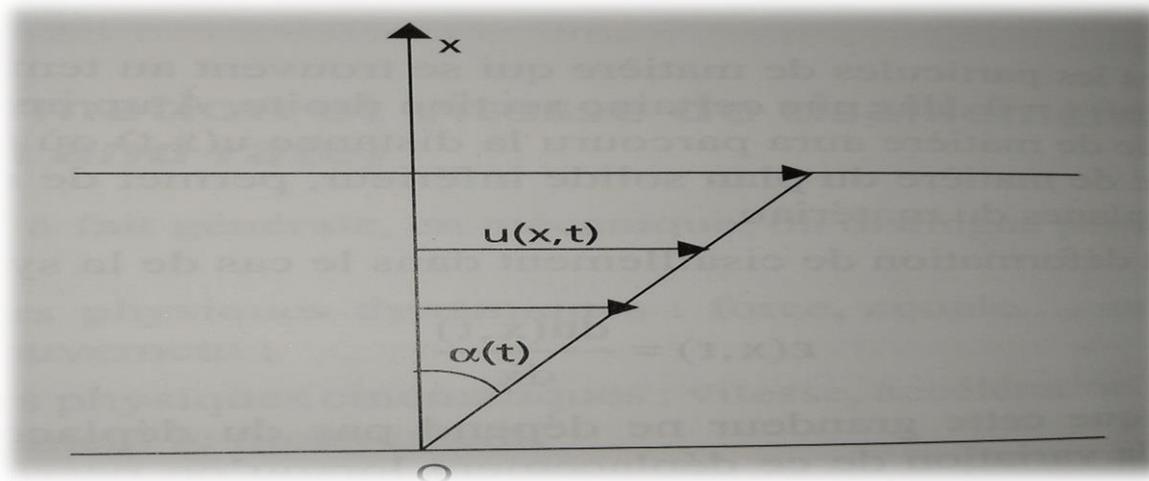
Où  $\alpha(x, t)$  représente l'angle que fait la tangente en  $x$  à la courbe joignant les extrémités des vecteurs de déplacement  $u(x, t)$  et l'axe des  $x$

Il est clair qu'en général  $\boldsymbol{\varepsilon}(x, t)$  dépend non seulement du temps  $t$  mais encore de  $x$ , c'est-à-dire de la couche considérée.



**Figure II.3 :** *Interprétation géométrique de  $\varepsilon$*

Il existe un cas particulier important : lorsque la courbe joignant les extrémités des vecteurs de déplacement  $u(x, t)$  est un segment de droite. (figure II.6)



**Figure II.4 :** *Interprétation géométrique de  $\varepsilon$  dans un cas particulier*

Alors  $\varepsilon = \tan \alpha$  où  $\alpha$  représente l'angle que forment ce segment de droite et l'axe des  $x$  ;  $\varepsilon$  ne dépend plus de la couche considérée mais seulement. du temps.

Si, en outre, les déplacements  $u(x, t)$  demeurent petits, on pourra écrire :

$$\varepsilon(t) = \alpha(t) \dots \dots \dots (4)$$

Remarquons que, contrairement à ce que son nom pourrait laisser supposer,  $\varepsilon$  n'a pas les dimensions d'une longueur ; comme le prouve sa relation de définition, c'est une grandeur sans dimension.

### II.3.2.2. Vitesse de cisaillement $\dot{\epsilon}$ (shear rate)

Par définition, la vitesse de cisaillement  $\dot{\epsilon}$  est la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement  $\epsilon$  ; c'est une vitesse de déformation :

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} \dots\dots\dots (5)$$

$\dot{\epsilon}$  a par conséquent les dimensions de l'inverse d'un temps et s'exprime en  $s^{-1}$ .

Si l'on se ramène au cas de la symétrie plane envisagée au paragraphe précédent, il vient, en utilisant la relation (2)

$$\dot{\epsilon} = \frac{d}{dt} \frac{du}{dx} = \frac{d}{dx} \frac{du}{dt}$$

Et, puisque  $[du(x, t)/dt]$  représente la vitesse  $v(x, t)$  de la couche  $x$  à l'instant  $t$ , on peut encore écrire, dans le cas de la symétrie plane :

$$\dot{\epsilon} = \frac{dv(x,t)}{dx} \dots\dots\dots (6)$$

Notons que la vitesse de cisaillement  $\dot{\epsilon}$  Et souvent désignée par la lettre **D** et appelée gradient de vitesse [ce qui se justifie si l'on se reporte à l'expression (6)]

#### Remarque importante

- Il faut souligner que les relations (2) et (6) de  $\epsilon$  et  $\dot{\epsilon}$  ne s'appliquent pas au cas général et ne sont valables en toute rigueur que dans le cas de la symétrie plane. Il existe une définition tout à fait générale de  $\epsilon$  et  $\dot{\epsilon}$  :

Elle fait appel à un formalisme trop complexe pour être présentée ici. Il sera donc nécessaire de préciser les expressions de  $\epsilon$  et  $\dot{\epsilon}$  dans chaque cas particulier rencontré ne présentant pas la symétrie plane.

- Notons cependant que les relations (2) et (6) pourront souvent être utilisées et fournissent une très bonne approximation dans un grand nombre de cas particuliers ne présentant pas la symétrie plane.

### II.3.3. Equation rhéologique d'état, rhéogrammes

#### II.3.3.1. Equation rhéologique d'état

Tout système mécanique obéit à une équation fondamentale qui établit une relation entre les grandeurs dynamiques responsables du mouvement et les grandeurs cinématique décrivant ce mouvement (exemple de la loi fondamentale de la dynamique du point matériel

$$\vec{F} = m \vec{\gamma}.$$

Il en est ainsi en rhéologie, où existe une relation entre la déformation de cisaillement  $\varepsilon$  et la contrainte de cisaillement  $\tau$ , relation qui dépend des propriétés et de la nature du matériau. Nous noterons cette relation :

$$\varepsilon = f(t)$$

C'est l'équation rhéologique d'état de la substance. Sa connaissance détermine toute les propriétés rhéologiques du matériau. C'est pourquoi le but de la rhéologie est la détermination expérimentale (à l'aide de rhéomètres) de l'équation (7)

#### Remarque

- L'équation rhéologique ne dépend pas seulement de la nature et des propriétés du matériau ; elle dépend aussi de la température T et de la pression P extérieures. Il serait donc plus correct d'écrire :

$$\varepsilon = f(\tau, P, T)$$

- Il est naturel que  $\varepsilon$  à l'instant t dépende de la contrainte  $\tau$  au même instant. Il peut paraître plus surprenant que  $\varepsilon(t)$  dépende également des contraintes qui ont été appliquées au matériau antérieurement à t. C'est dit doué de mémoire. Ces substances se souviennent en effet des sollicitations auxquelles elles ont été soumises dans le passé.

