

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement supérieur et de la Recherche scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté de génie de construction
Département de génie mécanique



Mémoire fin d'études



En vue de l'obtention du diplôme
de master en génie mécanique
Option : F.M et productique

Thème

Conception d'un pégosimètre

Proposé par :

M^r : BOURAS

Réalisé par :

M^{elle} : LEGHIMA Souhila

Promotion 2013

Remerciements

Je tiens à adresser mes remerciements à mon promoteur Monsieur Bouras pour son aide, ses conseils, sa patience et son orientation a fin d'établir le modeste travail ainsi les membres de jury qui ont accepté d'examiner et de mettre en valeur mon travail.

Sommaire

Sommaire

Introduction générale.....	1
Partie bibliographique	
Chapitre I : généralité sur collage	
1. Introduction.....	2
2. Intérêt du collage par apport aux autres méthodes d'assemblage	2
2.1. Les avantage	2
2.2. Les inconvénients	3
3. Positionnement du collage.....	4
4. Mécanisme du collage.....	9
4.1. Définition	9
4.2. Adhésion	10
4.2.1. Forces de van der Waals	10
4.2.2. Forces capillaires	18
4.2.3. Forces électrostatiques.....	23
4.3. Développement de la cohésion (prise de la colle)	25
4.4. Adhérence	25
4.4.1. Origine de l'adhérence	26
4.4.2. Modélisation de l'adhérence	26
5. Les joints.....	27
6. Principale familles de colles et adhésifs.....	27
6.1. Adhésifs époxydes.....	27
6.2. Adhésifs polyuréthanes réactifs	30
6.3. Colles thermodurcissables (UF, PF, MF, RF)	30
6.4. Adhésifs à base de monomères polymérisables.....	31

6.4.1. Adhésifs cyanoacrylates	31
6.4.2. Adhésifs anaérobies	31
6.5. Adhésifs acryliques structuraux ou acryliques modifiés.....	32
6.6. Adhésifs <i>hot melts</i> ou thermofusibles.....	32
6.7. Plastisols PVC.....	33
6.8. Adhésifs élastomères, colles contact au néoprène	33
6.9. Colles émulsions vinyliques et copolymères	33
7. Mise en œuvre	34
8. Conclusion	36

Chapitre II : test d'adhésion

1 Introduction	37
2. Evaluation de l'adhésion.....	37
2.1. Test de résistance au cisaillement.....	37
2.2. Test de plage.....	37
2.3. Test de tack.....	39
2.3.1. Le tack à la bille	39
2.3.2. Le tack à la boucle.....	40
3. Test de probe-tack.....	40
3.1. Description du test de " probe-tack ".....	40
3.2. Les géométries.....	42
3.2.1. Sonde sphérique : test JKR	42
3.2.1. Sonde plane.....	43
3.3. Courbe de tack	44
4. Influence des paramètres expérimentaux sur le tack.....	45
4.1. Température	46
4.2. Temps et pression de contact	46
4.3. vitesse de traction.....	47

4.4. Influence des paramètres de surfaces	48
4.4.1. Traitement des plaques.....	48
4.4.2. Rugosité des plaques ou de l'échantillon	48
5. Conclusion	49

Chapitre III : description des pégosimètres

1. Introduction.....	50
2. Machine de traction	50
3. Pégosimètre52	
3.1. Principe de fonctionnement	52
3.2. Mesure et informations recueillies.....	52
3.3. Equipements.....	53
3.4. Exemples d'utilisation dans le cadre nos activités.....	53
4 .Pégosimètre instrumentés	53
4.1. Pégosimètre à prisme.....	54
4.2. Pégosimètre multifonction.....	56
4.3. Utilisation.....	57
4.4. Caractéristiques techniques.....	57
5. Raideuromètre Pégosimètre	59
6. Conclusion	60

Partie conception

Chapitre IV : cahier de charge de machine d'essais de collage

1. Enoncé de besoin.....	61
1.1. Diagramme de besoin selon le point de vue de laboratoire.....	61
1.2. Diagramme de besoin selon le point de vue de l'utilisateur.....	61
2. validation du besoin.....	62
3. recherche des fonctions de service	62
3.1. Diagramme d'environnement.....	62
3.2. Validation des fonctions de service	63

3.3. Conclusion.....	64
4. Cahier des charges fonctionne	65
5. Contraintes.....	65

Chapitre V : machine d'essais de collage

1. Introduction.....	67
2. Description du principe de fonctionnement	67
2.1. Schéma cinématique	67
2.2. Elément constitutif de dispositif.....	69
2.2.1. Motoréducteur.....	69
2.2.2. L'accouplement.....	70
2.2.3. La vis à bille et son palier.....	70
2.2.4. Le capteur d'effort.....	72
3. Description des composants de machine d'essais de collage.....	73
4. Schéma technologie	80
Conclusion général.....	81

Liste des symboles

Liste des symboles

r, r_{ij}	Distance séparant deux atomes ou objet i et j
ϕ	potentiel de Lennard Jones
C_{vdw}	Constante du potentiel de Lennard Jones
ϵ_0	Permittivité du vide $\epsilon_0 = 8,85 \text{ Fm}^{-1}$
r_0	Distance séparant deux atomes à l'équilibre dans le vide
Π_c	Energie d'interaction entre deux solides
B_i	Densité atomique du solide Ω_i
z	Distance au plan référence
R	Rayon de l'objet (sphère, cylindre...)
h	Epaisseur du plan
A	Coefficient d'Hamaker
F_{sp}^{vdw}	La force de van der Waals
r^{rug}	Rayon de rugosité
r^{rms}	Rayon moyen de rugosité
F^{cap}	Force capillaire
F_L	Force de Laplace
F_T	Tension à l'interface de la ligne triple
ρ	Rayon de courbure du ménisque de capillarité (plan parallèle au substrat)

ρ'	Rayon de courbure du ménisque de capillarité (plan orthogonal au substrat)
θ_i	Angle de contact formé par le ménisque capillaire et le solide Ω_i au niveau de la ligne triple
L	La longueur de la poutre
c	Courbure de moyenne du ménisque de capillarité
γ_i	Énergie de surface (exprimée en $mJ \cdot m^{-2}$) associée au matériau i pour les solides ou tension de surface (exprimée en N/m) pour les liquides
r_k	Rayon de Kelvi
R_{gp}	Constante des gaz parfaits $R_{gp} = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$
T	Température
q_A	Charge de la particule A
q_B	Charge de la particule B
ν_i	Coefficient de poisson du matériau i
H	Pression relative de vapeur ou humidité relative
M	Masse de l'objet fixé à l'extrémité de la poutre
σ_i	Charge surfacique du solide Ω_i

Liste des figures

Liste des figures

Figure I-1: Positionnement du collage par rapport aux autres méthodes d'assemblage.....	4
Figure I-2 ; Éléments géométriques utilisés pour calculer l'énergie d'interaction d'une sphère et d'un plan. Les forces de van der Waals dérivent de cette énergie.....	13
Figure I-3 : rugosité.....	17
Figure I-4: Ménisque capillaire entre une pointe et une goutte de liquide.....	18
Figure I-5 : Forces exercées par un ménisque capillaire.....	18
Figure I-6: Dépendance de la taille du rayon de Kelvin à l'humidité ambiante. La ligne horizontale représente la limite en dessous de laquelle le rayon de Kelvin n'a plus de sens physique car il devient plus petit que la taille d'une molécule d'eau [5].....	20
Figure I.7 : Principe de l'algorithme de recherche du ménisque capillaire de P. Lambert. À gauche, le ménisque est construit à partir d'un point P. L'angle de contact θ_2 et l'humidité déterminent la position du centre de courbure ω' . À droite, la position du point P qui satisfait les conditions de l'angle de contact θ_1 est recherchée par itérations successives.....	22
Figure I-8 : Force électrostatique entre deux particules A et B de charge respective q_1 et q_2 séparées par une distance.....	24
Figure I.9 : Forces électrostatiques entre une particule de charge q_2 et un plan de Charge surfacique σ_1	25
Figure I-10 : traction.....	27
Figure I-11: cisaillement.....	27
Figure I-12: clivage.....	27
Figure I-13: pelage.....	27

Figure I-14 : Schéma général d'une ligne d'assemblage.....	34
Figure II.1 : test de résistance au cisaillement.....	37
Figure II-2: Schéma d'un test de pelage : principe et notations.....	38
Figure II-3 :tack à la bille.....	40
Figure II-4 : le tack à la boucle.....	40
Figure II-5 : courbe expérimentale de tack obtenue durant un test de probe-tack à indenteur plat. On mesure la force et la position de la sonde en fonction de temps [7].....	41
Figure II-6 : test JKR (un seul matériau).....	42
Figure II-7 : test JKR (plusieurs matériaux).....	42
Figure II-8 : courbe de tack et paramètre descriptifs [9].....	45
Figure III-1 : machine de traction.....	51
Figure III-2 : Force subie en fonction du déplacement (de 100 micromètres à 1 mm) lors d'une traction à vitesse constante, pour différentes vitesses variant de 0,5 $\mu\text{m/s}$ à 1 mm/s , par un film d'huile de silicones très visqueuse.....	51
Figure III-3 : Pégosimètre (Cet appareil a été réalisé au Centre de Recherche Paul Pascal à Bordeaux).....	52
Figure III-4 : Pégosimètre à prisme.....	54
Figure III-5 : Force de traction en fonction du déplacement et image de la cavitation déclenchée, observée sur le pégosimètre à prisme.....	55
Figure III-6 : Pégosimètre multifonction.....	55
Figure III-7 : Force de traction, images de cavitation et digitation observées et enregistrement sonore sur le Pégosimètre multifonction.....	56

Figure III-8 : Le raideuromètre pégosimètre.....	59
Figure V-1 : schéma cinématique.....	68
Figure V-2 : motoréducteur.....	69
Figure V-3 : L'accouplement (joints d'Oldham)	70
Figure V-4 : La vis à bille.....	70
Figure V-5 : Palier vis à bille.....	71
Figure V-6 : Image de capteur de force.....	72
Figure V-7 : Dessin de définition de capteur deforce.....	72
Figure V-8 : La base.....	73
Figure V-9 : Colonne.....	73
Figure V-10 : Colonne de guidage.....	74
Figure V-11 : Murs de la tête.....	74
Figure V-12 : La base de la tête.....	75
Figure V-13 : Bride de moteur.....	75
Figure V-14 : Bride de capteur.....	76
Figure V-15 : Mors inférieur.....	76
Figure V-16 : Support de matériau.....	77
Figure V-17 : Mors supérieur.....	77
Figure V-18 : Indenteur plane.....	78
Figure V-19 : Indentur sphérique.....	78

Figure V-20 : La pièce intermédiaire.....	79
Figure V-21 : Travers mobile.....	79
Figure V-22 : Machine d'essais de collage.....	80

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I-1: Comparaison des diverses méthodes d'assemblage des métaux	5
Tableau I-2: Méthodes d'assemblage des diverses matières plastiques.....	7
Tableau I-3 : cas d'autres géométries.....	16
Tableau I-4: Modes d'assemblage.....	27
Tableau I-5: Exigences et caractéristiques des colles selon les opérations de collage à effectuer	35
Tableau III-1 : Caractéristique technique	57
Tableau IV-1 : Validation des fonctions de service	63
Tableau IV-2 : Cahier des charges fonctionnel	65
Tableau V-1 : Les dimensions de l'accouplement.....	70
Tableau V-2 : Les dimensions de la vis à bille	71
Tableau V-3 : Les dimensions de palier vis à bille	71
Tableau V-4 : Les dimensions de capteur de force.....	72

Introduction générale

Le collant d'un matériau traduit sa capacité à adhérer a la surface d'un autre matériau en contact avec lui. Qualitativement cette notion de collant, appelée pégosité peut être appréhendée de manière sensorielle via le toucher. Par contre, la quantification de cette sensation passe par la mesure de la force ou de l'énergie nécessaire pour séparer les deux surfaces en contact.

L'intérêt principal de l'adhésion est de générer une résistance à la rupture. Toute la question est donc de savoir par quels mécanismes et avec quelle efficacité un joint adhésif résiste à la rupture, quel que soit le type de sollicitation subie.

Pour présenter notre travail, nous avons adopté un plan en deux parties :

La première partie est une partie bibliographique est scindée en trois chapitres : le première, chapitre I est une étude générale illustrant les différents points important concernant les colles ; il a pour objet de décrire les buts et objectif de ce travail. Le chapitre II concerne les différents tests d'adhésion et l'influence des différents paramètres expérimentaux. Enfin, le dernier chapitre, chapitre III, nous allons présenter tout d'abord les quatre machines (pégosimètres), après nous détaillerons le protocole utilisé pour réaliser les expériences de traction(ou de tack).

La seconde partie concerne la conception de la machine d'essais de collage. Elle est divisée en deux chapitres : le premier, concerne cahier de charge. Le deuxième chapitre est consacré à la conception du mécanisme lui-même.

Enfin, on termine par une conclusion générale

Chapitre I

Généralité sur collage

1. Introduction

L'emploi d'adhésifs était connu dès 4500 av. JC. Ces adhésifs étaient composés de matières premières animales et végétales, comme la colle d'os (graisse animale) et de caséine, ainsi que de goudron, de poix, de cires, etc. C'est seulement à la fin du 19ième siècle(en 1876 environ) que l'on produit les premières solutions de caoutchouc et de résines avec du benzène qui servent à un collage relativement fiable du bois, du papier, du carton, des tissus et du cuir.

Au début du 20ième siècle, apparaissent les premières colles à base de nitrocellulose qui permettent un assemblage de construction, en partie sans utilisation de moyens mécaniques.

En raison de progrès décisifs dans le domaine de la chimie macromoléculaire, les bases des techniques modernes du collage ont été mises en place. C'est en 1949 que sont introduites les colles sur base de Néoprène.

Les moyens de collage évoluent et gagnent de plus en plus d'importance dans les méthodes actuelles de fabrication industrielle.

2. Intérêt du collage par apport aux autres méthodes d'assemblage

2.1. Les avantage

- Le collage est l'une des meilleures méthodes d'assemblage possible :
 - pour les petites pièces (montage des puces et composants électroniques, bijouterie) ;
 - pour les pièces, tôles ou feuilles minces, très fragiles ;
 - c'est la seule méthode possible pour certaines pièces (panneaux sandwichs, revêtements en feuilles minces décoratifs ou protecteurs, stratifiés).

- Cette technique permet d'assembler des matériaux différents, par exemple : plastique sur métal, sur bois, métaux différents (ce qui ne permet pas la soudure autogène), plastiques différents, matériaux ayant des coefficients de dilatation différents...
- Méthode qui assure une meilleure répartition des contraintes.
- Le collage permet d'obtenir un allègement de la structure assemblée (par la suppression des rivets, vis et boulons).
- Évite tout affaiblissement des pièces assemblées (pas de trous à percer).
- Offre un meilleur aspect visuel : donne des surfaces lisses (pas de rivets ou de boulons), améliore l'aérodynamisme en aéronautique, permet de réaliser un joint non visible.
- Les joints collés présentent une élasticité leur permettant d'amortir les vibrations dans certains cas (plastisols dans l'automobile par exemple) ou de tolérer des variations dimensionnelles, sans déformations.
- Les joints collés peuvent être isolants ou conducteurs électriques.
- Les joints collés peuvent être étanches.
- Les assemblages collés présentent un meilleur rapport résistance mécanique/poids.
- La dépose des colles peut être rapide et automatisée, ce qui peut abaisser le coût d'assemblage.
- Méthode la mieux appropriée à l'assemblage des pièces de révolution, avec une excellente résistance aux couples.

2.2. Les inconvénients

- Le collage est mal connu par les industriels, les mécaniciens : on ne sait pas « comment ça colle ».
- La mise en œuvre de cette technique d'assemblage nécessite formation, adaptation et connaissance de la technique du collage : une conception adaptée de la part des bureaux d'études, du soin de la part des ouvriers, un contrôle de la part de la maîtrise.
- Un bon collage nécessite une bonne préparation des surfaces, des surfaces planes, propres...

- La durabilité des collages est limitée : elle varie de 5 à 40 ans, selon les types d'adhésifs, les contraintes et l'environnement.
- La résistance à la chaleur est limitée : les colles classiques pour métaux ne résistent qu'à environ 70 à 150°C avec cependant des adhésifs thermostables très spéciaux qui résistent à 200 voire 300°C.
- Collages sensibles à l'humidité et risques de corrosion si la préparation des surfaces n'est pas parfaite.
- La durée de durcissement peut être parfois longue : 10 à 20 h a températures ambiantes.
- Le joint de colle doit travailler en cisaillement, jamais en traction pure ni en clivage, sa résistance au pelage est faible.

3. Positionnement du collage [1]

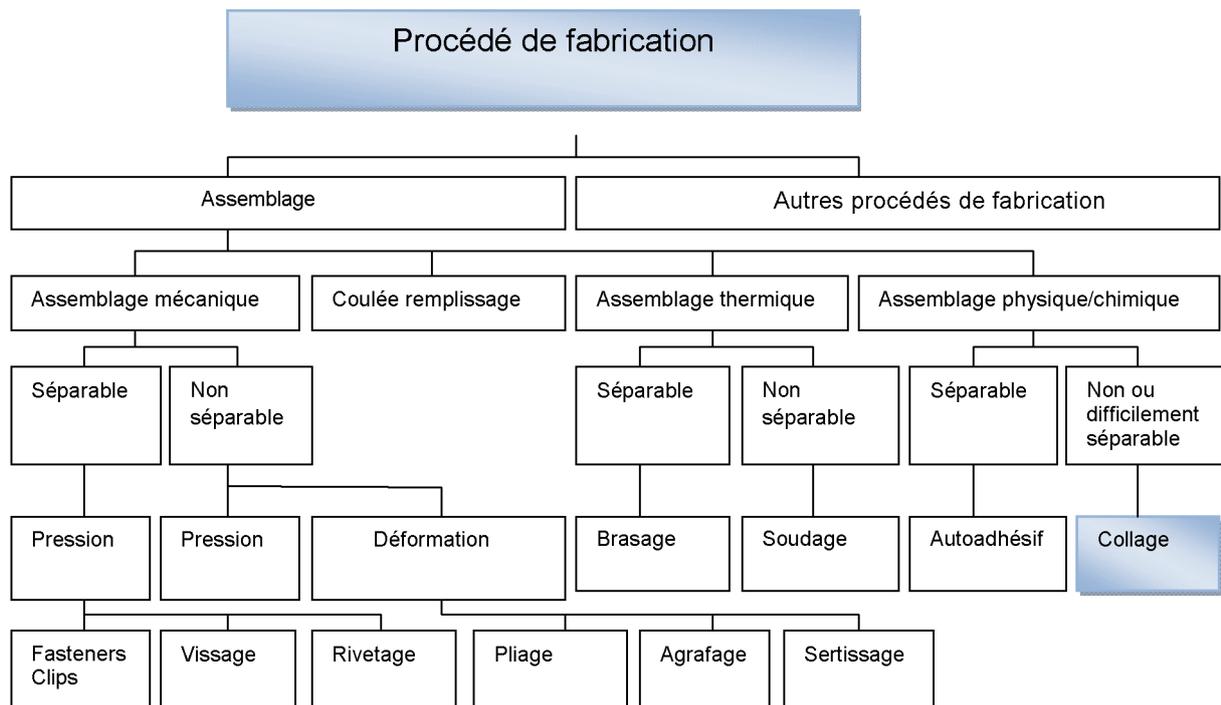


Figure I-1 : Positionnement du collage par rapport aux autres méthodes d'assemblage. [1]

Le tableau ci dessus compare les différentes méthodes d'assemblage des métaux : assemblage mécanique, soudage, brasage et collage.

Caractéristiques de l'assemblage	Soudure autogène	Brasage	Assemblage mécanique (vis, rivets, boulons)	Collage
Métaux et matériaux pouvant être assemblés	Métaux identiques difficile pour certains matériaux (Al, Ti).	Métaux différents éventuellement.	Matériaux différents (métal/métal, métal/plastique, plastique/bois...).	Tous matériaux différents.
Formes et dimensions des pièces	Surfaces grandes, moyennes, petites (par cordon de soudure). Permet un assemblage bout à bout.	Surfaces toutes dimensions. Permet un assemblage bout à bout.	Pièces de toutes formes mais avec un dimensionnement et une conception adéquate préalable des parties à assembler.	Pièces de toutes formes et toutes dimensions, mais le joint doit travailler en Cisaillement uniquement. Pas d'assemblage bout à Bout.
Exemples typiques de pièces assemblées	Plaques, à plat ou en angle, cornières, renforts.	Plaques, à plat ou en angle, cornières, renforts, petites pièces (électronique).	Brides, capots, angles, tôles.	Renfort, pièces de révolution, cornières, encastremets à plat
Planéité des pièces, surfaçage, usinage des pièces, préparation des surfaces	Seule la partie soudée doit avoir une configuration adaptée (fraisée...)	Seule la partie soudée doit avoir une configuration adaptée (fraisée...). Pré fluxage.	Nécessité de percer des trous et tarauder les pièces. Bonne planéité nécessaire à l'endroit de l'assemblage	Pièces planes et parallèles à l'endroit de l'assemblage. Traitement de surface du métal.
Impossibilités	Certains métaux ou alliages ne peuvent pas être soudés (fonte, cuivre, bronze, zinc).	Certains assemblages de deux métaux différents sont impossibles (...).	Difficulté avec les petites pièces (mais technique utilisée en horlogerie) et avec les matériaux ne pouvant pas être usinés, percés.	Aucune impossibilité

Permanence de l'assemblage, démontage, réparation.	Assemblage permanent	Assemblage destiné à être permanent (mais que l'on peut dessouder).	Assemblage aisément démontable. Réparation facile.	Permanent. Non démontable
Répartition des contraintes	Parfois irrégulière.	Bonne.	Contraintes concentrées à l'endroit des trous, vis, rivets et boulons.	Excellente répartition des contraintes de cisaillement sur toute la surface, mais mauvaise dans le cas du clivage ou du pelage.
Résistance mécanique	Peut être très élevée.	Peut être très élevée.	Peut être très élevée.	Élevée en cisaillement. Faible en clivage ou pelage
Résistance à la fatigue, aux vibrations	Bonne mais doit être étudiée	Bonne mais doit être étudiée.	Les assemblages peuvent se desserrer lorsqu'ils sont soumis aux vibrations.	Excellente résistance à la fatigue.
Apparence	Bonne mais cordons de soudures apparents et faisant relief. Légère distorsion des tôles.	Bonnes mais cordons de soudures apparents et faisant relief. Possible distorsion légère des pièces	Saillie des têtes de rivets et boulons.	Permet d'obtenir des surfaces lisses. Joints invisibles. Surfaces non marquées.
Poids	Neutre vis-à-vis du poids	Globalement neutre vis-à-vis du poids	Alourdit la structure (important en aéronautique)	Permet de réduire le poids des structures assemblées grâce à l'utilisation de pièces plus minces
Résistance à la chaleur	Très haute résistance (égale à celle des métaux assemblés).	Résistance élevée (égale à celle du métal d'apport).	Très haute résistance (égale à celles des métaux en présence).	Limitée (température maximale de 120 °C pour les colles époxydes et de 300 °C pour les colles thermostables).

Résistance à l'eau, à la corrosion	Excellente. Très peu de risque de corrosion.	Bonne.	L'eau n'a pratiquement pas d'action sur les assemblages. Possibilité de corrosion bimétallique.	Risque de corrosion si les assemblages sont sous tension.
Équipement, outillage nécessaires	Poste de soudure avec bouteilles de gaz.	Poste de soudure moins onéreux que pour la soudure.	Manuel, simple.	Simple pour collages à froid. Système de chauffe pour collage à chaud.
Main-d'œuvre	Doit être qualifiée	Doit être qualifiée.	Peu qualifiée.	Doit être qualifiée. Soigneuse dans la préparation.
Contrôles de fabrication	Contrôles non destructifs (CND) : examen visuel, essai d'étanchéité, radiographie (à rayons X notamment), ultrasons, etc.	CND : examen visuel, essai d'étanchéité, radiographie (à rayons X notamment), ultrasons, etc.	Contrôle visuel (présence des vis, boulons, rivets), vérification du serrage des vis et boulons. Simples.	Diverses méthodes : -épreuves suivies ; -fractionnement; -CND : examen visuel, essai d'étanchéité, radiographie (à rayons X notamment), ultrasons, etc.

Tableau I-1 Comparaison des diverses méthodes d'assemblage des métaux [1]

Le tableau ci-dessus indique comment choisir la méthode la plus appropriée pour l'assemblage des matières plastiques : collage, soudure (thermique, aux solvants, aux ultrasons, par induction, etc.) selon les plastiques à assembler.

matières plastiques	Adhésifs	Soudure haute fréquence	soudure par induction	Assemblage mécanique	Soudure au solvant	Soudure par friction rotation	Soudure à la chaleur	Soudure Aux ultrasons
Thermoplastiques								
ABS	X		X	X	X	X	X	X

Acétals	X		X	X	X	X	X	
Acryliques	X		X	X	X	X		X
Cellulosiques	X				X	X		
Éthylène copolymères		X					X	
Fluoroplastiques (Téflon).	D							
Ion mère (Surlyn Du Pont)		X					X	
Nylons, Polyamides	X	X	X	X	D			X
Phénylène oxide (Noryl) (PPO)	X			X	X	X	X	X
Polyesters thermoplastiques	X			X	X	X		X
Polyamide-imide	X			X				
Polyaryl éther	X			X				X
Polyaryl sulfone	X			X				X
Polybutylène								X
Polycarbonate	X		X	X	X	X	X	X
Polycarbonate/ABS	X			X	X	X	X	X
Polyéthylène	D	X	X	X		X	X	
Polyimide	X			X				
Polypropylène	D	X	X	X				
Polystyrènes	X		X	X	X	X	X	X
Polysulfones	X			X	X			X
Mélange PVC/acrylique	X		X	X				X
Mélange PVC/ABS	X	X					X	
Styrène acrylonitrile	X		X	X	X	X	X	X
Vinyliques (PVC)	X	X	X	X	X		X	
Thermodurcissables								
Glyceronaphtaliques...	X							
Diallyl phthalate	X			X				
Époxides, composites base époxydes	X			X				
Mélamines	X							
Phénoliques	X			X				
Polybutadiènes	X							

Polyesters, Polyester renforcé verre	X			X				
Silicones				X				
Polyuréthanes.	X			X				
D = difficile mais possible avec certains traitements de surfaces								

Tableau I-2 Méthodes d'assemblage des diverses matières plastiques. [1]

4. Mécanisme du collage

4.1 Définition

Une colle (ou un adhésif) est un produit chimique qui permet d'assembler deux matériaux.

On appelle *colle*, les colles traditionnelles telles que les colles vinyliques ou colles blanches, les colles à base de caoutchouc (colles contact ou néoprène...) et certaines colles thermodurcissables : urée-formol.

On tend de plus en plus à appeler *adhésifs* les colles modernes, performantes, telles que les époxydes, polyuréthanes, thermofusibles (ou *hot melts*), les cyanoacrylates et anaérobies, les acryliques.

D'abord liquide ou fluide, la colle est étalée sur l'une (ou sur les deux) surfaces à assembler et s'y accroche par divers mécanismes physiques ou chimiques. C'est le phénomène dit d'adhésion.

Puis, les matériaux sont assemblés et la colle durcit ou sèche : c'est ce que l'on appelle le durcissement ou le séchage ou la prise ou la polymérisation de la colle, qui met en œuvre divers mécanismes physiques et chimiques. Les colles (ou adhésifs) se caractérisent donc par l'adhésion et la cohésion (ou solidité finale).

4.2. Adhésion

En physique et en mécanique, l'adhésion est l'ensemble des phénomènes physico-chimiques qui se produisent lorsque l'on met en contact intime deux matériaux, dans le but de créer une résistance mécanique à la séparation. Une fois le contact établi, l'énergie nécessaire pour réaliser la séparation s'appelle énergie d'adhésion. Dans l'adhésion d'un liquide sur un solide fait intervenir trois forces élémentaires : Forces de van der Waals, forces capillaires, forces électrostatiques.

4.2.1. Forces de van der Waals

Les champs dus au moment dipolaire d'un atome sont à l'origine des forces de van der Waals. Cette partie développe le calcul de ces forces dans le cas d'une géométrie sphère-plan.

➤ Potentiel de Lennard-Jones [2]

Les forces de van der Waals sont calculées à partir de potentiels énergétiques. En atomes, la modélisation de l'énergie d'interaction conduit à un potentiel d'interaction en $1/r^6$

$$\Phi(r) = \frac{c_{vdw}}{r^6} \dots\dots\dots (I.1)$$

Avec c_{vdw} une constante physique dépendante des atomes considérés et disponibles dans la littérature. Ce potentiel représente l'énergie d'interaction de deux atomes (ou molécules) séparé(e)s d'une distance r . Il génère une force attractive et tend par conséquent à faire fusionner les deux atomes considérés en un seul. Ce modèle doit donc être complété par un potentiel répulsif afin de maintenir les atomes à une distance à laquelle leurs nuages électroniques ne s'interpénètrent pas.

Deux alternatives existent pour modéliser la répulsion. La première consiste à ajouter un terme fortement répulsif lorsque deux atomes sont très proches. Lorsque les atomes sont éloignés, la force qui en dérive doit de plus décroître assez rapidement avec la distance pour

être négligée devant la partie de la force qui dérive du potentiel en $1/r^6$. L'ajout d'un potentiel en $1/r^{12}$ remplit ces conditions et est très largement utilisé. Le potentiel d'interaction est alors appelé potentiel de Lennard-Jones et s'écrit :

$$\Phi(r) = \epsilon_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)^{12} - 2\epsilon_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)^6 \dots\dots\dots (1.2)$$

➤ **Discussion à propos du modèle de forces de van der Waals**

• **Force à distance et limite au contact [3]**

Les forces de pull-off sont dues aux forces d'adhésion au contact. Les forces de van der Waals sont l'une de ses composantes et doivent par conséquent être calculées dans le cas où les objets sont en contact. Or, de par leur principe et leur formulation, les forces de van der Waals sont des forces qui n'existent qu'à distance. La notion de forces de van der Waals entre des objets en contact nécessite donc d'être explicitée. Du point de vue macroscopique, le point de contact est un point supposé appartenir aux deux solides en contact. Cette conception du contact n'est pas compatible avec le concept des forces de van der Waals et doit être reformulée. Du point de vue nanoscopique, chaque objet est constitué d'un nombre fini d'atomes qui ne peuvent pas s'interpénétrer. Il existe donc nécessairement une distance séparant deux objets considérés comme étant au contact. Seul ce modèle de contact est compatible avec les modèles de forces. Si la distance qui sépare deux atomes est inférieure à leur distance d'équilibre dans le vide r_0 , le potentiel de Lennard-Jones prévoit une force de répulsion prépondérante devant la force d'attraction. Cependant, ces distances sont mal connues et sont, suivant les cas rencontrés dans la littérature, situées entre 0.2 nm et 0.4 nm. Nous considérerons donc dans la suite de ce document que deux objets en contact sont en fait espacés d'une distance $r_0 = 0.3$ nm. Lors de l'identification des modèles, la valeur de certains paramètres doit être adaptée afin de minimiser l'écart avec les mesures expérimentales. Or, la majorité des paramètres est connue avec une faible incertitude. La valeur de r_0 est moins bien identifiée, elle est donc généralement utilisée dans la littérature pour adapter les modèles aux observations expérimentales. Or, la majorité des paramètres est connue avec une faible incertitude.

- **Hypothèses de travail [4]**

La sommation par paires décrite par la théorie d'Hamaker définit l'énergie d'interaction Π_c entre deux solides Ω_1 et Ω_2 due aux forces de van der Waals comme la somme des énergies d'interaction de chaque couple d'atomes appartenant aux deux solides :

$$\Pi_c = \sum_i \sum_j \Phi(r_{ij}) \dots \dots \dots (1.3)$$

Où les atomes de Ω_1 (resp. Ω_2) sont indicés par i (resp. j) et où r_{ij} est la distance entre ces atomes. Si la distribution atomique est supposée uniforme et constante sur l'ensemble des solides Ω_1 et Ω_2 , la densité atomique β_i du solide Ω_i peut donc être définie. L'équation (1.3) peut être transformée pour obtenir un modèle quasi-continu :

$$\begin{aligned} \Pi_c &= \int_{\Omega_1} \int_{\Omega_2} \beta_1(r_i) \beta_2(r_j) \Phi(r_{ij}) d\Omega_1 d\Omega_2 \\ &= \beta_1 \beta_2 \int_{\Omega_1} \int_{\Omega_2} \Phi(r_{ij}) d\Omega_2 d\Omega_1 \dots \dots \dots (1.4) \end{aligned}$$

L'hypothèse d'uniformité du matériau est parfaitement vérifiée dans le cas d'un matériau cristallin non déformé, mais est discutable dans le cas de matériaux amorphes. Pour les matériaux amorphes les plus réguliers comme le verre, l'erreur due à la simplification de l'équation (1-4) reste acceptable. De même, il est possible de montrer que les variations de volume dues aux déformations ont un effet négligeable sur le calcul de l'énergie d'interaction. L'hypothèse d'uniformité des matériaux n'est utilisée que pour la simplification de l'équation (1-4).