#### II.3.3.2 Rhéogrammes

Les courbes qui traduisent graphiquement l'équation rhéologique d'état sont appelées rhéogrammes. Les rhéogrammes les plus fréquemment utilisés et dont nous donnerons des exemples dans les chapitre suivant sont :

- Les graphes  $\tau, \varepsilon$  à pression et température extérieures constant ;
- Les graphes  $\tau, \dot{\varepsilon}$  à pression et température extérieures constant

- Le graphe  $\epsilon, t$  traduisant l'évolution de  $\epsilon$  au cours du temps, à pression et température extérieures constantes, lorsque la contrainte est appliquée à l'instant initial  $t=0$  et maintenue constante (expérience de fluage) ;

- Le graphe  $\tau, t$  traduisant l'évolution de  $\tau$  au cours du temps, à pression et température extérieures constantes, lorsqu'une déformation est imposée à l'instant initial  $t=0$  et maintenue constante (expérience de relaxation).

### **II.3.4. Viscosité**

Les coefficients de viscosité sont des grandeurs physiques qui jouent un rôle essentiel en rhéologie. Leur connaissance suffit parfois à caractériser de façon précise le comportement rhéologique du matériau. On définit différents coefficients de viscosité.

#### **II.3.4.1. Viscosité dynamique**

Elle définit par la relation :

$$\mu = \frac{\tau}{\epsilon} \dots \dots \dots (8)$$

Et est également appelée viscosité apparente. L'équation dimensionnelle de  $\mu$  est :

$$[\mu] = ML^{-1}T^{-1}$$

Son unité est la poise (P) dans le système CGS, et 1 pascal seconde (Pa.s) dans le système international SI. Notons que pendant longtemps, l'unité SI a été appelée le poiseuille et notée PI.

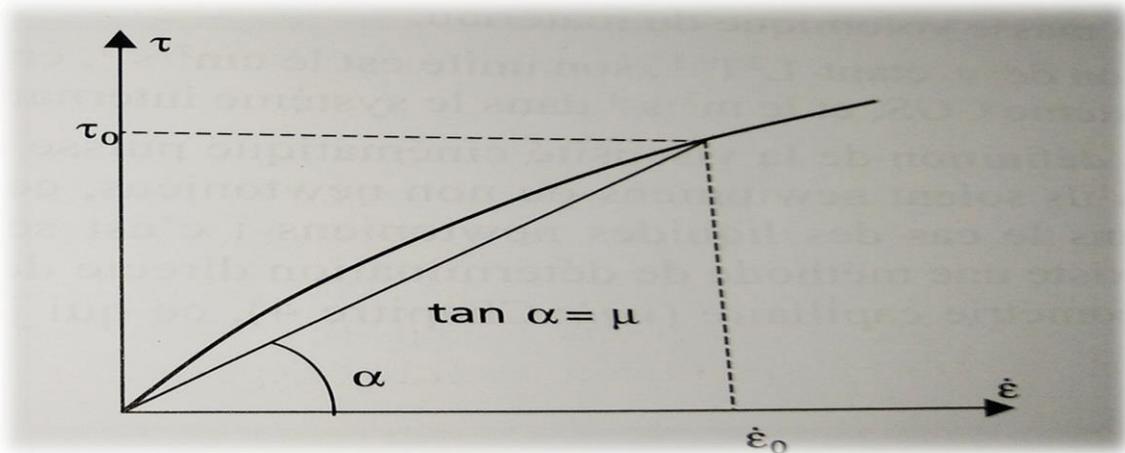
$$\mathbf{1Pa.s=1PI=10P}$$

Il est clair que  $\mu$  est une fonction de la température T et de la pression P extérieures, mais aussi en général de la contrainte de cisaillement  $\tau$  ou encore, selon un point de vue tout à fait équivalent, de la vitesse de cisaillement  $\epsilon\dot{\phantom{\tau}}$  :

$$\mu = F[T, P, \tau] \dots \dots \dots (9)$$

$$\mu = G[T, P, \epsilon\dot{\phantom{\tau}}]$$

Si l'on se reporte au rhéogramme  $\tau, \epsilon\dot{\phantom{\tau}}$  de la substance, on observe que pour une valeur de donnée (ou de  $\epsilon\dot{\phantom{\tau}}$ ),  $\mu$  est égal à la pente de la droite joignant l'origine au point représentatif considéré.



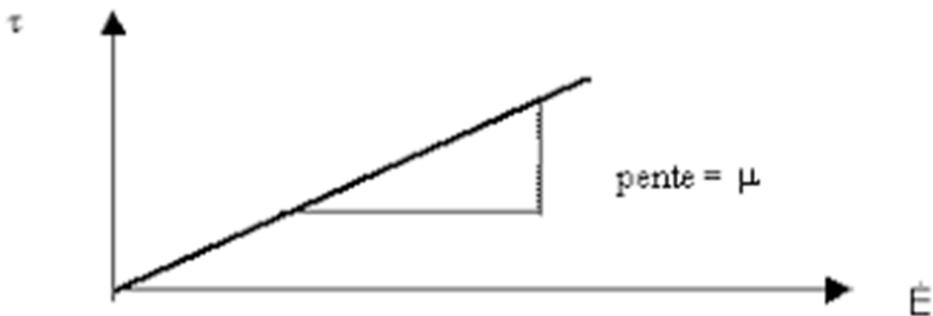
**Figure II.5 : Exemple de rhéogramme**

Il existe certaines substances pour lesquelles  $\mu$  ne dépend pas de la contrainte de cisaillement ces corps sont appelés newtoniens. Leur coefficient de viscosité dynamique est alors appelé viscosité absolue et noté  $\eta$ . L'équation rhéologique d'un corps newtonien (équation de Newton) s'écrit donc :

$$\tau = \eta \dot{\epsilon} \dots \dots \dots (10)$$

Où  $\eta$  n'est fonction que de la température et de la pression extérieure.

Le rhéogramme représentatif de l'équation de Newton est une droite de pente  $\eta$



**Figure II. 6 : Rhéogramme newtonien**

**II.3.4.2 .Viscosité cinématique**

Ce coefficient est défini par la relation :

$$\vartheta = \frac{\mu}{\rho} \dots \dots \dots (11)$$

Où  $\rho$  est la masse volumique du matériau.

La dimension de  $\nu$  étant  $L^2T^{-1}$ , son unité est le  $cm^2.s^{-1}$ , encore appelé stokes (St) dans le système CGS, et le  $m^2.s^{-1}$  dans le système international.

Bien que la définition de la viscosité cinématique puisse s'appliquer à tous les liquides, qu'ils soient newtoniens ou non newtoniens, cette notion est surtout utilisée dans le cas des liquides newtoniens : c'est seulement pour ces liquides qu'il existe une méthode de détermination directe de la viscosité cinématique par rhéométrie capillaire, ce qui justifie l'intérêt de ce coefficient.