➤ **Intégration du potentiel de Lennard-Jones entre une molécule et un plan infini [5]**

L'objectif est de calculer l'énergie d'interaction Π_c (équation (1-4)) entre une sphère et un plan. Ce calcul se fait en deux temps. L'énergie élémentaire d'interaction π_c entre une molécule et un objet Ω_1 est d'abord calculée puis celle-ci est exploitée pour le calcul de l'énergie globale d'interaction Π_c .

Dans la suite de cette partie, le plan Ω_1 est supposé infini et rigide. La première partie du calcul consiste à déterminer l'énergie d'interaction π_c associée à une molécule placée à une distance z du plan Ω_1 (voir Figure I-2a). Le plan est ainsi découpé en une somme d'éléments

différentiels en forme de couronne de rayon x , situés à une distance ξ de la molécule, et de section $dx d\xi$. L'énergie s'écrit donc :

$$\begin{aligned} \pi_c(z) &= \beta_1 \int_{\Omega_1} \frac{-c_{vdw}}{r^6} d\Omega_1 \\ &= \beta_1 \int_{\xi=z}^{+\infty} \int_{x=0}^{+\infty} \frac{-c_{vdw}}{\sqrt{\xi^2 + x^2}} 2\pi x dx d\xi \\ &= -\frac{\pi c_{vdw} \beta_1}{6z^3} \dots \dots \dots (1.5) \end{aligned}$$

La molécule considérée est une partie quelconque d'un objet pouvant interagir avec le plan Ω_1 . Cette expression ne dépend que de la distance entre la molécule et le plan grâce à l'hypothèse du plan infini. Elle n'est donc pas influencée par la géométrie du solide Ω_2 et peut être exploitée pour modéliser l'interaction d'un objet quelconque avec un plan rigide.

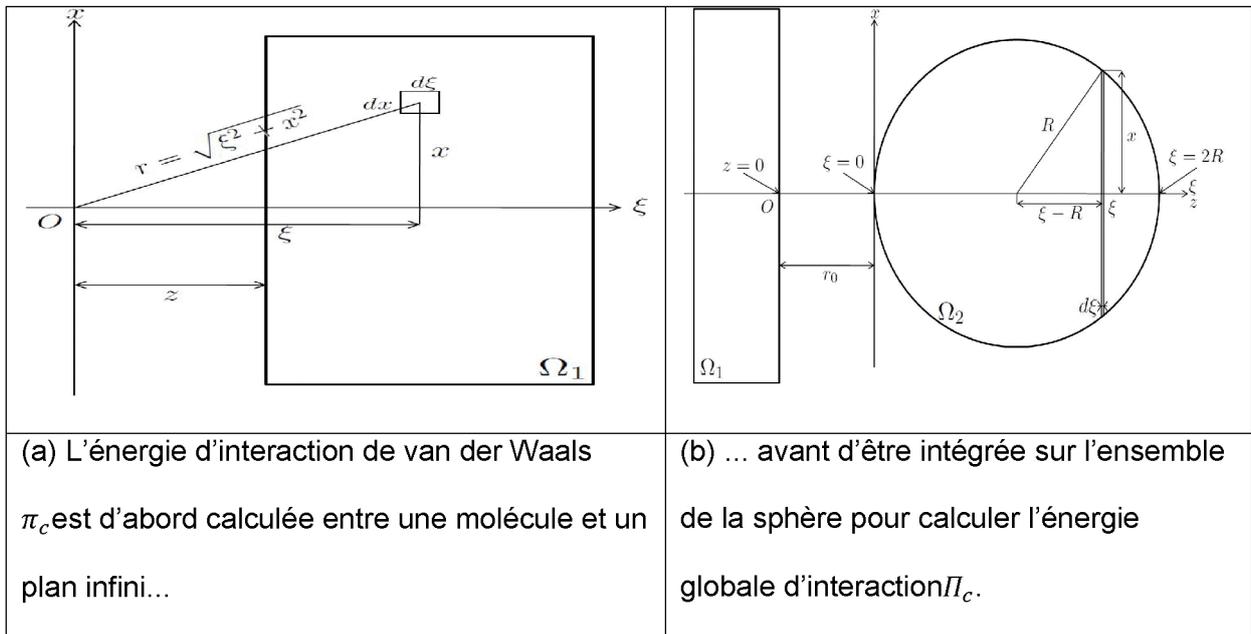


Figure I-2 ; Éléments géométriques utilisés pour calculer l'énergie d'interaction d'une sphère et d'un plan. Les forces de van der Waals dérivent de cette énergie.

➤ **Intégration du potentiel entre une sphère et un plan infini : [3]**

Les hypothèses d'homogénéité des milieux émises au début de cette partie autorisent l'utilisation du principe de sommation par paires. Or, les atomes ou molécules qui ne sont pas en surface de l'objet sont séparés du plan par le matériau qui compose Ω_2 et non par le milieu extérieur. Cet écrantage des forces de van der Waals n'est pas pris en compte par la sommation d'Hamaker. Cependant, la décroissance rapide des forces de van der Waals avec la distance d'interaction limite l'influence de cette nouvelle hypothèse.

L'énergie d'interaction peut donc être calculée à partir de l'équation (1.5). Dans l'exemple traité ici, le solide Ω_2 est une sphère de rayon R , à l'équilibre et en contact avec le plan (voir Figure I-2b). L'hypothèse formulée dans la section Discussion à propos du modèle de forces de van der Waals impose que la sphère soit à une distance r_0 du plan. L'énergie d'interaction est donc :

$$\begin{aligned} \Pi_c &= \beta_1 \beta_2 \int_{\Omega_2} -\frac{d\Pi_c}{dr_0} d\Omega_2 \\ &= -\frac{\pi C_{vdw} \beta_1 \beta_2}{6} \int_{\xi=0}^{2R} \frac{\pi(R^2 - (\xi - R)^2)}{(r_0 + \xi)^3} d\xi \\ &= -\frac{\pi^2 C_{vdw} \beta_1 \beta_2}{6} \left[\ln\left(\frac{r_0}{2R+r_0}\right) + \frac{2R(R+r_0)}{r_0(2R+r_0)} \right] \dots \dots \dots (1.6) \end{aligned}$$

Il apparaît ainsi que l'énergie d'interaction est proportionnelle au coefficient d'Hamaker défini par :

$$A = \pi^2 C_{vdw} \beta_1 \beta_2 \dots \dots \dots (1.7)$$

Les forces de van der Waals qui s'exercent entre une sphère et un plan dérivent du potentiel de l'équation (1.6) et s'écrivent alors :

$$\begin{aligned} F_{sp}^{vdw} &= -\frac{d\Pi_c}{dr_0} \\ &= -\frac{2R^3 A}{3r_0^2(2R+r_0)^2} \dots \dots \dots (1.8) \end{aligned}$$

Cette équation reste valable dans le cas particulier où la distance entre la sphère et le plan vaut $r_0 = 0.3 \text{ nm}$. Cette distance correspond à l'espace entre deux objets en contact.

À partir de cette définition du contact, les forces de van der Waals peuvent donc être explicitées pour des objets en contact. La notion de forces de van der Waals peut donc être étendue aux solides en contact. La définition du contact, et notamment la détermination de la valeur de r_0 , restent cependant des problèmes ouverts.

De plus, tout objet de taille micrométrique en contact avec un plan vérifie $R \gg r_0$

La force d'interaction équation (I-8) peut alors être simplifiée à l'échelle microscopique par :

$$F_{sp}^{vdw} = -\frac{AR}{6r_0^2} \dots \dots \dots (I.9)$$

Cette équation n'est pas seulement valable au contact mais pour toute sphère séparée d'un plan par une distance négligeable devant son rayon. Elle ne dépend que de la nature des matériaux et de la taille de la sphère.

➤ **Cas d'autres géométries [5]**

Les calculs précédents peuvent être effectués de la même manière avec d'autres géométries. Les équations du tableau (I-3) s'appuient sur la même formulation du problème et sur des hypothèses sous jacentes. Celles-ci doivent être scrupuleusement vérifiées pour une exploitation de ces dernières. La force d'interaction entre deux sphères peut par exemple être régie par une loi en $1/z^2$ pour des sphères proches alors qu'elle suit une loi en $1/z^7$ lorsque les sphères sont éloignées

Objets	Hypothèse	Force
<i>plan /plan^{ab}</i>	$z \ll h$ (épaisseur du plan)	$F = -\frac{A}{6\pi z^3}$ (par unité de surface)
<i>sphère /plan^{bc}</i>	$z \ll R$	$F = -\frac{AR}{6z^2}$
<i>sphère/sphère^{ab}</i>	$z \ll R$	$F = -\frac{AR}{12z^2}$
<i>sphère(particule)/plan^b</i>	$R \ll Z$	$F = -\frac{2AR^3}{3z^4}$
<i>sphère/sphère(particule)^b</i>	$R \ll Z$	$F = -\frac{96AR^6}{9z^7}$

Tableau I-3 : cas d'autres géométries

➤ **Influence de la rugosité sur les forces de van der Waals [3], [6]**

Les forces de van der Waals exercées sur deux points d'un solide décroissent fortement avec la distance. Ainsi, la géométrie de la surface des solides en contact influe sensiblement sur les forces de van der Waals. La rugosité doit donc être prise en compte lors des calculs.

H. Rompf a proposé un modèle dans lequel il considère une sphère de rayon R en contact avec une aspérité de rayon r^{rug} . Dans ce modèle, la taille caractéristique r^{rug} des aspérités doit être supérieure au rayon de coupure des forces de van der Waals pour être prise en compte.

Plus récemment, Y. I. Rabinovich et al. a proposé un modèle qui tient compte de la rugosité dans son ensemble. Il utilise pour cela la hauteur moyenne des rugosités considérées comme sphériques $r^{rms} = 0,673 r^{rug}$:

$$F_{sp}^{rug} = -\frac{AR}{6r_0^2} \left[\frac{1}{1+R/(1.48r^{rms})} + \frac{1}{(1+1.48r^{rms}/r_0)^2} \right] \dots \dots (I.10)$$

Ce modèle a été complété par E. R. Beach et al qui a ajouté un second niveau de rugosité aux formes sphériques (Figure I-3). Il peut être étendu de deux manières : soit en décrivant les rugosités comme des fractales, soit à partir d'un modèle probabiliste basé sur une mesure du profil d'altitude des surfaces. Les trois types de modèles de rugosité (aspérité sphériques, fractales et probabilistes) sont comparés par M. Savia et al.

Les forces de van der Waals sont fortement influencées par les interactions à courte distance et donc par la géométrie de la zone de contact. Par conséquent, la prise en compte de la rugosité joue un rôle déterminant dans le calcul des forces de van der Waals. La prédiction des forces implique une connaissance de cette rugosité. Cette dernière peut par ailleurs être contrôlée au cours de la phase de fabrication des micro objets par des procédés dits de nano structuration des surfaces. La rugosité peut ainsi être considérée comme un des paramètres utilisables pour contrôler les forces d'adhésion et fiabiliser les procédés de micromanipulation.

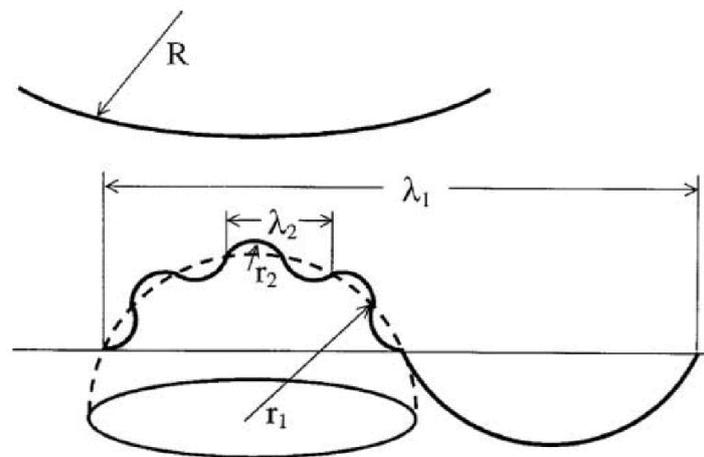


Figure I-3 : rugosité.

Deux niveaux de rugosité peuvent être pris en compte dans le calcul des forces de van der Waals. Le premier niveau est représenté par des sphères de rayon r_1 et est observable par une analyse rapide de la surface des matériaux. Le second prend en compte les sphères de rayon r_2 et n'est observable qu'après une analyse plus fine d'une rugosité de la surface.

4.2.2. Forces capillaires

Les modèles de forces capillaires sont d'abord développés dans le cas général puis dans le cas particulier de la géométrie sphère/plan. Cette partie s'appuie principalement sur les travaux de P.

➤ **Étude du cas général** [5]

Les ménisques capillaires (Figure I-4) sont à l'origine de deux forces. La première, la force de Laplace F_L est due à la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur du ménisque L1 (Figure I.5). La seconde, F_T est la tension à l'interface de la ligne triple i.e. à l'interface liquide/solide/gaz. Les forces capillaires sont obtenues en écrivant l'équilibre des forces appliquées à un solide Ω_1 :

$$F^{cap} = F_L + F_T \dots \dots \dots (I-11)$$

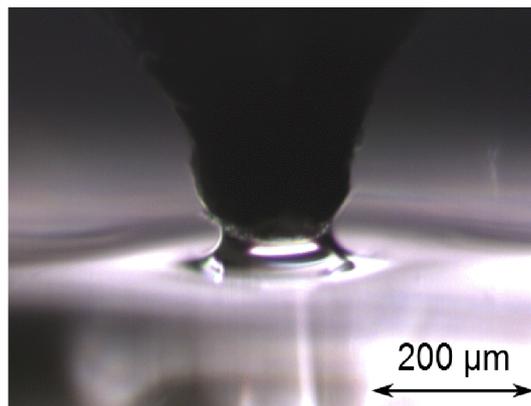


Figure I-4: Ménisque capillaire entre une pointe et une goutte de liquide.

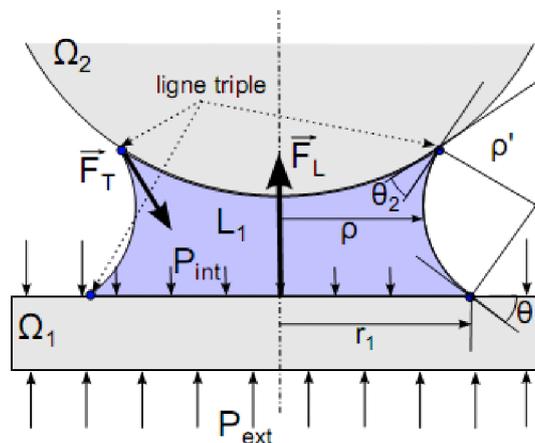


Figure I-5 : Forces exercées par un ménisque capillaire.

La force de Laplace F_L est due à la différence de pression $\Delta P = P_{int} + P_{ext}$ entre l'intérieur et l'extérieur du ménisque qui s'applique sur la surface de l'interface solide/ liquide $A_{SL} = r_1^2$. Cette pression ΔP s'exprime en fonction de la courbure moyenne C du ménisque et de la tension de surface :

$$\Delta P = 2C\gamma \dots \dots \dots (I-12)$$

La force de Laplace s'écrit donc :

$$F_L = \Delta P A_{SL} = \Delta P \pi r_1^2$$

$$F_L = 2\pi r_1^2 \gamma C \dots \dots \dots (I-13)$$

Elle dépend donc de la courbure moyenne du ménisque qui s'exprime en fonction des rayons de courbures principales ρ et ρ' qui sont respectivement dans un plan parallèle et orthogonal au substrat (voir Fig. I-5) :

$$C = \frac{1}{2} \operatorname{div}(\vec{n}) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\rho} + \frac{1}{\rho'} \right) \dots \dots \dots (I-14)$$

La force de tension de surface F_T s'applique uniquement sur la ligne triple. Dans le cas d'un problème axisymétrique, la ligne triple se situe à une distance r_1 du centre du ménisque et la tension à son interface est :

$$F_T = \oint \gamma \sin(\theta_1) ds = 2\pi r_1 \gamma \sin(\theta_1) \dots (I-15)$$

➤ **Forces capillaires en milieu ambiant : eau adsorbée et rayon de Kelvin [5]**

Cette étude se situe dans le contexte de la micromanipulation en milieu ambiant. Dans ces conditions, l'humidité présente dans l'air et l'eau adsorbée par les surfaces suffisent à la formation de ménisques de capillarité. Au cours d'une expérience, M. Luna et al a placé des échantillons en or dans une enceinte à 35%HR³ après les avoir nettoyés à l'aide d'une flamme pour retirer toute trace d'eau de leur surface. Il observe alors une couche d'eau dont la structure est irrégulière et répartie en îlots de 0.2 nm de haut. Cette épaisseur est légèrement supérieure à la taille caractéristique d'une molécule d'eau ; elle correspond donc à une monocouche d'eau adsorbée par la surface d'or. À 65%HR, toute la surface est recouverte d'eau et les molécules sont globalement alignées avec la structure d'or.

L'eau du ménisque ne provient donc pas toujours d'un volume de liquide déposé entre les deux objets. Dans le cas où l'apparition du ménisque est due à l'humidité ambiante, le rayon de courbure ρ' est égal au rayon de Kelvin :

$$r_k = \frac{\gamma V_m}{R_{pg} T \ln(P/P_{vsat})} \dots\dots\dots (I-16)$$

Avec $R_{pg} = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ la constante des gaz parfaits, V_m le volume molaire du liquide ($V_m = 0,018 \text{ L} = \text{mol}$ pour l'eau), T la température et $P/P_{vsat} = H$ la pression relative de vapeur ou humidité relative. La figure I-6 représente le rayon de Kelvin dans le cas de l'eau à 20°C pour lequel il vaut :

$$r_k = 0,3 \cdot 10^{-9} / \ln(H) \dots\dots\dots (I-17)$$

Cette équation n'est plus valable quand la taille du ménisque est du même ordre de grandeur que celle d'une molécule d'eau.

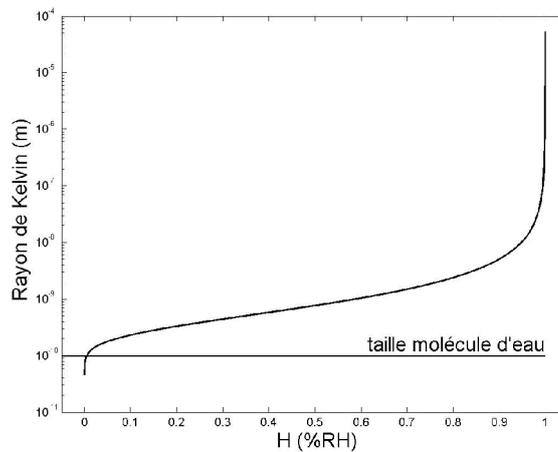


Figure I-6: Dépendance de la taille du rayon de Kelvin à l'humidité ambiante. La ligne horizontale représente la limite en dessous de laquelle le rayon de Kelvin n'a plus de sens physique car il devient plus petit que la taille d'une molécule d'eau.

Les rayons de Kelvin prévus par l'équation (I-16) sont plus petits que la taille d'une molécule d'eau pour les faibles humidités. Or, cette théorie est fondée sur une vision continue du liquide qui constitue le ménisque. Elle n'a pas de sens physique et ne s'applique donc pas dans ces conditions. Au delà de 10 à 20% d'humidité, la quantité d'eau présente

est suffisante pour que le ménisque puisse être considéré comme un milieu continu. La théorie du rayon de Kelvin est alors valide.

Dans le cas où le ménisque est dû à l'humidité ambiante, $\rho' = r_k$ éq. (I-16) donc, la géométrie exacte du ménisque est connue. Par conséquent les forces capillaires peuvent être déterminées. Toutefois, la géométrie du ménisque est fortement dépendante des angles de contact θ_1 et θ_2 . La résolution analytique du problème est complexe et peut être remplacée par une résolution numérique. L'algorithme proposé par P. Lambert cherche à résoudre le problème en supposant que le ménisque passe par un point donné P de la surface du solide Ω_2 (voir Fig. I-7). En faisant l'hypothèse que le ménisque est circulaire, la tangente à la surface en P et l'angle de contact θ_2 donnent la direction de la seconde courbure principale du ménisque ρ' (voir partie gauche de Figure I-7). La distance entre P et le centre de courbure est le rayon de Kelvin r_k . Cette distance est donc calculée à partir d'une mesure de l'humidité ambiante et établit l'emplacement du centre de courbure w' . Il est ainsi possible de reconstruire l'ensemble du ménisque à partir de la connaissance de la position d'un point P de la ligne triple.

Comme illustré sur la partie droite de la figure I-7, si cette position est inconnue, il est possible de la retrouver en balayant le profil du solide Ω_2 avec le point P. Lorsque l'angle formé par le ménisque capillaire et le solide Ω_1 est égal à θ_1 alors le point P est obtenu. Les forces capillaires se déduisent ensuite de la position de ce point et en exploitant les expressions des forces de Laplace équation (I-13) et de tension de surface équation (I-15).

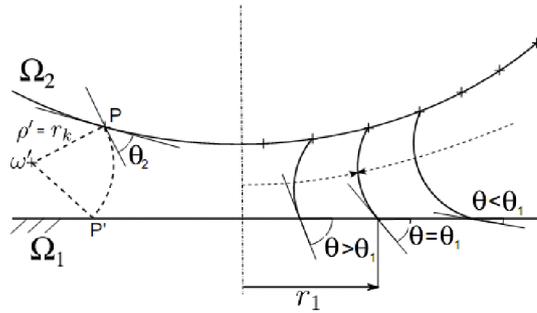


Figure I.7 : Principe de l’algorithme de recherche du ménisque capillaire de P. Lambert. À gauche, le ménisque est construit à partir d’un point P. L’angle de contact θ_2 et l’humidité déterminent la position du centre de courbure ω' . À droite, la position du point P qui satisfait les conditions de l’angle de contact θ_1 est recherchée par itérations successives.

➤ **Calcul simplifié des forces capillaires entre une sphère et un plan [5]**

Le calcul des forces capillaires peut être simplifié en une expression analytique simple dans le cas de ménisques créés par condensation de l’humidité ambiante entre une sphère et un plan. Dans des conditions usuelles d’humidité, le rayon de courbure principale du ménisque $\rho' = r_k$ est de l’ordre de quelques nanomètres (Fig. I-6). Sa valeur est donc négligeable face à celle de l’autre rayon de courbure principale du ménisque ρ . L’algorithme présenté au paragraphe précédent n’est donc plus nécessaire au calcul de la courbure moyenne du ménisque (équation (I-14)) qui peut donc être simplifié.

La différence de pression entre l’intérieur et l’extérieur du ménisque s’exprime alors en fonction de l’humidité à partir de l’équation (I-13) :

$$\Delta P = 2C\gamma = \gamma / r_k \dots \dots \dots (I-18)$$

Le rayon du ménisque capillaire r_1 (défini en figure I-7) doit être calculé pour déterminer les forces capillaires. Comme dans l’algorithme présenté précédemment, ce dernier doit être établi de manière géométrique à partir de la connaissance du rayon de Kelvin r_k , des angles de contact θ_1 et θ_2 et du profil de la sphère. Ce problème précédemment résolu par une méthode numérique peut être simplifié en supposant que proche du contact, l’angle d’inclinaison de la sphère est négligeable devant l’angle de contact θ_2 . Dans le cas d’une sphère non déformée, la surface devient :

$$A_{SL} = \pi r_1^2 = 4\pi R r_k \cos \theta \dots \dots \dots (I-19)$$

La force de Laplace entre une sphère non déformée et un plan est donc :

$$F_L = \Delta P A_{SL} = 4\pi R \gamma \cos \theta \dots \dots \dots (I-20)$$

Cette force peut être comparée avec celle qui s'exerce sur la ligne triple, $F_T = 2\pi r_1 \gamma \sin \theta$ (équation (I-15)). À l'échelle microscopique, le rayon de la sphère est grand devant celui du ménisque. Donc, si l'angle de contact n'est pas proche de $\pm\pi/2$, la force de Laplace est prédominante et les forces capillaires sont alors :

$$F_C = F_L = 4\pi R \gamma \cos \theta \dots \dots \dots (I-21)$$

4.2.3. Forces électrostatiques [5]

➤ Origines des forces électrostatiques

Une force appelée électrostatique résulte de l'action d'une charge A sur une charge B. Suivant le signe de ces charges, de valeur respective q_A et q_B , cette force peut être attractive ou répulsive. La loi de Coulomb (Figure I-8) exprime la force exercée par la charge A sur la charge B en fonction de leur valeur respective et de la distance $r = \|\overline{AB}\|$ qui les sépare :

$$\vec{F}_{A/B} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_R} \frac{q_A q_B}{r^2} \vec{v}_{AB} \dots \dots \dots (I-22)$$

Où $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$ est la permittivité du vide, ϵ_R est la permittivité relative du milieu séparant A et B et \vec{v}_{AB} est le vecteur unitaire parallèle à \overline{AB} .

La force exercée par la charge A sur la B n'est pas influencée par la présence d'autres charges. Le principe de superposition est donc applicable aux forces électrostatiques. Ces forces pourront donc être sommées par paires, de la même manière que les forces de van der Waals. Il convient donc de connaître la distribution de charges dans les objets étudiés pour pouvoir calculer la force qu'ils exercent l'un sur l'autre. Le type de distribution dépend des matériaux : les charges sont réparties en surface des matériaux conducteurs. Alors qu'elles peuvent se déplacer dans une couche plus épaisse dans les matériaux semi-conducteurs. Les charges libres piégées sur des matériaux isolants sont plus complexes à

appréhender. Elles sont localisées aléatoirement dans l'ensemble du volume. La mauvaise circulation des charges empêche l'équilibre des charges avec les objets en contact.

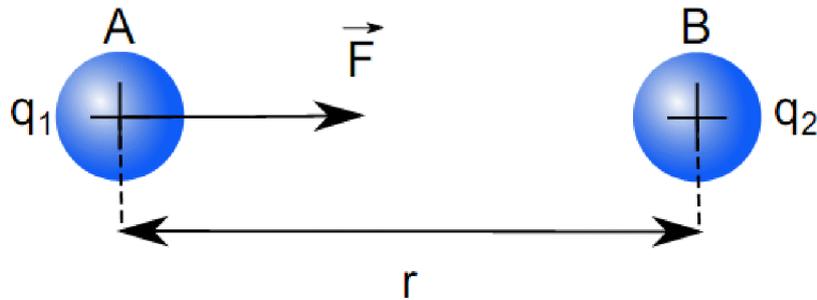


Figure I-8 : Force électrostatique entre deux particules A et B de charge respective q_1 et q_2 séparées par une distance r .

➤ **Cas particulier de la géométrie sphère plan**

Les forces électrostatiques entre une sphère de rayon R et un plan supposé infini, de charges surfaciques respectives σ_2 et σ_1 , peuvent être calculées à partir de l'équation (I-22). Comme pour les forces de van der Waals, le calcul débute par la force F_{p/q_2}^{es} exercée par le plan sur une charge q_2 . Dans la suite du calcul, cette charge est associée à un élément différentiel de surface dS_2 ($q_2 = \sigma_2 dS_2$) et la force correspondante est intégrée sur l'ensemble de la sphère afin d'obtenir la force électrostatique F_{p/q_2}^{es} . En se basant sur les notations de la figure I-9, la force exercée par le plan sur la charge q_2 est égale à :

$$\vec{F}_{p/q_2}^{es} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_R} \int_{S_1} \frac{q_2\sigma_1}{r^2+z^2} \frac{\vec{M}_1\vec{M}_2}{\sqrt{r^2+z^2}} dS_1 \dots \dots \dots (I-23)$$

Cette expression ne dépend pas de la position de la charge q_2 . La force électrostatique exercée par le plan sur la sphère est égale à :

$$F_{sp}^{es} = \frac{2\pi R^2\sigma_1\sigma_2}{\epsilon_0\epsilon_R} \dots \dots \dots (I-24)$$

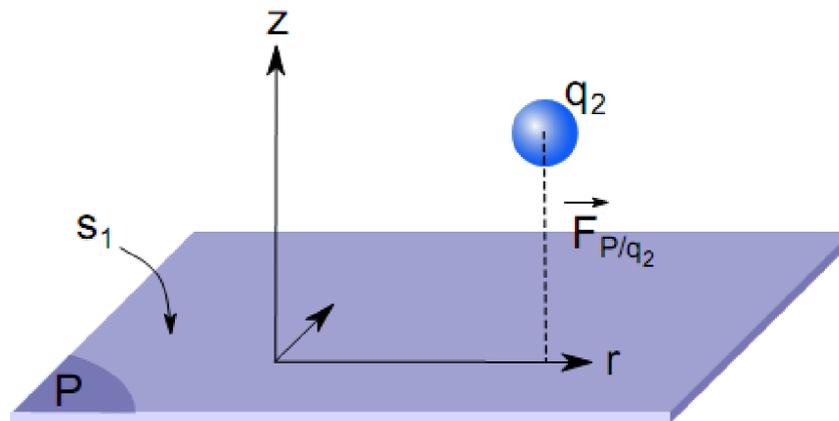


Figure I.9 : Forces électrostatiques entre une particule de charge q_2 et un plan de Charge surfacique σ_1 .

4.3. Développement de la cohésion (prise de la colle)

Après l'assemblage des deux matériaux ou substrats, la colle doit *durcir* ou *sécher*, afin de donner une liaison solide, mécaniquement résistante entre les deux matériaux : c'est le phénomène de *prise de la colle*.

Le mode de prise des colles et adhésifs dépend de leur nature physique et chimique. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour obtenir la prise.

4.4. Adhérence

L'adhérence désigne l'ensemble des forces qui s'exercent entre deux substances en contact étroit et les empêchent de glisser l'une contre l'autre. Ces substances sont généralement deux solides mais l'une d'entre elles peut également être un liquide ou un gaz.

La valeur de l'adhérence se mesure par l'énergie nécessaire pour rompre les liaisons interatomiques ou intermoléculaires qui s'opposent au glissement.

L'adhérence ne doit pas être confondue avec l'adhésion qui désigne les phénomènes physico-chimiques aboutissant à la réalisation des collages.

4.4.1. Origine de l'adhérence

À courte distance, les atomes exercent entre eux une attraction, la force de Van der Waals. Cette force s'oppose au mouvement relatif des surfaces en contact.

4.4.2. Modélisation de l'adhérence

En absence d'adhérence, la force de contact \vec{R} qu'exerce un objet sur l'autre est perpendiculaire à la surface de contact. Du fait de l'adhérence, cette force peut être inclinée par rapport à la normale ; on peut aussi décomposer le vecteur force en un vecteur normal \vec{N} et un vecteur tangentiel \vec{T}

$$\vec{R} = \vec{N} + \vec{T} \dots \dots \dots (I-25)$$

En situation d'adhérence, T peut être non nul.

Si l'intensité de la force tangentielle dépasse une certaine valeur, les surfaces se mettent à glisser l'une par rapport à l'autre ; on quitte le domaine de l'adhérence pour rentrer dans celui du frottement. Cette intensité limite T_{\max} dépend de nombreux facteurs. Le modèle le plus simple est la loi de Coulomb.

Notons que l'on peut prédire l'intensité de la force tangentielle limite, mais la force tangentielle peut prendre une valeur arbitraire, éventuellement nulle, tant qu'elle ne dépasse pas cette valeur. On s'intéresse en général au cas limite

$$\|\vec{T}\| = T_{\max} \dots \dots \dots (I-26)$$

5. Les joints : [1]

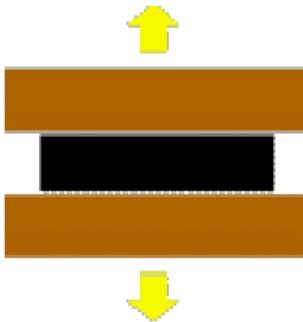


Figure I-10 : Traction

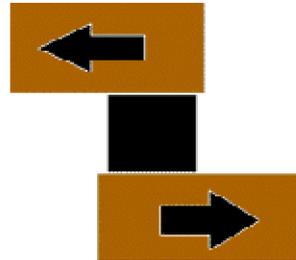


Figure I-11: cisaillement.

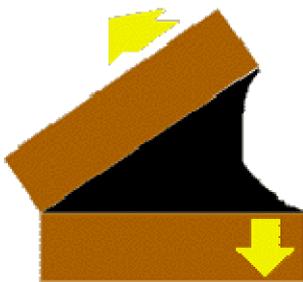


Figure I-12: clivage.

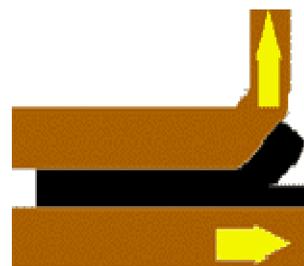


Figure I-13: pelage.