### II.3.4.3. Viscosités relative, spécifique, intrinsèque

Dans l'étude des solutions (des dispersions), afin de déterminer les influences respectives du soluté (de la phase dispersée) et du solvant (de la phase dispersante) dans le comportement rhéologique, on utilise fréquemment les coefficients de viscosité suivant :

- Viscosité relative

$$\mu_{rel} = \frac{\mu}{\mu_s} \dots \dots \dots (12)$$

- Viscosité spécifique

$$\mu_s = \frac{\mu - \mu_s}{\mu_s} = \mu_{rel} - 1 \dots \dots \dots (13)$$

- Viscosité intrinsèque

$$[\mu] = \limite \left( \frac{\mu_{sp}}{c} \right) \dots \dots \dots (14)$$

Où  $\mu$  et  $\mu_s$  représentent respectivement la viscosité dynamique de la solution (de la dispersion) et du solvant (de la phase dispersante), et où  $c$  représente la concentration de la solution (de la phase dispersée).

$\mu_{rel}$  Et  $\mu_s$  sont des grandeurs sans dimension.

$[\mu]$  Est homogène, à l'inverse d'une concentration.

### II.3.5. Limite du régime laminaire-Nombre de Reynolds

Considérons un mouvement laminaire de cisaillement et augmentons progressivement la vitesse relative d'écoulement des couches les unes par rapport à l'autre. On observe qu'à partir d'un certain seuil, le régime laminaire disparaît : les différentes couches se rejoignent, se mélangent, pour finir par se disperser. On appelle ce qu'on appelle le régime turbulent.

La limite entre régime laminaire et régime turbulent est caractérisée, dans chaque situation expérimentale particulière, par la valeur  $R_0$  que prend un nombre  $R$  appelé nombre de Reynolds, et définit de la façon suivant :

$$R = \frac{\bar{V}_l}{\nu} \dots \dots \dots (15)$$

Où :

- $\bar{V}_l$  est la vitesse moyenne d'écoulement
- $l$  est une longueur caractéristique du rhéomètre (par exemple, dans le cas des rhéomètres de type couette,  $l$  représente la distance séparant les deux surfaces solides) ;
- $\nu$  est la viscosité cinématique du matériau.

Ce nombre de Reynolds,  $R$ , représente la propriété d'être sans dimension.

En régime laminaire sera définie par une certaine valeur  $R$  (qui peut être égale à 10, 1000, 100000 ou toute autre valeur selon les cas) telle que :

- si  $R > R_0$  le régime est turbulent.
- si  $R < R_0$  le régime est laminaire.

Connaissant la valeur de  $R_0$ , il est facile de déterminer la vitesse moyenne d'écoulement limite  $\bar{V}_l$  afin de rester toujours en régime laminaire :

$$\bar{V}_l = \frac{R_0 \nu}{l} \dots \dots \dots (16)$$

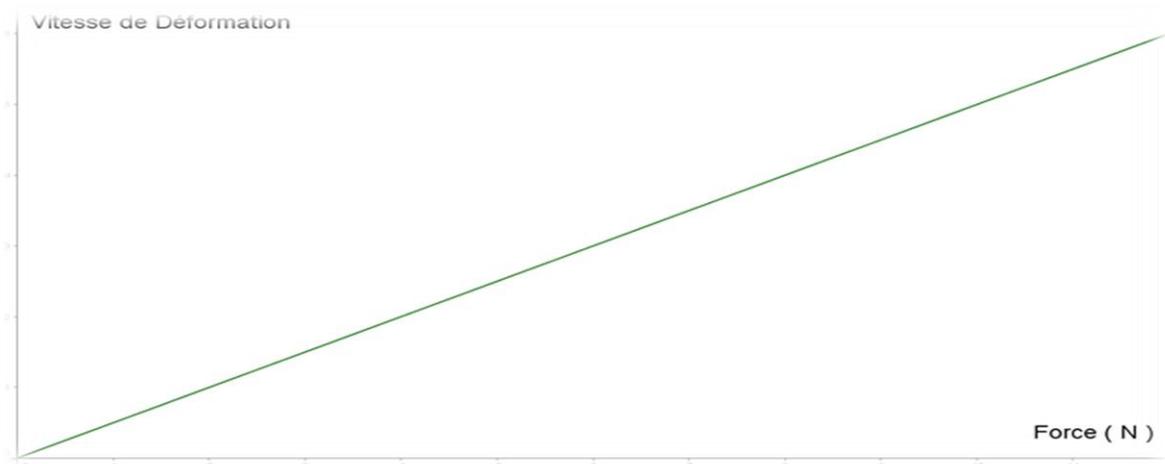
## II.4. Différents types de la rhéologie [12]

### II.4.1. Fluides Newtoniens :

pour de tels fluides, il y a proportionnalité entre  $\tau$  et  $\epsilon'$ . La courbe représentative

$\epsilon' = f(\tau)$  est une droite passant par l'origine.

Donc :  $\epsilon' = \text{tag} \alpha * \tau$



**Figure II.7 :** *Gradient de vitesse en fonction de contrainte de cisaillement( fluide Newtonien)*

La pente de cette droite est donc l'inverse de la viscosité. On doit souligner qu'avec les fluides newtoniens, il suffit d'effectuer une seule mesure (à une température donnée) pour décrire complètement l'écoulement puisque la viscosité n'est pas fonction du gradient de vitesse.

#### II.4.2. Fluide pseudo plastique

Un fluide est dit « pseudo plastique » quand sa viscosité diminue au fur et à mesure que la vitesse d'agitation  $\epsilon'$  augmente.

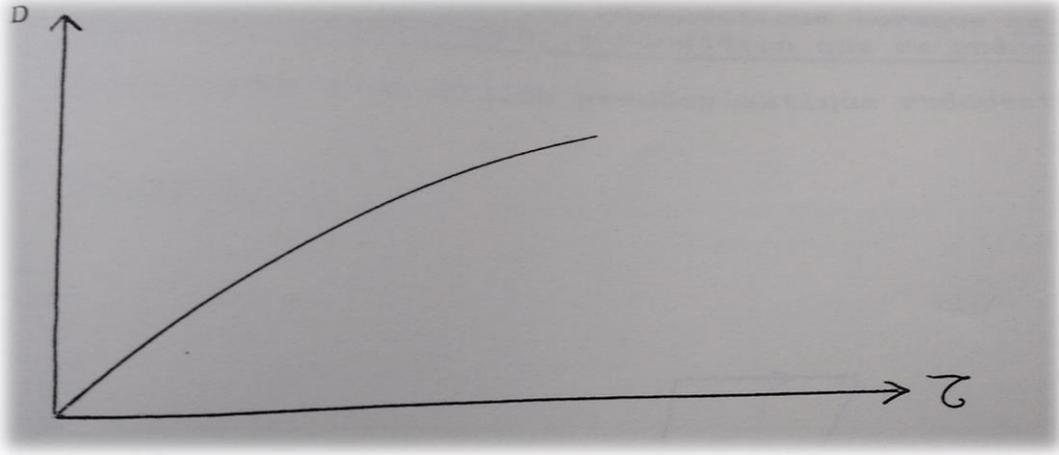
##### II.4.2.1. Fluide pseudo plastique sans limite d'écoulement

On dit qu'un fluide ne présente pas de limite d'écoulement quand la courbe représentative des variations  $\epsilon' = f(\tau)$  passe par l'origine. cela signifie que si l'on part du fluide au repos ( $\tau=0, \epsilon'=0$ ), la moindre augmentation de la contrainte de cisaillement  $\tau$  entraîne une mise en mouvement du fluide et l'apparition d'un gradient de vitesse  $\epsilon'$ , différent de 0.

Pour décrire un écoulement pseudo plastique sans limite d'écoulement, on peut faire appel à la loi d'Ostwald :

$$\epsilon' = k * \tau^n$$

Avec n supérieur à 1



**Figure II.8 :** Gradient de vitesse en fonction de contrainte de cisaillement ( fluide PP)

#### II.4.2.2. Fluide pseudo plastique avec limite d'écoulement

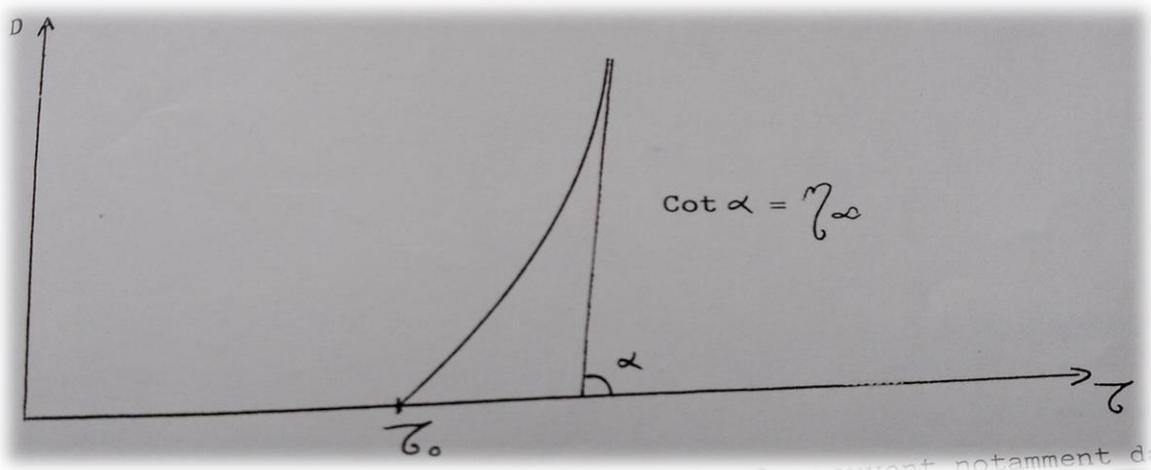
Ils sont encore appelés fluides plastique non idéaux. Là- aussi, la viscosité diminue quand on augmente le gradient de vitesse  $\epsilon'$ . Mais contrairement aux fluides pseudoplastique sans limite d'écoulement, il faut dépasser une contrainte de cisaillement limite (appelée limite d'écoulement et noté  $\tau_0$ ) pour mettre en mouvement le fluide (et donc noter l'apparition d'un gradient de vitesse non nul).

Pour décrire ce type d'écoulement, on peut faire appel à la loi de casson :

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\mu^\infty} * \sqrt{\epsilon'}$$

$\tau_0$ : Limite d'écoulement

$\mu^\infty$ : viscosité d'un fluide pour un gradient de vitesse infini.



**Figure II.9 :** Fluide pseudo plastiques dans les peinture dispersion

Ce type d'écoulement se rencontre très souvent notamment dans les peintures dispersions. Dans la pratique, la mesure de cette limite d'écoulement est très intéressante mais il faudra bien faire la différence entre :

- Les mesures faites lorsque la peinture n'a été soumise auparavant à aucun cisaillement (au repos), qui peuvent donner des indications sur la rhéologie dans le pot de peinture.
- Les mesures faites après avoir soumis la peinture à gradient de vitesse élevé, qui peuvent renseigner sur les propriétés rhéologiques immédiatement après l'application.

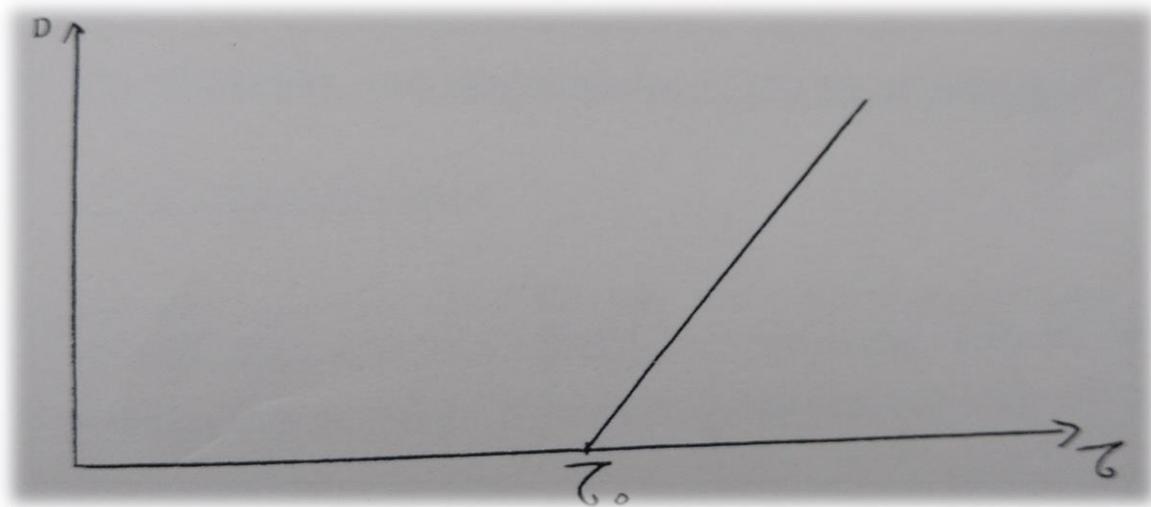
### **II.4.3. Fluides dilatants**

Un fluide est dit «dilatant » lorsque sa viscosité augmente au fur et à mesure que la vitesse d'agitation augmente.