Joint en bout, bord à bord	
Joint à recouvrement simple	
Joint à recouvrement simple biseauté	
Joint biseauté en bout, enture	

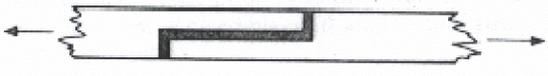
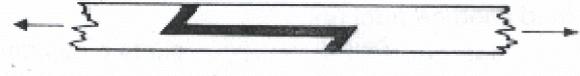
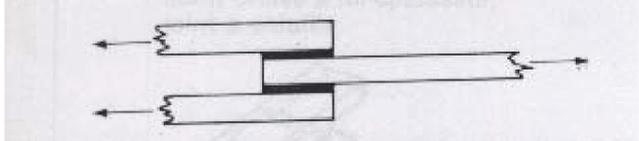
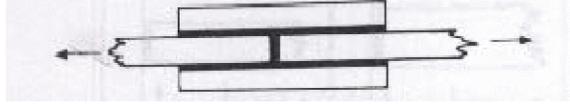
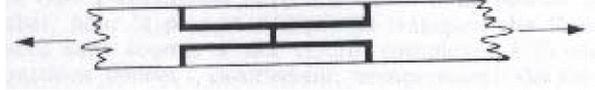
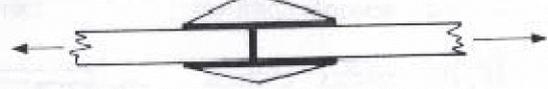
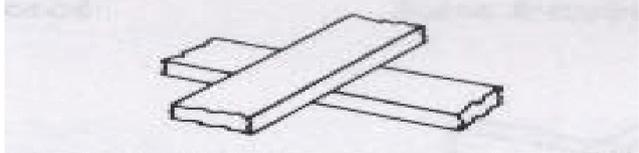
Joint à mi-épaisseur ou recouvrement en gradin	
Joint à double enture	
Joint embrève ou à oreille simple	
Joint à recouvrement avec sertissage	
Joint bord à bord à recouvrement	
Joint à double recouvrement	
Joint bord à bord à double recouvrement Symétrique	
Joint bord à bord à double recouvrement et mi-épaisseur	
Joint en bout, à double recouvrement symétrique biseauté	
Joint en simple recouvrement croisé, joint en croix	

Tableau I-4 : Modes d'assemblage.

6. Principales familles de colles et adhésifs [1]

6.1. Adhésifs époxydes

Ce sont des adhésifs à hautes performances, structuraux dans tous les cas, dont la prise et le durcissement sont réalisés :

- Soit à chaud pour les époxydes mono composant ;
- Soit à température ambiante pour les bicomposants.

➤ Adhésifs époxydes à deux composants

Le durcisseur est ajouté au moment de l'emploi. Il peut être de différents types :

- amines primaires, secondaires, aliphatiques ou aromatiques ;
- polyamides ;
- polysulfures, pour obtenir des adhésifs moins rigides que les époxydes classiques.

➤ Adhésifs époxydes à un composant

L'adhésif est livré en un seul composant qui contient à la fois la résine époxyde et le durcisseur, ce dernier pouvant être :

- une amine primaire, secondaire ou tertiaire ;
- des prépolymères aminés ;
- dicyandiamide, des acides carboxyliques ou anhydrides.

➤ Adhésifs hybrides et renforcés

Ce sont généralement des adhésifs monocomposants :

- époxy-nylon, époxy renforcés au caoutchouc nitrile pour augmenter la flexibilité ;
- époxy-phénoliques dont la résistance à la chaleur peut atteindre 300 °C.

➤ Films

Les adhésifs époxydes peuvent être livrés sous forme de films durcissant à chaud (dans l'industrie aéronautique par

6.2. Adhésifs polyuréthanes réactifs

Les adhésifs polyuréthanes réactifs sont mono- ou bi-composants et font leur prise ou leur durcissement par réaction chimique.

Ils sont généralement à haut extrait sec (ES) ou à 100 % d'extrait sec.

➤ Nature chimique et différents types

Différents types d'adhésifs polyuréthanes réactifs existent :

- **polyuréthane monocomposant** : Polymères à terminaisons isocyanates, à 100 % d'extrait sec, réticulant à l'humidité de l'air ;
- **polyuréthane bicomposant** : Systèmes polyol ou prépolymère hydroxylé + isocyanates ou prépolymère isocyanate. Il y a de nombreuses possibilités de formulation : on peut obtenir à volonté des films de colle souples ou rigides, plus ou moins réticulés, plus ou moins polaires.
- **hot melts** : polyuréthanes monocomposants réagissant à l'humidité.

6.3. Colles thermodurcissables (UF, PF, MF, RF)

Les colles thermodurcissables urée-formol (UF), phénoliques formol (PF), résorcine-formol (RF) et mélamines-formol (MF) se présentent sous forme de sirop ou de poudre. Elles sont utilisées avec adjonction de « durcisseur » et font leur prise par une réaction chimique.

6.4. Adhésifs à base de monomères polymérisables

6.4.1. Adhésifs cyanoacrylates

Ce sont des monomères qui polymérisent en quelques dizaines de secondes à température ambiante lorsqu'ils se trouvent en présence de bases faibles et en très faible épaisseur telle celle d'un joint de colle. La polymérisation est inhibée par des conditions acides.

La vitesse de polymérisation dépend de la nature des matériaux à coller, de leur pH, de la température ambiante, et de l'humidité de l'air qui initie la polymérisation.

6.4.2. Adhésifs anaérobies

Ce sont des monomères acryliques qui durcissent en l'absence d'air, par exemple lorsqu'on les enferme entre deux pièces métalliques en fine épaisseur pour éliminer l'air. Les surfaces métalliques accélèrent la polymérisation.

Ils adhèrent bien sur les métaux, le verre, les céramiques, les plastiques thermodurcissables. La vitesse de prise dépend des matériaux à assembler :

- avec certains plastiques il faut plusieurs heures à froid ou application de chaleur, ou utilisation de primaires ;
- sur les métaux il ne faut que quelques dizaines de minutes.

Plusieurs types d'adhésifs anaérobies sont disponibles :

- grades machines, pour le blocage d'écrous, la fixation de roulements à billes dans leur logement ;
- grades structuraux, qui offrent des résistances au cisaillement élevées sur des surfaces planes.

Ces adhésifs permettent d'élargir les tolérances d'usinage et d'éliminer les rondelles Grower, les écrous autofreinants et les goupilles ou clavettes.

6.5. Adhésifs acryliques structuraux ou acryliques modifiés

Ce sont des produits à deux composants : résine acrylique (par exemple polyméthylméthacrylate greffé sur des élastomères) + durcisseur. Dans certains cas, la résine est appliquée sur l'un des substrats et le durcisseur sur l'autre.

6.6. Adhésifs *hot melts* ou thermofusibles

Ces adhésifs sont à base de matières thermoplastiques solides à la température ambiante.

Pour le collage solide des matériaux visés ici (métaux, bois, plastiques) on doit utiliser uniquement les adhésifs thermofusibles performants suivants :

- polyamides, appliqués en général autour de 200 °C, ils adhèrent bien sur les plastiques, les métaux et le bois et résistent jusqu'à 140 °C environ ; ce sont des adhésifs semi-structuraux ;
- *hot melts* EVA (éthylène-acétate de vinyle) ; ils conviennent pour les collages de plastiques sur bois et panneaux de particules, dans la fabrication de meubles, mais n'adhèrent pas sur les métaux et ont des performances insuffisantes pour le collage des métaux ;
- *hot melts* réactifs à base de polyuréthanes (PU) ou d'époxydes : après application de ces adhésifs, ils sont durcis de diverses façons :
 - soit vers 200 °C dans le cas des adhésifs époxydes, par exemple pour le collage de tôles grasses dans l'automobile,
 - soit par réaction avec l'humidité ambiante dans le cas des *hots melts* polyuréthanes réactifs, qui doivent être livrés dans des conditionnements parfaitement étanches.

6.7. Plastisols PVC

Ce sont des pâtes à base de PVC (polychlorure de vinyle) + plastifiants + résines.

Elles sont appliquées à froid sur l'un des substrats (métaux). On assemble les deux matériaux puis on passe les pièces en étuve entre 150 °C et 180 °C. Il se produit alors une gélification par la pénétration du plastifiant entre les molécules de PVC qui est alors dissout. On obtient par refroidissement une masse plastique, cohésive, adhérant fortement au métal.

Ces plastisols sont essentiellement utilisés en construction automobile pour le collage tôle sur tôle, où le durcissement à chaud se fait en même temps que le durcissement de la peinture de finition en étuve.

Les plastisols PVC sont appliqués le plus souvent en cordons, par extrusion, avec une pompe pneumatique type Graco, Pyles, Kremlin, ou par pulvérisation *airless*.

6.8. Adhésifs élastomères, colles contact au néoprène

Les adhésifs élastomères sont à base d'élastomères divers : [caoutchouc nitrile, caoutchouc styrène-butadiène, les plus connus étant à base de caoutchouc polychloroprène (ou néoprène)] + résines tackifiantes (c'est-à-dire qui procurent la fonction « collante »), en milieu solvanté.

On y adjoint éventuellement un durcisseur isocyanate pour augmenter la résistance à la chaleur et l'adhérence sur le caoutchouc.

Ces adhésifs comportent entre 18 et 26 % d'extrait sec.

6.9. Colles émulsions vinyliques et copolymères

Ce sont des colles blanches en milieu aqueux, dont la prise est réalisée par absorption de leur eau par les substrats poreux, et qui sont constituées de :

- acétates de polyvinyle (PVAC) en émulsion ou copolymères vinyliques, plastifiées ;

- émulsions VAE (acétate de vinyle-éthylène) ;
- charges minérales et additifs divers (épaississants, tackifiants).

7. Mise en œuvre

Les caractéristiques des colles et adhésifs sont liées aux systèmes de mise en œuvre : application et séchage ou durcissement.

Toutes les chaînes de collage comportent cinq ou six étapes :

- préparation éventuelle de surfaces (nettoyage des pièces, préparation mécanique, physique ou chimique...);
- préparation éventuelle de la colle ;
- encollage avec divers systèmes (rouleaux, pistolets, extrusion, buses...);
- assemblage : accostage, formage, pliage éventuel ;
- pressage par divers systèmes (presses à plateaux, à rouleaux, cadreuses, serre-joints...);
- durcissement de la colle par séchage ou « cuisson » (fours ou étuves, air chaud, presse à plateaux chauffants autoclave...);
- enfin évacuation et entreposage des pièces.

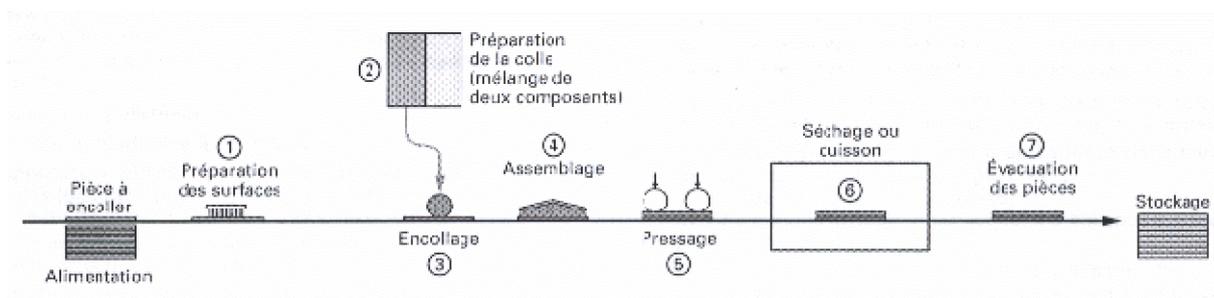


Figure I-14 : Schéma général d'une ligne d'assemblage.

Séquence des opérations de collage	Exigences pour les colles et adhésifs	Caractéristiques de la colle à connaître
Préparation de surfaces	Compatibilité entre l'adhésif et le traitement de surface.	Adhérence sur les surfaces et les matériaux considérés. Exigences vis-à-vis de la préparation des surfaces et des primaires.
Encollage	L'encollage doit se faire : - à la vitesse de la machine ; - de façon régulière ; - avec une quantité de colle adéquate.	Viscosité. Mouillage des matériaux. Consommation. Masse volumique. Stabilité de la colle dans les bacs des encolleurs (stabilité mécanique et thermique)
Transfert des pièces du poste d'encollage au poste d'assemblage	Après encollage, l'adhésif doit rester collant pendant le transfert.	<i>Temps ouvert.</i>
Assemblage (accostage, formage, pliage)	Certaines colles peuvent maintenir les pièces en contact. D'autres colles, à prise plus lente, nécessitent un maintien mécanique.	<i>Tack</i> (ou adhérence immédiate). Consistance ou viscosité. Extrait sec. Temps d'assemblage fermé.
Pressage et durcissement (durée, pression et température)	La colle doit faire sa prise pendant cette durée de pressage et de durcissement	Mode de prise. Vitesse de prise, de séchage. Durée, pression et

		température de durcissement.
Évacuation	Les collages ne doivent pas se relâcher. La colle doit avoir déjà fait une première prise.	Tack et cohésion à chaud de la colle. Vitesse de prise complète.
Stockage	Les assemblages ne doivent pas se décoller.	Performances de la colle (résistance mécanique, résistance à la chaleur, à l'humidité, etc.).

Tableau I-5 : Exigences et caractéristiques des colles selon les opérations de collage à effectuer.

8. Conclusion

Les importants progrès réalisés dans le domaine des adhésifs (terme générique des colles, mastics et revêtement) permettent l'assemblage de la quasi-totalité des matériaux. Les conséquences techniques et économiques font qu'ils sont de plus en plus utilisés dans des secteurs aussi divers que la mécanique, le textile, le bois, les transports, le bâtiment.

C'est dans l'assemblage que l'évolution est la plus spectaculaire car, si le collage se substitue parfois aux moyens traditionnellement employés, il présente l'avantage d'élargir de façon importante le cadre des applications.

Chapitre II

Test d'adhésion

1. Introduction

L'intérêt principal de l'adhésion est de générer une résistance à la rupture. Toute la question est donc de savoir par quels mécanismes et avec quelle efficacité un joint adhésif résiste à la rupture, quel que soit le type de sollicitation subie.

2. Evaluation de l'adhésion [7]

On distingue un certain nombre de tests classiques qui permettent de propager artificiellement une rupture dans un matériau pour mesurer sa résistance.

2.1. Test de résistance au cisaillement

Le test de résistance au cisaillement consiste à coller sur un substrat rigide l'adhésif, préalablement enduit sur un support flexible, et à soumettre le système positionné verticalement à la traction d'une masse constante m . On mesure alors le temps t nécessaire à la rupture de l'assemblage (voir la figure II.1).

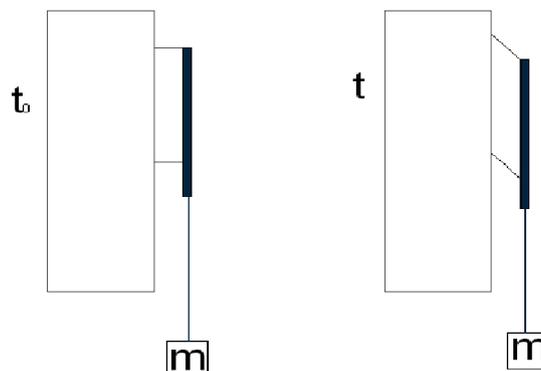


Figure II.1 : test de résistance au cisaillement.

2.2. Test de pelage

Pour mesurer l'efficacité d'un adhésif, il est nécessaire de mettre en place des tests quantitatifs et reproductibles. Un des tests couramment utilisés est appelé le test de pelage.

Il s'agit de tirer sur un adhésif collé à un substrat et de mesurer la force nécessaire au décollage ainsi que l'énergie totale dépensée, appelée énergie d'adhésion.

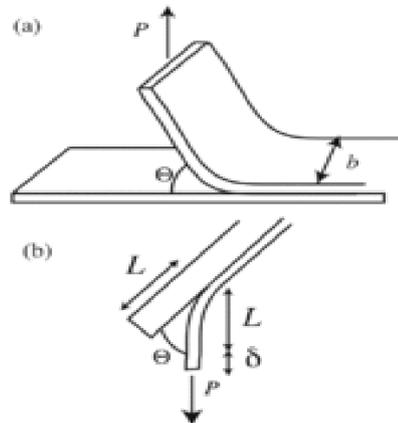


Figure II-2: Schéma d'un test de pelage : principe et notations.

Le test de pelage se caractérise par la mesure d'une force. Cette force, une fois divisée par la largeur b du ruban, est appelée force de pelage.

Ce test est effectué en appliquant un morceau de ruban sur un panneau de test. Ce ruban est ensuite retiré sous un certain angle, appelé angle de pelage. Les panneaux de test peuvent être réalisés dans différents matériaux comme du verre, de l'acier (haute énergie de surface), du HDPE (faible énergie de surface) ou le matériau utilisé dans l'application réelle.

On note θ l'angle de pelage, et b la largeur de l'adhésif.

➤ Exemples d'angle de pelage :

Trois situations de pelage sont couramment utilisées :

- pour un angle θ faible, on décolle le ruban de façon très tendue (force élevée) ;
- pour $\theta=90^\circ$, on réalise une traction perpendiculaire (force modérée) ;
- pour $\theta=180^\circ$, on réalise un essai de traction en retournant l'adhésif. En général, la force est moindre dans ce cas (décollage plus facile).

2.3. Test de tack

Le tack d'un adhésif est défini comme "sa capacité à établir instantanément des interactions d'intensité mesurable avec une surface sous l'effet d'une faible pression de contact.

Par définition donc, les matériaux qui ont du tack sont collants au toucher. Toutes les méthodes permettant de mesurer le tack d'un matériau cherchent donc reproduire de manière quantifiable le test " de pouce " qui est mis en contact avec la surface d'adhésif puis retiré ultérieurement.

Les principales méthodes expérimentales utilisées pour quantifier le tack peuvent être divisées en deux catégories :

Tout d'abord il existe les méthodes qui mesurent une seule valeur caractéristique du tack du matériau et qui permettent la comparaison rapide des différents adhésifs testés. Les paramètres expérimentaux de ces expériences sont raisonnablement reproductibles mais ne peuvent généralement pas être contrôlés de manière indépendante. ces tests sont :

2.3.1. Le tack à la bille

Le plus ancien dans lequel on lâche une bille en acier sur un plan incliné. La bille acquiert de l'énergie cinétique en roulant et arrive sur un pan horizontal recouvert de l'adhésif. La distance parcourue par la bille sur l'adhésif est reliée à son tack : plus la distance parcourue par la bille sera courte, plus l'adhésif aura du tack.

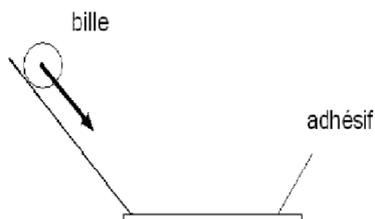


Figure II-3 :tack à la bille.

2.3.2. Le tack à la boucle

Qui permet de mesurer la force maximale à exercer pour séparer une bande adhésive souple mise en contact avec un substrat.

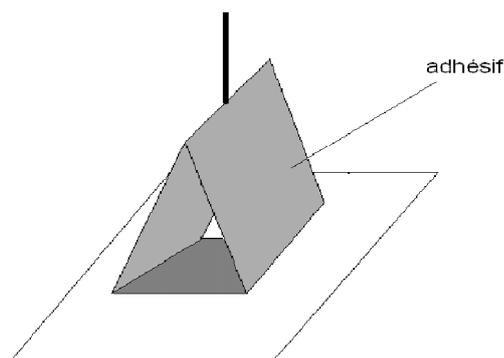


Figure II-4 : le tack à la boucle.

3. Test de probe-tack

3.1. Description du test de " probe-tack " [7]

Le test de probe-tack simule l'étape de formation et de rupture de lien adhésif. Il se déroule généralement en trois étapes :

- **Une étape de compression** : on approche une sonde (indenteur) à une vitesse V_a d'un film mince d'adhésif (typiquement d'une épaisseur de $100\mu m$) jusqu'à ce que celle-ci exerce une force de contact nominale F_c .
- **Une étape de relaxation** : on laisse la sonde en contact avec l'adhésif pendant un temps t_c . Cette étape s'effectue classiquement soit à déplacement constant (le déplacement de la sonde est stoppé lorsque $F = F_c$, la force a tendance à diminuer légèrement par relaxation de l'adhésif), soit à force F_c constante (le déplacement est asservi de sorte à maintenir F_c constante). Ces deux premières étapes visent à établir rapidement le contact entre la sonde et l'adhésif.
- **Une étape de traction** : on éloigne la sonde à vitesse constante V . les différents paramètres V_a, F_c, t_c et V peuvent être variés indépendamment les uns des autres et durant chacune des étapes on mesure l'évolution de la force ainsi que la position de la sonde en fonction du temps.

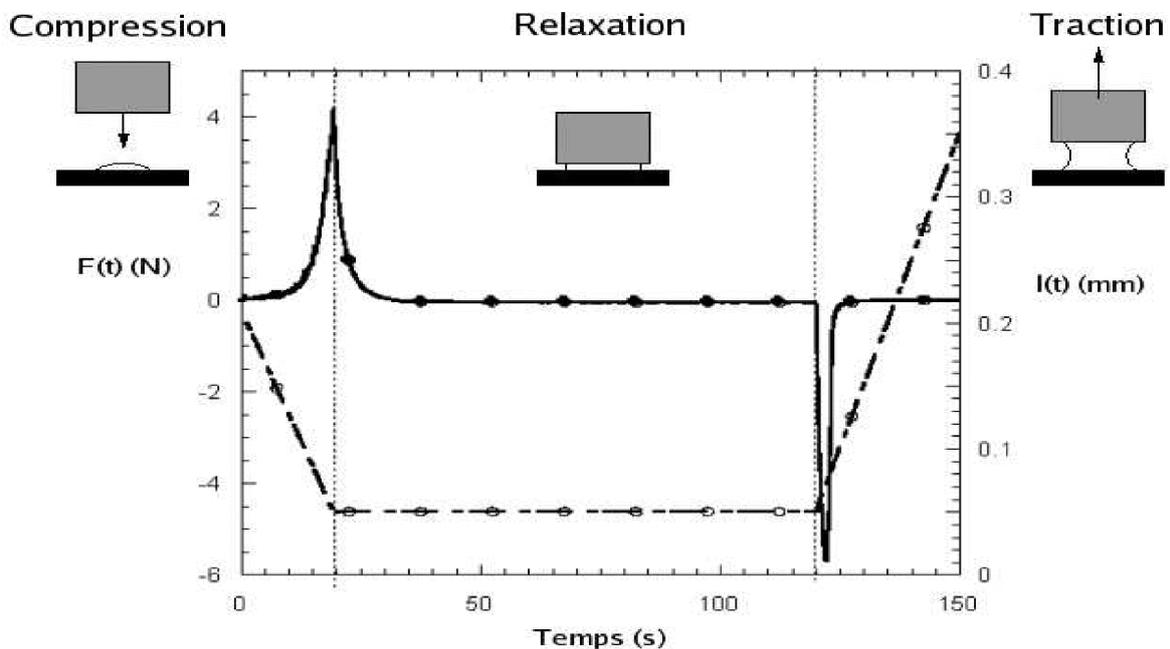


Figure II-5 : courbe expérimentale de tack obtenue durant un test de probe-tack à indenteur plat. On mesure la force et la position de la sonde en fonction de temps.

3.2. Les géométries

Dans un test de "probe-tack", deux géométries sont classiquement disponibles : la portion de la sonde qui est mise en contact avec l'adhésif peut être plane ou sphérique.

Le choix de la géométrie est très important. Il va jouer un rôle sur le parallélisme entre la sonde et le substrat, ainsi que sur le confinement de l'adhésif. Ces paramètres peuvent influencer le type de mécanisme de rupture apparaissant durant la traction.

3.2.1. Sonde sphérique : test JKR [8]

La théorie JKR, des noms de Johnson, Kendall et Roberts, auteurs de l'article correspondant en 1971, est une théorie portant sur le phénomène d'adhésion en physique.

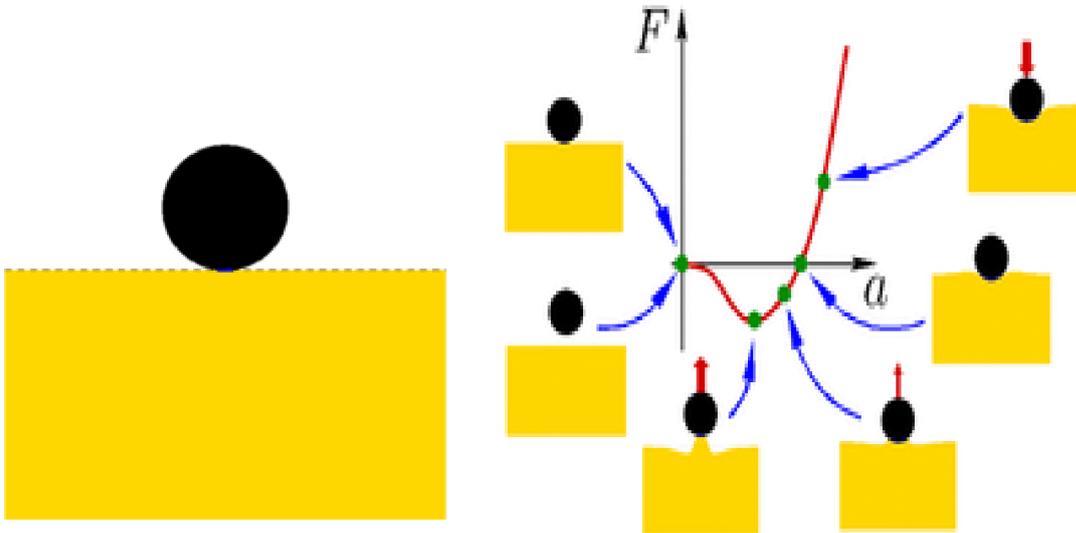


Figure II-6 : test JKR (un seul matériau) Figure II-7 : test JKR (plusieurs matériaux)

Un test d'adhésion qui est aujourd'hui couramment utilisé résulte de ce calcul célèbre. Le principe est de fabriquer une sphère (molle) à partir d'un matériau adhésif à tester. Cette sphère est ensuite appuyée sur un substrat et l'on mesure l'aire de contact en fonction de la force F appliquée à la sphère. Le premier avantage de ce test est que l'on peut tester de nombreux matériaux et en particulier des polymères. En effet, il est très facile de fabriquer

une calotte sphérique parfaite en polymérisant une goutte de polymère fondu. De plus, l'expérience nécessite une très petite quantité de matériau.

3.2.1. Sonde plane [7]

Pour les systèmes mous et très viscoélastiques, le choix d'une sonde plate est préférable. En effet, la répartition des contraintes étant relativement uniforme avec cette géométrie lors de la mise en contact, la déformation du matériau durant la séparation est alors assez homogène et facilite la compréhension des mécanismes complexes mis en jeu durant cette étape. Ceci suppose que le parallélisme entre l'adhésif et la sonde soit parfait, ce qui expérimentalement reste assez délicat à réaliser.

De nombreuses versions de "probe-tack" à indenteur plat existent. La première référencée est le "polycan probe tack" développé par Hammond (1964). Pour ce test la force de contact est contrôlée en posant un poids sur l'adhésif. Diverses améliorations furent apportées.

Zosel notamment, a réussi à contrôler de nombreux paramètres qui ont permis une meilleure compréhension des paramètres des phénomènes relatifs au tack.

Mais ce n'est que récemment que Lakrout et Creton, grâce à un montage optique filament l'adhésif à travers la plaque de verre sur laquelle il est déposé, ont mis évidence les différents mécanismes intervenant lors du découlement.

Une autre technique, le MOTT, Mechanical-Optical tack test, permet quant à elle de relier la courbe de force à l'aire réelle de contact grâce à la réflexion d'un faisceau lumineux à l'interface indenteur / échantillon, l'indenteur utilisé étant transparent.

Enfin, précisons qu'un nouveau type de test a aussi été développé depuis peu : le nanotack test. De manière analogue au test macroscopique de "probe-tack", cette méthode

a permis de mesurer à l'échelle nanométrique les propriétés de tack d'une particule de latex par microscopie de force atomique, la pointe L'AFM servant ici d'indenteur.

3.3. Courbe de tack [9]

Durant l'expérience de tack, l'étape qui intéressera tout particulièrement sera l'étape de traction durant laquelle la force mesurée représente la résistance de l'échantillon à la traction. Nous aurons alors accès, dans les coordonnées brutes de la mesure, à la force due à la traction en fonction de l'épaisseur de l'échantillon.

L'allure de cette courbe de force donne de nombreux renseignements sur l'adhésion de l'adhésif testé.

Les courbes de tack sont souvent représentées en utilisant des paramètres normalisés à savoir la contrainte en fonction du déplacement. La contrainte σ est souvent calculée comme la force F normalisée par l'aire de contact maximale A_{max} atteinte entre l'adhésif et la sonde. Le déplacement est $h_0 - h(t)$ avec h_0 l'épaisseur initiale de l'adhésif.

Cette courbe de contrainte nous donne accès à plusieurs paramètres permettant quantifier les propriétés de tack de l'adhésif.

- La contrainte maximale atteinte σ_{max} ,
- Le déplacement maximal atteint ϵ_{max}
- L'énergie d'adhésion G_{tack} par unité de surface, données par l'intégration de la courbe. Cette énergie représente l'énergie nécessaire à la séparation de l'assemblage adhésif / indenteur.

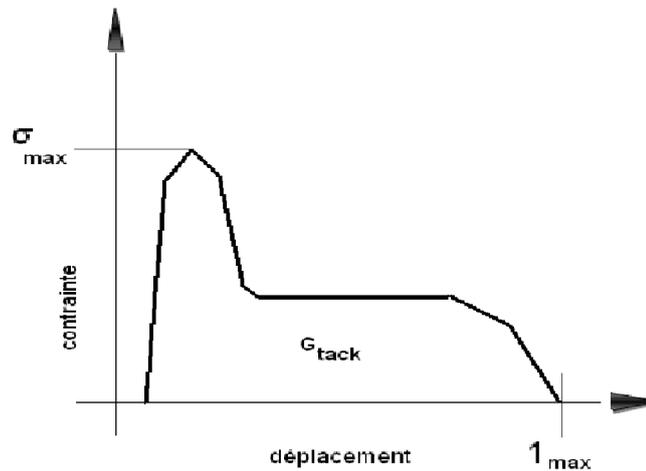


Figure II-8 : courbe de tack et paramètres descriptifs

Enfin, une dernière information importante pour l'adhésion d'un adhésif, non présente dans la mesure de la force de traction, est le type de rupture de l'adhésif. Schématiquement, il existe deux types de rupture possibles :

La rupture de cohésive lorsque la rupture se fait dans la masse de l'adhésif. Il reste alors du matériau des deux côtés : sur la sonde et sur le support.

La rupture adhésive lorsque la rupture se fait à l'une des interfaces. Il reste alors du matériau uniquement sur l'un des côtés : sur la sonde ou sur le support.

Le type de rupture est généralement défini de manière visuelle en regardant s'il reste du polymère sur l'un des interfaces après la rupture.

4. Influence des paramètres expérimentaux sur le tack [7]

L'un des avantages du test de probe-tack est la possibilité de faire varier l'un des paramètres expérimentaux indépendamment des autres. Ainsi, de nombreux paramètres peuvent être changés : la température, la vitesse d'approche, la pression de contact, le temps de contact, la vitesse de traction et les interfaces. Nous allons ici rappeler rapidement l'impact de ces différents paramètres sur l'adhésion.

4.1. Température

La température optimale T_m a été mise en évidence par Zosel. Lorsque $T < T_m$, les faibles valeurs de tack s'expliquent par un module élastique trop important qui inhibe la formation d'un bon contact ainsi qu'une dissipation importante lors de la séparation. La rupture se fera à l'interface propagation de fracture.

Lorsque $T > T_m$, le module élastique devient cette fois-ci trop faible. En effet, la formation de contact

Est assurée mais le matériau manque de cohésion pour résister à de grandes déformations sans rompre dans sa masse.

4.2. Temps et pression de contact

Le temps et la pression de contact sont deux paramètres qui visent à établir un bon contact entre l'adhésif et l'indenteur.

Zosel a étudié l'influence du temps de contact sur l'adhésion. Il a observé que l'énergie d'adhésion augmente avec le temps de contact jusqu'à atteindre un seuil Au-delà duquel elle ne varie plus. Il interprète cette augmentation de l'énergie d'adhésion par une augmentation de l'aire réelle de contact du fait du fluage du matériau.

Plus précisément, des études ont montré par la suite que ce qui importait réellement était le rapport du temps de contact au temps de relaxation de l'adhésif. Ainsi, au cours de la phase de relaxation, l'adhésif relaxe plus ou moins suivant le temps de contact. Lorsque l'aire macroscopique de contact est gardée constante, l'énergie d'adhésion peut donc augmenter grâce à la relaxation du matériau. De plus, une fois que les contraintes ont relaxé dans l'échantillon, le temps de contact n'a plus d'influence sur le tack : l'énergie d'adhésion ne varie plus.

4.3. vitesse de traction

Lakrouit et al introduisent dans le cas de polymères linéaires mono disperses la notion de fréquence efficace, à savoir la fréquence à laquelle est soumis l'échantillon durant la traction, qu'ils définissent par $f_{eff} = V/h_0$ où V est la vitesse de traction et h_0 est l'épaisseur initiale de l'échantillon.

Il semble cependant que le problème soit plus complexe car :

La complaisance de la machine joue un rôle non négligeable sur le déplacement effectif de l'indenteur. La vitesse de traction V évolue donc au cours de la traction.

La déformation du matériau est inhomogène durant l'expérience. Les bords sont plus cisailés et donc plus sollicités que le centre de l'échantillon. La fréquence de sollicitation n'est donc pas homogène dans l'échantillon.