Pour caractériser un comportement rhéologique, on emploie souvent la formule établie par Ostwald :

$$\varepsilon' = k * \tau^n$$

Exemple : amidon dans l'eau et les pigments dans l'eau

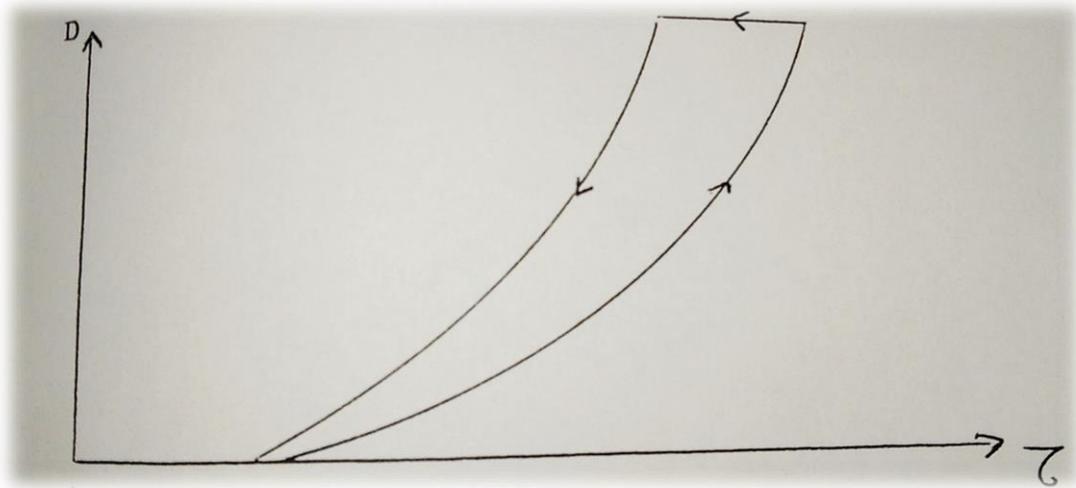


**Figure II.10 :** *Gradient de vitesse en fonction de contrainte de cisaillement (fluide dilatant)*

## II.4.4. Notion de thixotropie et de rhéopexie

### II.4.4.1. Thixotropie

On dit un fluide thixotrope lorsque sa viscosité diminue en fonction du temps de cisaillement à condition que ce phénomène soit parfaitement réversible.



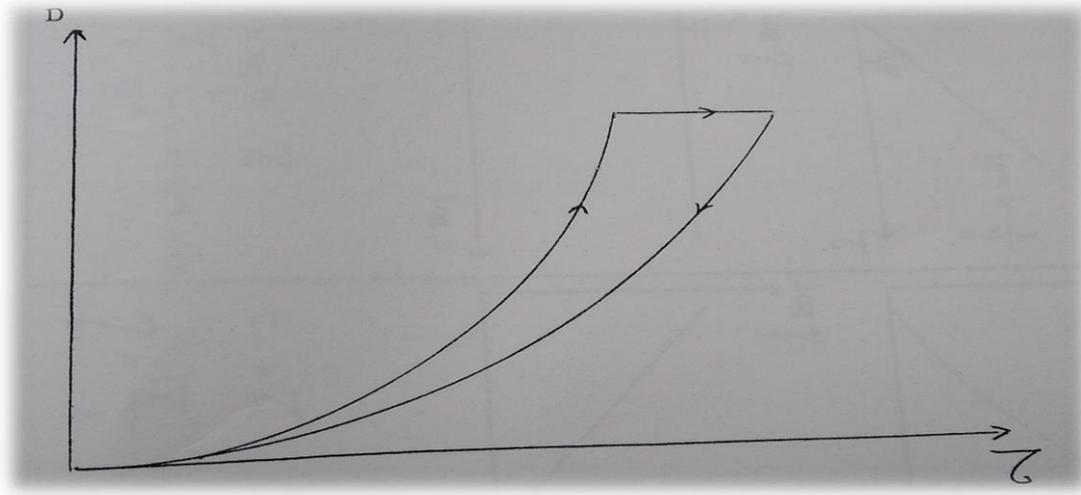
**Figure II.11** : *Rhéogramme d'un fluide pseudoplastique thixotrope*

Le rhéogramme enregistré est caractérisé par la présence d'une aire d'hystérésis dont la surface est proportionnelle à l'intensité du caractère thixotrope.

Exemple : la crème de peinture

### II.4.4.2. Rhéopexie

On dit qu'un fluide est rhéopexique lorsque sa viscosité augmente en fonction du temps de cisaillement, à condition que ce phénomène soit parfaitement réversible.



**Figure II.12.** *Rhéogramme d'un fluide pseudoplastique rhéopectique*

## II.5 Mesure des caractéristiques rhéologiques des fluides

Pour mesurer les caractéristiques rhéologiques d'un fluide, il suffit de mesurer la relation entre la contrainte et le taux de déformation du fluide en fonction du temps. Le rhéomètre est l'appareil conçu spécialement pour ces mesures. Il est à noter que pour un fluide newtonien, il ne suffit qu'un point de mesure, alors que pour un fluide non newtonien, il est nécessaire de prendre plusieurs points de mesure [17]. Il existe une variété de rhéomètres, nous citons les trois rhéomètres suivants :

### II.5.1 Rhéomètre plan- plan

Dans un rhéomètre plan-plan, le fluide est entre deux disques circulaires de rayon  $R$  coaxiaux séparés par un entrefer. Leur surface peut être lisse ou rugueuse (permet d'éviter le glissement aux parois). Le disque inférieur est fixe, l'écoulement dans cette géométrie est généré par la rotation du cylindre supérieur. Calculer les propriétés d'écoulement d'un fluide avec ce type de géométrie est compliqué car contrainte et taux de cisaillement dépendent de la distance à l'axe de rotation.

L'utilisation de la géométrie plan-plan se justifie pleinement pour les suspensions granulaires. En effet, il est possible d'adapter la taille de l'entrefer en fonction du type de fluide utilisé et donc en fonction de la taille des particules et on ne rencontre pas de problèmes liés à la pointe. On se place en coordonnées cylindriques par raison de symétrie. Quand l'écoulement est suffisamment lent pour n'avoir qu'un écoulement azimutal, lorsque les effets inertiels sont

négligeables, le taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement dans l'entrefer s'écrivent en  $r = R$  pour un fluide newtonien :

$$\tau = \frac{R\delta}{e} \dots \dots \dots (17)$$

$$\mu = \frac{2M}{\pi R^2} \dots \dots \dots (18)$$

$\tau$  : la contrainte de cisaillement

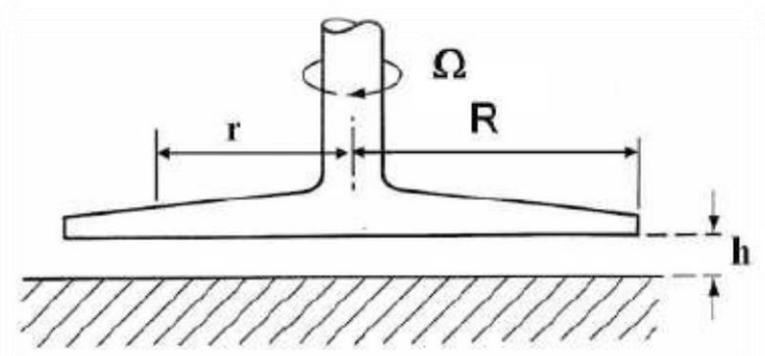
$\mu$  : viscosité dynamique (Pa. s)

M : le moment du couple mesuré par un transducteur sur l'axe

$\delta$ : La vitesse de rotation de l'axe (tr/s)

R : le rayon du disque (m)

M est une contrainte apparente pour calculer une viscosité apparente. La variation du taux de cisaillement dans l'échantillon peut induire la migration de particules dans l'échantillon. De plus le rhéomètre plan-plan permet de mesurer des contraintes normales [18].