Plusieurs expériences montrent que l'augmentation de la vitesse de traction agit sur les mécanismes de rupture apparaissant durant la traction. Ondarçuhu, Zosel et Lakrouit et al ont remarqué sur les systèmes différents que l'augmentation de la vitesse faisait évoluer la rupture d'un régime de fibrilles tiennent sur longues distances, à un régime de facteurs interfaciales qui décollent rapidement l'échantillon. Dans le même temps la rupture évolue d'une rupture cohésive à une rupture adhésive.

Dernièrement, Poivet et al ont montré que dans un liquide newtonien l'augmentation de la vitesse de traction entraînait une transition entre un régime de digitation et un régime de cavitation. Ils ont de plus corrélié l'impact de la vitesse de traction à la dépression apparaissant dans l'échantillon à cause de l'écoulement et ont pu expliquer ainsi la transition entre ces deux régimes.

4.4. Influence des paramètres de surfaces

Nous avons considéré jusqu'à maintenant uniquement les paramètres de l'expérience (T , t_c , P_c et v) et quelques aspects de la rhéologie du matériau (fluage) plutôt que la chimie ou la rugosité des surfaces pour comprendre le tack des adhésifs.

On sait cependant que ces deux paramètres peuvent jouer un rôle sur le tack d'un adhésif en influençant la surface de contact entre la sonde et l'échantillon et l'évolution des mécanismes de rupture qui apparaissent durant la traction.

Ces effets restent cependant très complexes et ils sont souvent corrélés à l'adhésif utilisé. Il est donc encore difficile de connaître précisément les effets de ces paramètres.

4.4.1. Traitement des plaques

Pour que les interactions avec la surface soient suffisantes, Zesel a montré que les meilleurs résultats sont obtenus sur des substrats ayant une énergie libre de surface de la masse adhésive.

Dernièrement, Crosby et al et Creton et al ont mis en évidence l'importance du terme G_0 appelé taux de restitution de l'énergie qui correspond à l'énergie minimale au-delà de laquelle une fracture peut se propager à l'interface, sur les mécanismes de rupture observés.

4.4.2. Rugosité des plaques ou de l'échantillon

Greenwood et Williamson ont été les premiers à mesurer et à considérer la rugosité d'une surface dure métallique.

Fuller et Tabor ont étudié l'effet de la rugosité sur l'adhésion pour un matériau parfaitement élastique en s'appuyant sur la description Greenwood des surfaces rugueuses.

Puis Creton et Leibler et Hui et al ont calculé pour un matériau viscoélastique comment évoluait l'aire de contact de l'échantillon en fonction de la rugosité, du temps de contact et de la pression de contact. Ils ont alors montré l'impact de l'aire réelle de contact entre l'indenteur et l'échantillon sur l'adhésion et l'échantillon. Ce modèle semble cohérent avec les résultats expérimentaux obtenus par Zsel.

Cependant, le contact n'est jamais parfait et de bulles d'air peuvent être piégées durant l'établissement du contact entre les indenteurs et l'échantillon et jouer ensuite le rôle de ventouses durant la traction renforçant ainsi l'adhésion de l'adhésif.

De même, des expériences réalisées par Hooker et al montrent que la rugosité peut piéger les cavités et favoriser la fibrillation en bloquant la progression des fractures interfaciales.

Plus récemment encore, Chiche et al ont réalisé des expériences avec des indenteurs de rugosité contrôlée et des échantillons rugueux. Ils montrent que la rugosité joue un rôle sur l'apparition et le développement des cavités et sur la forme de la courbe de force.

5. Conclusion

La résistance à la rupture de l'adhésion entre deux objets provient de deux composantes, toutes deux nécessaires pour une bonne adhésion. Ces deux composantes sont : la résistance de l'interface et la résistance du matériau mince.

Chapitre III

différents pégosimètres

1. Introduction

Pour mesurer le tack des matériaux, nous avons eu à notre disposition quatre pégosimètre différents :

- Machine de traction ;
- Pégosimètre ;
- Pégosimètre instrument ;
- Raideuromètre pégosimètre ;

2. Machine de traction

Les machines de traction permettent de caractériser la résistance d'un adhésif au décollement. Ces machines sont constituées d'un poinçon plat mobile dont la position est commandée par un moteur et d'un porte-échantillon fixe, également plat et parallèle au poinçon (géométrie dite de probe-tack). Le poinçon plat comprime l'échantillon jusqu'à ce qu'une épaisseur de 50 à 100 micromètres soit atteinte. Le poinçon est laissé au contact de l'échantillon pendant un temps défini, puis déplacé soit à vitesse constante, soit à force constante. Un capteur de force permet de déterminer la force appliquée. Les machines de traction commerciales permettent l'acquisition synchrone de la force subie par l'échantillon et du déplacement de la partie mobile de la machine au cours du temps.



Figure III-1 : machine de traction

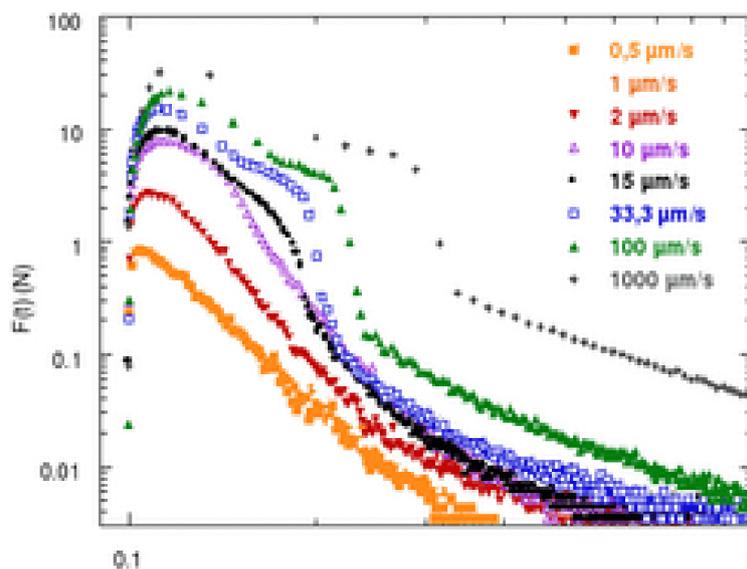


Figure III-2 : Force subie en fonction du déplacement (de 100 micromètres à 1 mm) lors d'une traction à vitesse constante, pour différentes vitesses variant de $0,5 \mu\text{m/s}$ à 1 mm/s , par un film d'huile de silicones très visqueuse.

3. Pégosimètre



Figure III-3 : Pégosimètre (Cet appareil a été réalisé au Centre de Recherche Paul Pascal à Bordeaux)

3.1. Principe de fonctionnement

Cet appareil permet de mesurer les efforts nécessaires pour décoller un adhésif mou déposé sur une surface. Le principe repose sur la mise en contact d'un poinçon plat avec l'adhésif en appliquant un effort connu durant un temps (temps de contact). On relève ensuite le poinçon à vitesse de déplacement constante. Durant cette dernière étape, on enregistre l'évolution de la force en fonction de la position du poinçon. Il est aussi possible de visualiser en temps réel l'interface adhésif – substrat grâce à une caméra rapide montée sur le système.

3.2. Mesure et informations recueillies

Les informations récupérées sont de deux ordres. D'une part, on mesure la force d'adhésion en fonction de la déformation de la couche adhésive et d'autre part, on peut visualiser en temps réel le type de décollement. Ces deux informations sont incontournables pour évaluer et comprendre le comportement des adhésifs mous.

3.3. Equipements

Une caméra rapide permet l'acquisition des images.

3.4. Exemples d'utilisation dans le cadre nos activités

On peut citer deux exemples actuels de l'utilisation de ce type de matériel : Évaluation des propriétés de surfaces de polycarbonate modifiées par traitement plasma. Evaluation des propriétés d'adhérence de polymères modèles ayant des propriétés. Particulières aux grandes déformations

4. Pégosimètre instrumentés

Au laboratoire, nous sommes équipés de machines de traction dotées de capacités supplémentaires, baptisées « Pégosimètre instrumentés ». En plus des données mécaniques, ces appareils permettent d'enregistrer de façon synchrone et simultanée des paramètres optiques, acoustiques et structuraux dans des conditions de pression, humidité relative et température variables. Cela permet de mieux appréhender le comportement de l'adhésif et d'imaginer les modifications à apporter pour l'améliorer. Ces appareils ont été entièrement conçus et réalisés au CRPP avec le concours de la cellule d'instrumentation interne au laboratoire.

4.1. Pégosimètre à prisme

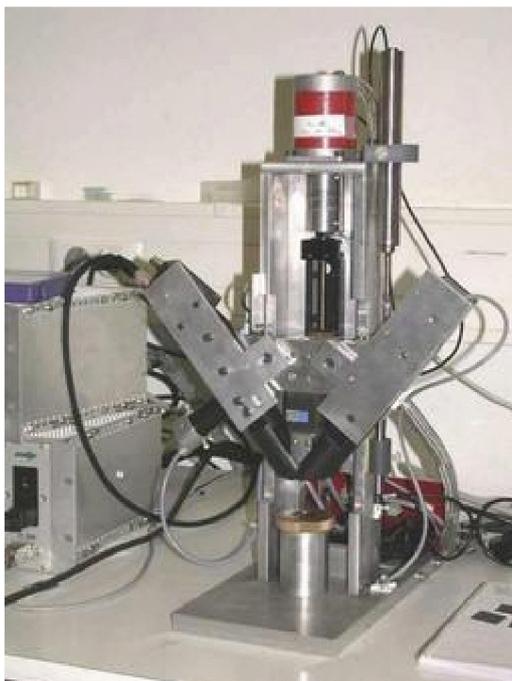


Figure III-4 : Pégosimètre à prisme

Le premier appareil est une machine de traction dont le poinçon mobile est un prisme de verre à réflexion totale. Les données supplémentaires recueillies sont des images de l'interface adhésif/ verre. La surface de verre pouvant venir au contact du matériau collant est rectangulaire, de dimensions $10 \times 15 \text{ mm}^2$. Lorsque toute la surface de l'interface est en contact avec le verre, la lumière n'est pas réfléchi, l'image obtenue est totalement noire. Au fur et à mesure de l'expérience, l'adhésif se détache du verre par endroits en formant, par exemple, des cavités. La lumière est alors réfléchi et ces régions apparaissent blanches à l'image. Une caméra filme la partie centrale du champ et permet de localiser, avec une résolution spatiale de l'ordre de $50 \mu\text{m}$, les zones de l'interface où l'échantillon s'est détaché du verre à chaque instant de l'expérience de traction. La figure ci-dessous montre un exemple de données, sur une huile de silicones très visqueuse, où la traction engendre des phénomènes de cavitation. De plus, cet instrument peut être utilisé dans un caisson étanche pressurisé sur une gamme de pressions s'étendant de 0,4 à 1 fois la pression

atmosphérique. Une expérience menée en caisson étanche a permis d'établir la contribution de l'effet ventouse dû aux cavités apparaissant dans les adhésifs.

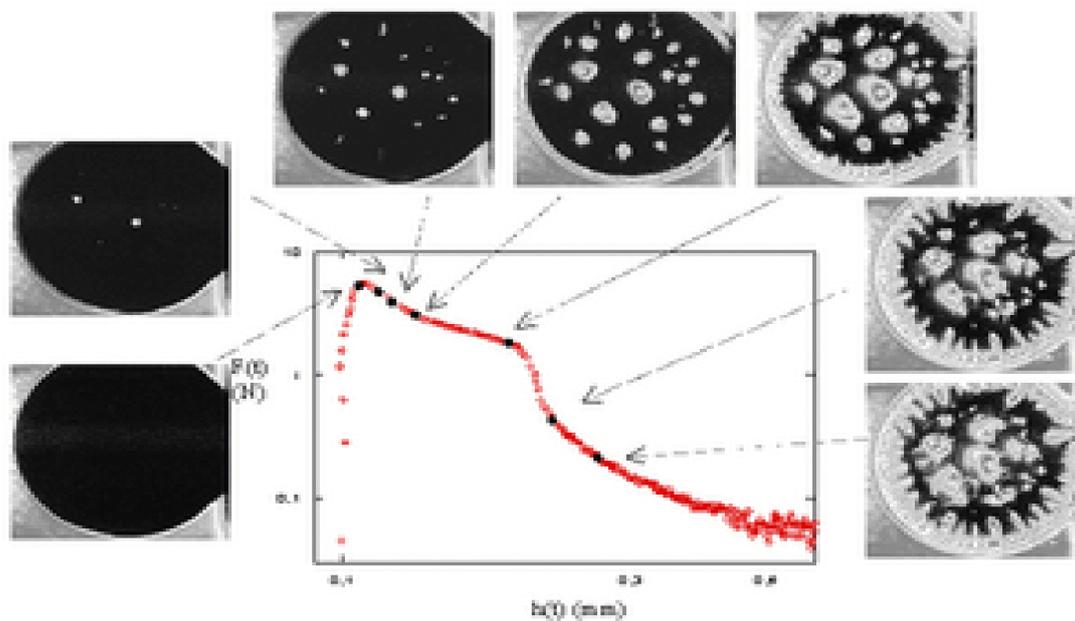


Figure III-5 : Force de traction en fonction du déplacement et image de la cavitation déclenchée, observée sur le pégosimètre à prisme.

4.2. Pégosimètre multifonction



Figure III-6 : Pégosimètre multifonction

Le second appareil est une machine de traction à poinçon plat métallique, mais où l'échantillon est déposé sur une plaque de verre (diamètre 18 mm, épaisseur 5 mm). L'appareil est équipé d'une caméra rapide qui permet d'acquérir jusqu'à 1000 images par seconde dans le volume de l'échantillon au cours de la traction. Les dimensions du champ d'observation sont comparables à celles accessibles avec le pégosimètre à prisme. Cette machine est également équipée d'un microphone, ce qui permet d'enregistrer le signal sonore éventuellement émis par l'échantillon au cours de la traction. Les expériences menées sur cet instrument ont permis de comprendre les mécanismes se déroulant à la fin de la rupture de l'adhésif. Un exemple de données, sur une huile de silicones, est présenté ci-dessous.

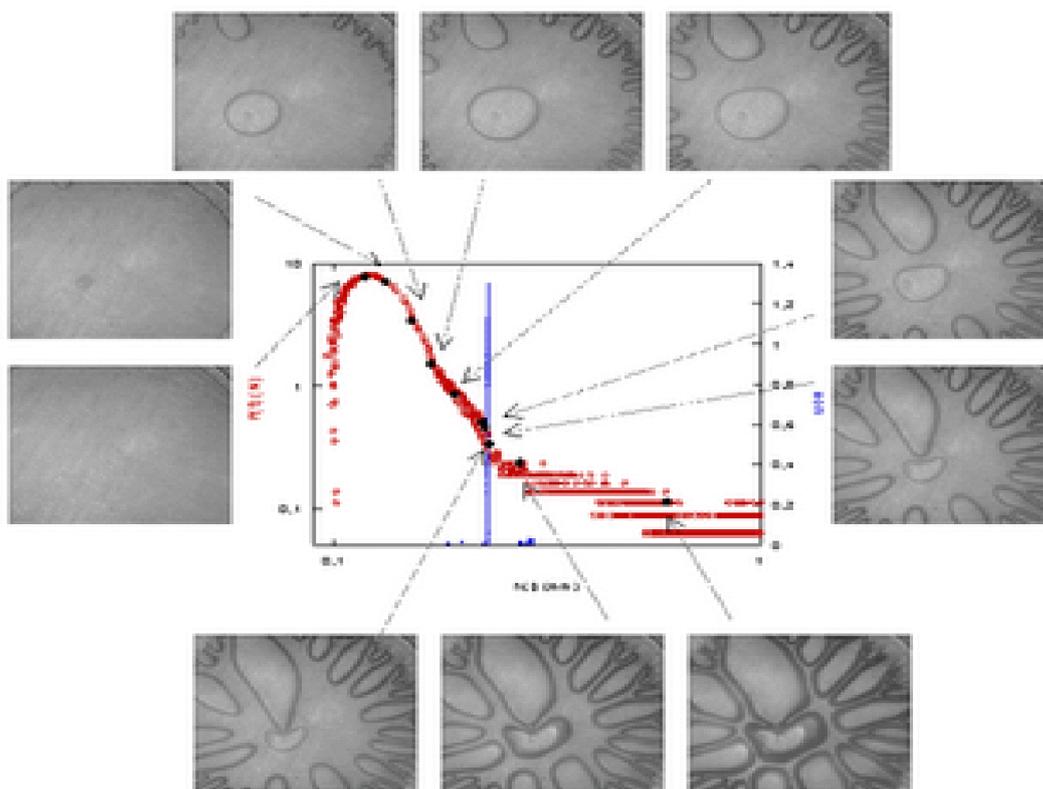


Figure III-7 : Force de traction, images de cavitation et digitation observées et enregistrement sonore sur le Pégosimètre multifonction.