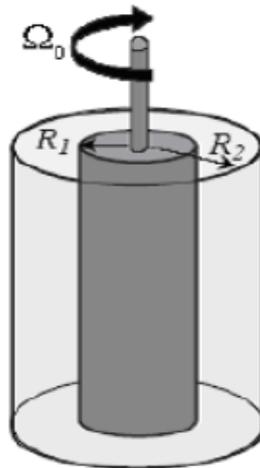


**Figure II.13** : *Rhéomètre plan-plan*

### II.5.2 Rhéomètre de couette

Dans le rhéomètre de Couette, le fluide est placé dans l'entrefer de deux cylindres coaxiaux de rayons  $R_1$  et  $R_2$  avec  $R_2 = R_1 + dR$  et de hauteur  $h$ . le cylindre intérieur tourne à la vitesse de rotation  $\Omega$ . figure II.9. Il est à noter que c'est souvent le cylindre intérieur qui tourne, bien que cela puisse induire la formation d'une instabilité de Taylor-Couette au-delà d'une vitesse de rotation critique. On peut soit imposer cette vitesse angulaire et mesurer le moment

M du couple appliqué pour maintenir, soit appliquer un couple donné et mesurer la vitesse angulaire prise par le cylindre mobile [19].



**Figure II.14 : Cylindres coaxiaux**

Les rayons des cylindres varient de un à quelques centimètres et entrefers de un dixième à quelques millimètres (mais des dispositifs de plus grande taille sont nécessaires pour analyser des suspensions de grosses particules). Dans le cas où les rayons intérieur  $R_1$  et extérieur  $R_2$  sont proches (en pratique cela correspond à  $(R_2 - R_1)/R_1 < 0,15$ ), on a alors  $dR \ll R$  et le rayon moyen  $R$  s'écrit  $R = (R_1 + R_2) / 2$ . Le système équivaut alors à un cisaillement entre deux plaques.

Pour des cylindres de hauteur  $h$ , le taux de cisaillement et la contrainte  $\tau$  sont homogènes dans le volume de l'entrefer et vérifient pour un fluide newtonien :

$$\tau = \frac{R\delta}{\Delta R} \dots \dots \dots (19)$$

$$\mu = \frac{2M}{2\pi R^2 h} \dots \dots \dots (20)$$

$\delta$  : est la vitesse de rotation du cylindre intérieur.

$M$  : est le moment du couple appliqué au cylindre.

$\mu$  : la viscosité dynamique.

$h$  : hauteur du cylindre.

$R$  : rayon du cylindre.

Les expressions ci-dessus sont utilisées pour calibrer le rhéomètre. La viscosité mesurée n'est alors valable que dans le cas d'un faible entrefer.

L'inconvénient de ce type de géométrie est la nécessité d'un volume important d'échantillon ainsi que l'impossibilité de mesurer des viscosités élevées.

### II.5.3 Rhéomètre cône-plan

La partie supérieure est constituée d'un cône d'angle  $\theta$  dont le sommet est tronqué figure II.14. Le plan inférieur est un plateau fixe. Le rhéomètre impose la rotation d'angle  $\theta$  et l'écoulement est un mouvement laminaire de cisaillement. Ce type de géométrie permet d'obtenir dans tout l'échantillon une contrainte et une vitesse constante. Elle permet de travailler avec de faibles volumes d'échantillon et des vitesses de cisaillement élevées.

Cependant, lorsque l'échantillon est une suspension ou une émulsion, la troncature induit une déplétion et un confinement. Si la taille des particules n'est pas inférieure au dixième de la troncature, alors les mesures ne sont pas reproductibles [20].

Les grandeurs rhéologiques pour cette géométrie s'expriment de la façon suivante :

$$\tau = \frac{\theta}{\tan \alpha} \dots \dots \dots (21)$$

$$\mu = \frac{3}{2\pi R^2} C \dots \dots \dots (22)$$

$\mu$  : la viscosité dynamique (Ps.s).

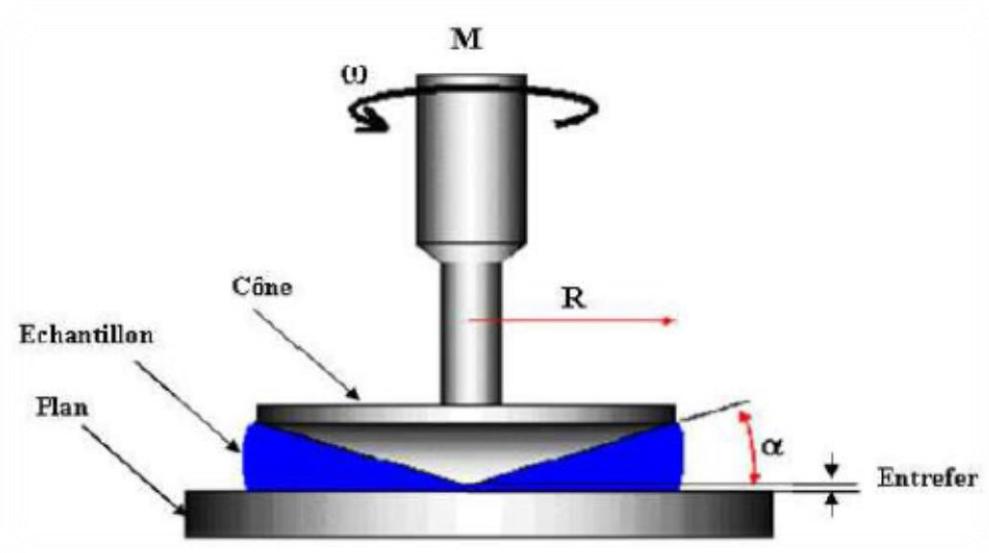
$\theta$ : angle de rotation.

$\alpha$  : angle que fait le cône avec le plan.

C : couple donnée.

R : rayon du cylindre (m).

Lorsque le diamètre du cône diminue, pour un couple donné, la contrainte accessible est plus élevée.



**Figure II.15** : *Géométrie con-plan*

# **Chapitre III : Cas pratique d'étude rhéologique des peintures**

### **III.1. Introduction**

L'objectif est d'étudier la rhéologie de peintures commerciales et un cas de revêtement afin de dégager des «comportements-type » et choisir une peinture qui servira de référence.

Peintures commerciales étudiées [21] :

- 2 peintures murales acryliques en phase aqueuse premier prix (Brico Depot, Auchan)
- 2 peintures murales acryliques de meilleure qualité (Ripolin, Dulux)
- Peinture alkyde (« glycéro ») brillante, en phase solvant (white spirit)
- Peinture alkyde en phase aqueuse, pour application sur métaux
- Revêtement d'étanchéité de toiture infiltration (peinture élastique à base de silicone)
- Lasure newtonienne (Dyrup Heliotan)
- Lasure gel (Xyladecor)

### **III.2. Etude rhéologique de peintures commerciales [21]**

Le but de l'étude rhéologique d'une peinture est de simuler le plus fidèlement possible les différents processus impliqués lors de sa fabrication (non traité ici), son stockage, et son utilisation par un client. Si les mesures rhéologiques sont pertinentes, on obtient une bonne corrélation des résultats obtenus avec les propriétés du produit.

- ✓ Bonne stabilité lors du stockage (pas de sédimentation)
- ✓ Impression de qualité lors du mélange (consistance)
- ✓ Bon chargement de l'outil d'application
- ✓ Absence de coulures lors du transfert entre le pot et le support
- ✓ Etalement facile sur le support (brossabilité)
- ✓ Bon garnissage du support (garnissant)
- ✓ Pas de projections lors de l'application
- ✓ Pas de coulures après application
- ✓ Nivellement du film une fois appliqué (tendu)
- ✓ Pas de déformations du film dues à la tension superficielle (ex : cratères)

### **III.2.1. Test d'applicabilité**

Une première évaluation des performances d'une peinture peut être réalisée à partir d'une application sur carte contraste grand format (voir figures ci-dessous).



**Figure III-1 : Test d'applicabilité sur carte contraste**

Le motif en damier permet d'évaluer qualitativement le pouvoir couvrant (opacité) du film, lié à la formule (quantité de  $\text{TiO}_2$ ) mais aussi à l'épaisseur appliquée (pouvoir garnissant, conditionné par une viscosité importante à haut gradient de vitesse). L'application se fait à la brosse en deux passes croisées, et se termine par le tracé d'une croix (afin d'évaluer la tension du film), puis d'une rainure fine (évaluation des coulures). Il est enfin possible de mesurer le rendement d'application, c'est-à-dire la surface que l'on peut couvrir à l'aide d'un litre de peinture, l'aire du damier valant  $0,1 \text{ m}^2$ . Pour cela, on pèse la brosse ainsi que le contenant de la peinture avant et après application pour déterminer la masse de peinture déposée. Le volume appliqué peut-être déduit à partir de la densité de la peinture.

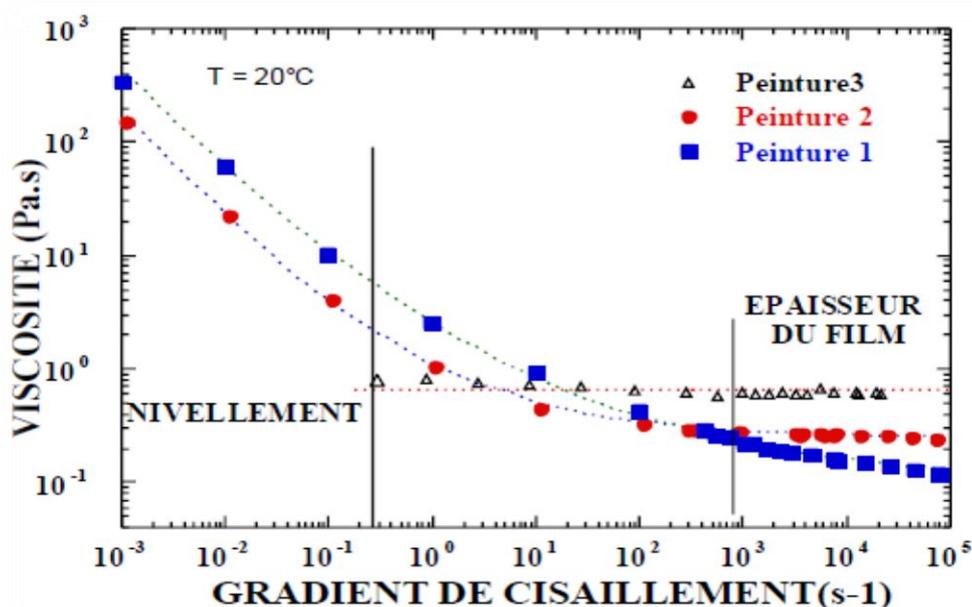
### **III.3. Etude de cas revêtement**

#### **III.3.1. Rhéologie à forts gradients de cisaillement et épaisseurs de films de peintures**

### III.3.1.1. Problématique

Dans la plupart des opérations d'enduction, on souhaite contrôler l'épaisseur et l'uniformité du film de fluide. Les produits utilisés dans l'enduction : peinture, vernis, adhésifs... sont, en général, des fluides non-newtoniens dont la viscosité n'est pas constante.

Le tendu du film, et donc le nivellement des défauts, sont plutôt gouvernés par la viscosité aux bas gradients de cisaillement (voir figure III.2). Par contre, l'épaisseur de la couche déposée est déterminée par le cisaillement imposé à la peinture entre l'applicateur (pinceau, rouleau, lame...) et le substrat à enduire. Les gradients de cisaillement dans ce contact sont très élevés, typiquement de  $10 \text{ s}^{-1}$  à  $105 \text{ s}^{-1}$ . C'est la viscosité à ces forts gradients de cisaillement qu'il faut mesurer pour maîtriser l'épaisseur couchée. Pour cela, des techniques rhéométriques adaptées doivent être mises en œuvre. Elles permettent de mettre en évidence des phénomènes qui ne peuvent pas être appréhendés par des mesures de viscosité aux bas gradients de cisaillement souvent utilisées.



**Figure III.2 :** Evolution de la viscosité en fonction de gradient de cisaillement

### III.3.1.2. Méthodologie

Pour la détermination de la viscosité en régime permanent, un rhéomètre rotatif à vitesse imposée a été mis en œuvre. Ce rhéomètre a été équipé d'une cellule cône plan pour les gradients de cisaillement inférieurs à  $310 \text{ s}^{-1}$ . L'évaporation du solvant a été évitée en saturant

l'atmosphère autour de la surface libre. Pour les gradients de cisaillement de  $310\text{s}^{-1}$  à  $7500\text{s}^{-1}$ , une géométrie de Couette à cylindres coaxiaux a été utilisée. La température a été mesurée avec une précision de  $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pour les gradients de cisaillement de  $7500\text{s}^{-1}$  à  $105\text{s}^{-1}$ , un rhéomètre capillaire a été utilisé. Des capillaires très fins ont été fabriqués pour obtenir des gradients de cisaillement élevés. L'échauffement visqueux peut être important à ces très forts gradients de cisaillement. Chaque point de mesure a été corrigé des échauffements visqueux pour déterminer la viscosité à la température souhaitée.

## **Résultats**

La figure ci-dessus montre trois exemples d'évolution de la viscosité à  $20^{\circ}\text{C}$  dans un très large domaine de gradients de cisaillement ( $10^{-3}\text{s}^{-1}$  à  $105\text{s}^{-1}$ ) correspondant à celui mis en œuvre dans le procédé.

La peinture 3 possède une viscosité pratiquement constante de  $0,65\text{ Pa}\cdot\text{s}$  sur quatre décades de gradients de cisaillement ( $0,1$  à  $105\text{s}^{-1}$ ). Par contre, les peintures 1 et 3 montrent un comportement non-newtonien marqué. La viscosité apparente chute fortement avec le gradient de cisaillement (rhéofluidification) sous l'effet des forces de cisaillement. Pour les faibles gradients de cisaillement, la viscosité tend vers l'infini montrant que la peinture possède un seuil d'écoulement. Ce seuil est probablement dû à la présence d'additifs pour prévenir la sédimentation des pigments. Ici, le seuil d'écoulement est de  $0,25\text{ Pa}$  pour la peinture 1 et de  $0,15\text{ Pa}$  pour la peinture 2. Pour la peinture 2, lorsque le gradient de cisaillement est plus grand que  $103\text{s}^{-1}$ , la viscosité devient constante, tandis que la viscosité de la peinture 1 chute encore légèrement avec le gradient de cisaillement à  $105\text{s}^{-1}$ .

## **Conclusion**

On remarquera que les courbes représentant les évolutions de la peinture 1 et 2 se croisent. Les classements aux bas et forts gradients de cisaillement sont inversés. Ceci souligne l'importance de faire les mesures de viscosité dans toute la plage de gradients de cisaillement du procédé d'enduction. Ces mesures permettent de maîtriser à la fois la phase de dépôt sous hautes sollicitations, et la phase de nivellement des défauts sous faibles sollicitations, au cours du procédé d'enduction.

# **Conclusion générale**

## **Conclusion générale**

Les peintures, utilisées pour la protection et/ou la décoration des subjectiles les plus divers (aciers, aciers galvanisés, électrozingués, matériaux plastiques, bois et béton) doivent répondre aux contraintes réglementaires, ce qui a obligé les fabricants de matières premières (fabricants de liants, de pigments et additifs) et de peintures à développer de nouveaux produits.

Dans Le but de l'étude rhéologique d'une peinture est de simuler le plus fidèlement possible les différents processus impliqués lors de sa fabrication, son stockage, et son utilisation par un client.

D'après le cas pratique de l'étude rhéologique des peinture on conclut que :

- les propriétés rhéologiques à très bas gradient de vitesse, ayant des conséquences directes sur le stockage des peintures.
- de celles à haut gradient de vitesse et de leur évolution après cisaillement, ayant des conséquences directes sur l'application et l'aspect du film de peinture.

Enfin, il faut étudier la déformation d'écoulement des produit (la rhéologie) au temps de fabrication, pour obtenir des beaux résultats et des produits professionnelles.



# **Références bibliographiques**

## **Références bibliographiques**

- [1] : Encyclopédia Universalis, édition 2002, Thesaurus 27, numéro de série d'éditeurs 105 ;
- [2] : ZAINE Aris (2006), "Caractérisation rhéologique des polymères à basse et haute température", mémoire de master en génie mécanique, TIZI OUZOU ;
- [3] : Présentation de l'entreprise PIGMA COLOR. ;
- [4] : RODOLPHE LEBRETON, MICHEL ECUYER, THIERRY PORTAZ. Peintures en solvants. Composition. risques toxicologiques, mesures de prévention, INRS, ED 971, Paris 2005. PP.1-20, disponible sur ;  
[www.inrs.fr/inrspub/inrs01.nsf/intranetObjectaccesparRéférence/ED%20971/\\$file/ed971.pdf](http://www.inrs.fr/inrspub/inrs01.nsf/intranetObjectaccesparRéférence/ED%20971/$file/ed971.pdf)
- [5] : [https:// www.metaltop.fr/](https://www.metaltop.fr/);
- [6] : Avantage et inconvénients de la peinture vinylique. URL : <https://www.plus-que-pro.fr>
- [7] : Comprendre peinture à l'eau, URL : <https://peinture.ooreka.fr/>
- [8] : [https:// www.reca.tm.fr/](https://www.reca.tm.fr/);
- [9] : Kadri, Chimie des polymères : la peinture. URL : <https://prezi.com./>;
- [10] : Ammouche Tassaadit. Solvants et additifs. Rapport de stage, 2018 ;
- [11] : SOUDI, Xanthoulis. Fiche VLR: Peinture vernis, laques et encres. FAO, 2006 ;
- [12] : L'ITECH LYON- Institut textile et chimique de Lyon en octobre 1988 par J.LALUET et P.FABRE ;
- [13] : LAOUT, Jean-Claude. Formulation des peintures: Physico-chimie et matières pulvérulentes. Techniques de l'ingénieur. Génie des procédés, 2005, no J2270 ;
- [14] : Ammouche Tassaadit, solvants et additifs. Présentation power point, 2018 ;
- [15] : Initiation à la rhéologie, livre de GYU COUARRAZE , Jean – Louis Grossiord et Nicolas Huang ;

- [16] : Nicolas TIXIER ; Approche des propriétés rhéologique de suspension biologiques floculées. Thèse doctorat , Université de limoges discipline : chimie et microbiologie (2003) ;
- [17] : Debœuf A., (2008). « Interactions Hydrodynamiques Dans Les Suspensions Macroscopiques ». Thèse de doctorat de Mari-Curie
- [18] : Bonnoit, C., (2009). « Ecoulement de suspensions granulaires modèles ». Thèse de doctorat de l'université Paris 6.
- [19] : Amoura M., Zeraibi N., Gareche M., Benzaoui A., (2015). « Modélisation expérimentale et theorique d'une substance complexe ». Revu algérienne de physique volume 2, page 96-100.
- [20] : Springinsfeld F., (2009). « Mécanismes de gélification et comportement rhéologique d'émulsions d'alcanes partiellement cristallisés ». Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie-Curie
- [21] : Eley, R.R. (2005). Applied rheology in the protective and decorative coatings industry. Rheology reviews, 2005, 173-240

## Résumé

La maîtrise du procédé de couchage de peinture nécessite la compréhension des phénomènes déterminant l'épaisseur et l'aspect du film déposé sur le substrat. Cela passe par le contrôle des propriétés rhéologiques des peintures, dans les conditions de sollicitation correspondant au procédé. Dans ce projet, généralités sur les peintures ainsi que la théorie de rhéologie ont été développés, ce qui nous permettra de comprendre la relation très lié entre la rhéologie et les revêtements en général.

Mots clés : Couchage de peinture, rhéologie.

## ملخص

يتطلب إتقان عملية طلاء الدهان فهم الظواهر التي تحدد سمك ومظهر الفيلم المترسب على الركيزة. ويشمل ذلك التحكم في الخصائص الانسيابية للدهانات، في ظل ظروف الإجهاد المقابلة للعملية. في هذا المشروع، تم تطوير العموميات على الدهانات وكذلك نظرية الريولوجيا، مما سيسمح لنا بفهم العلاقة الوثيقة الصلة بين الريولوجيا والطلاءات بشكل عام.

الكلمات المفتاحية: طلاء الدهان، ريولوجيا.

## Abstract

Mastering the paint coating process requires understanding the phenomena determining the thickness and appearance of the film deposited on the substrate. This involves controlling the rheological properties of the paints, under the stress conditions corresponding to the process. In this project, generalities on paints as well as the theory of rheology have been developed, which will allow us to understand the relationship between rheology and coatings in general.

Key words: paint coating, rheology.