La cavité centrale, presque vide, est brutalement remplie d'air par l'un des doigts d'air périphériques. Le brusque mouvement d'air crée un son (pop), indiqué par le pic du signal sonore.

Cet instrument peut également être monté sur une expérience de diffusion du rayonnement (lumière ou rayons X), en vue de corrélérer l'organisation interne de l'échantillon à petite échelle à ses propriétés mécaniques en traction.

4.3. Utilisation

Ces instruments ont notamment permis d'obtenir de nombreux résultats scientifiques qui sont référencés sur le site du laboratoire.

Ces techniques permettent de comprendre les mécanismes qui contrôlent l'adhésion et notamment comment et à quel moment intervient la rupture de l'adhésif (ex : rupture cohésive ou adhésive). Il est ainsi possible d'optimiser les caractéristiques techniques des matériaux adhésifs et donc, d'augmenter leurs performances en fonction des conditions d'utilisation : forte adhésion à température ambiante ou en milieu faiblement humide, résistant aux basses pressions ...

4.4. Caractéristiques techniques

Appareils	Pégosimètre commercial	Pégosimètre à prisme	Pégosimètre multifonction
Fonctions	Mesure de la force et du déplacement de la partie mobile en fonction du temps	Mesure de la force et du déplacement de la partie mobile en fonction du temps Observation de l'interface verre/adhésif	Mesure de la force et du déplacement de la partie mobile en fonction du temps Observation de l'adhésif dans tout son

			volume Enregistrement sonore
Fréquence d'acquisition des données mécaniques	50 Hz	10-1000 Hz	10-1000 Hz
Gamme de vitesse	0-13 mm/s	0,01-10 mm/s	0,01-10mm/s
Capteur de force	10N, 100N et 1000N	10N, 100N et 1000N	10N, 100N et 1000N
Précision relative sur la gamme de force	$\pm 3 \cdot 10^{-5}$ N	$\pm 10^{-5}$ N	$\pm 10^{-5}$ N
Précision sur le déplacement de la partie mobile	$\pm 1 \mu\text{m}$	$\pm 1 \mu\text{m}$	$\pm 1 \mu\text{m}$
Caractéristiques du poinçon plat	Cylindre de surface plane en verre (d = 1,6 cm)	Prisme plat en verre (1,5×1,0 cm)	Cylindre de surface plane en inox (d = 1,2 cm)
Caractéristiques du porte-échantillon	Plaque plate en aluminium anodisé (25×25×1 mm)	Plaque plate en aluminium anodisé (25×25×1 mm)	Cylindre de surface plane en verre d'épaisseur 5 mm et de diamètre 1,8 cm
Caméra	Aucune	CCD 25 images/s Résolution : $\pm 100 \mu\text{m}$	Rapide 50-500 images/s Résolution : $\pm 100 \mu\text{m}$

Tableau III-1 : caractéristique technique.

5. Raideuromètre Pégosimètre



Figure III-8: Le raideuromètre pégosimètre

Le raideuromètre Pégosimètre est constitué mécaniquement d'un capteur de force interchangeable de haute sensibilité. Ce capteur est fixé sur un actionneur vertical micrométrique monté sur une structure anti vibration.

L'ensemble du système est contrôlé par un PC industriel permettant de réaliser plusieurs types de mesures en fonction des capteurs et des actionneurs en place sur la structure mécanique de base.

Suivant le type d'indenteur équipant le capteur de force, il est aussi possible

- de quantifier la raideur superficielle d'un matériau ou d'un élément mécanique soumis à une sollicitation orthogonale à sa surface,
- de mesurer le collant ou l'adhésion d'un matériau sur un indenteur.

Un équipement adapté permet de maîtriser la température ambiante.

La mesure de la raideur de la pégosité permet ainsi de caractériser :

- les propriétés élastiques et viscoélastiques des matériaux élastiques et viscoélastiques.
- Les propriétés d'adhésion des cylindres dépoussiéreurs.
- La métrologie du toucher orthogonal dans l'analyse sensorielle du contact tactile en termes de dureté et collant.
- La métrologie d'éléments déformables tels que ressorts, membrane de clavier.
- Test de probe tack.

6. Conclusion

Quel que soit le montage, la géométrie utilisée est celle du probe-tack à indenteur plat. Le dispositif est constitué de deux surfaces rigides, planes et parallèles : un indenteur et une plaque sur laquelle le matériau est déposé. Alors que la plaque support du matériau est immobile, un moteur permet le déplacement vertical de l'indenteur. Ce dernière est relié à un capteur de force fixé à une traverse mobile qui se déplace verticalement à une vitesse choisie par l'opérateur. Le capteur de force ainsi qu'un capteur de position nous donnent accès à chaque instant à la force et à la position de la traverse.

Chapitre IV

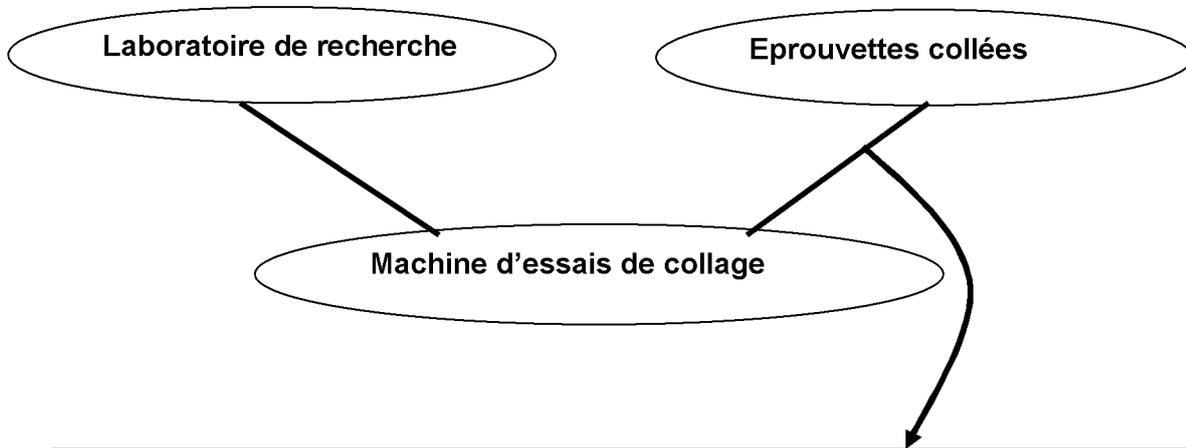
**Cahier de charge de
machine d'essais de collage**

1. Enoncé du besoin

1.1. Diagramme du besoin selon le point de vue de laboratoire

A qui (quoi) rend-il service ?

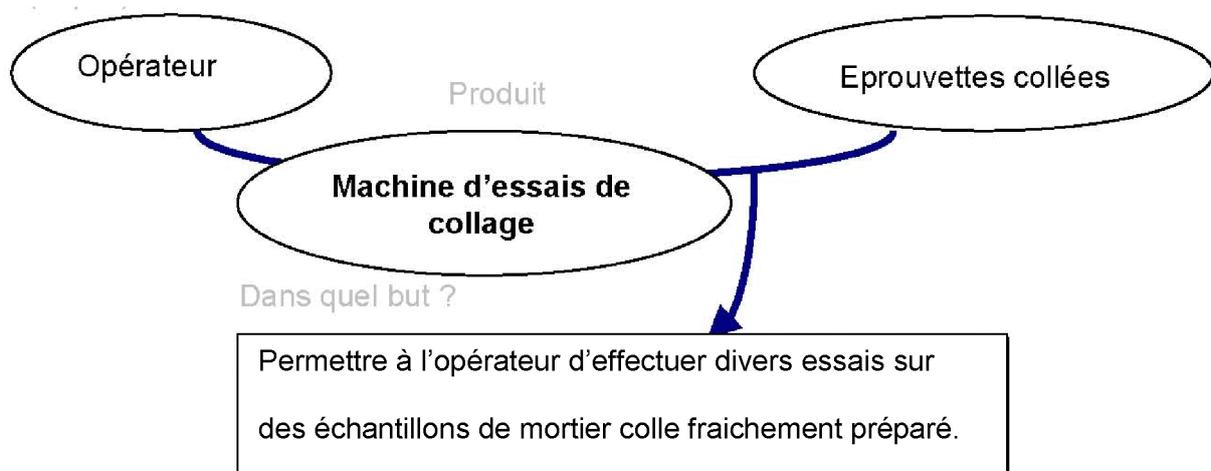
Sur qui (quoi) agit-il ?



Permettre au laboratoire de recherche de réaliser des essais sur des mortiers colles afin de :

- Etudier les caractéristiques d'adhésion, de cohésion et d'adhérence des mortiers colles.
- Etudier l'influence des différents additifs sur les caractéristiques de collage.
- Obtenir les résultats des essais plus rapidement.

1.2. Diagramme du besoin selon le point de vue de l'utilisateur



Permettre à l'opérateur d'effectuer divers essais sur des échantillons de mortier colle fraîchement préparé.

2. Validation du besoin

Pourquoi ce besoin existe-t-il ?

Dans quel but ?

- Obtenir la valeur de l'effort maximal conduisant à la rupture du joint de colle.
- Obtenir l'énergie d'arrachement.
- Obtenir les caractéristiques d'adhésion, de cohésion et d'adhérence des mortiers colles.

Pour quelle raisons ?

- Permettre de réaliser des essais sur le site et dans le laboratoire.
- Les machines de traction du marché sont d'un coût très élevé. Le laboratoire souhaite donc en réaliser une moins coûteuse et adaptée à ses besoins.

Qu'est-ce qui pourrait faire disparaître le besoin ?

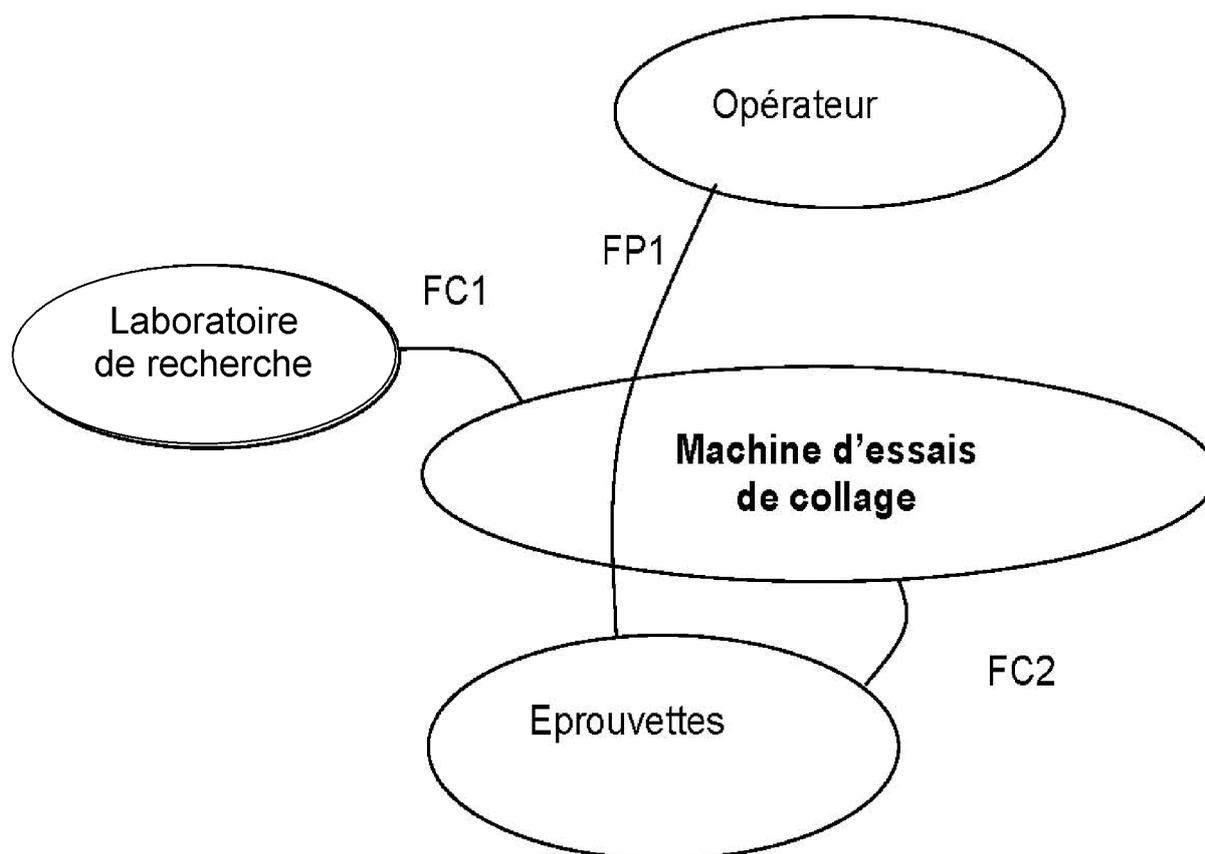
- Un sous traitant qui réalise les essais, dans un délai plus court.
- (2) Une entreprise qui commercialise un banc de traction à faible coût.

Conclusion

Le besoin est validé au moins à moyen terme.

3. Recherche des fonctions de service

3.1. Diagramme d'environnement



FP1 : Permettre à l'opérateur de réaliser différents essais sur les mortiers colles et obtenir les résultats des mesures représentatifs.

FC1 : Etre intégrable au laboratoire de recherche.

FC2 : Doit maintenir et s'adapter facilement aux différents types de matériaux (Colles, PSA,....etc.).

3.2. Validation des fonctions de service

FP1 : Permettre à l'opérateur de réaliser différents essais sur les mortiers colles et obtenir les résultats représentatifs.	
Dans quel but la fonction existe-t-elle ?	Connaître les valeurs de l'effort d'arrachement des joints de colle.
Pour quelle raison la fonction existe-t-elle ?	Caractérisation des colles
Qu'es-ce qui pourrait la faire disparaître ?	Rien

FC1 : Etre intégrable au laboratoire de recherche.	
Dans quel but la fonction existe-t-elle ?	Implanter la machine dans le laboratoire
Pour quelle raison la fonction existe-t-elle ?	• Utilisation aisée • Centralisation des essais dans un seul lieu
Qu'es-ce qui pourrait la faire disparaître ?	Changement du lieu du laboratoire d'analyse
FC2 : Doit maintenir et s'adapter facilement aux différents types de matériaux.	
Dans quel but la fonction existe-t-elle ?	Pour effectuer des tests rapides
Pour quelle raison la fonction existe-t-elle ?	Pour être manipuler rapidement
Qu'es-ce qui pourrait la faire disparaître ?	-

Tableau IV.1 : Validation des fonctions de service.

3.3. Conclusion

Les fonctions de services sont stables et validées.

4. Cahier des charges fonctionnel :

Fonctions	Critères	Niveaux	Flexibilité
FP1 : Permettre à l'opérateur de réaliser différents essais sur les éprouvettes de collage et obtenir les résultats des mesures conformément aux normes.	Valeur de l'effort maximal	50 N	
	Précision de la mesure de l'effort de rupture		Entre 0,1 et 0,2% de l'étendue de mesure.
	Vitesse d'écartement des mors constante au cours des essais.		V max = 1000 mm/min
	Vitesse d'écartement des mors constante au cours des essais.		± 0.2 mm
	Dimensions des éprouvettes structurales (en mm)	Diamètre de 40 mm et une épaisseur de 5mm	± 0.2 mm
FC1 : Etre intégrable au laboratoire de recherche.	Encombrement maximal : Base : Hauteur :		500 mm maxi x 500 mm maxi 700 mm maxi
FC2 : Doit maintenir et s'adapter facilement aux différents types de matériaux.	Temps maxi de changement des mors. (géométrie plan, sphérique)		5 min maxi

Tableau IV-2 : Cahier des charges fonctionnel.

5. Contraintes

Coût global maximum : 100000 DA TTC. Energie électrique disponible : 220V/380V

Respecter les normes

- Sécurité des machines
- Détermination de la résistance au pelage des matériaux à forte cohésion.

- Détermination des propriétés en traction. Principes généraux.
- Détermination des propriétés en traction. Conditions d'essai pour les composites plastiques renforcés de fibres isotropes et orthotropes.
- Détermination des propriétés en traction -Partie 5 : Conditions d'essai pour les composites plastiques renforcés de fibres unidirectionnelles.
- Vérification des machines pour essais statiques uni axiaux.
- Alignement des mors : Le plan médian de fixation du mors mobile aligné avec le plan médian du mors fixe avec un décalage maxi de ± 0.25 mm.
- La force enregistrée doit être comprise entre 10 et 80% de la capacité de la machine.

Chapitre V

Machine d'essais de collage

1. Introduction

L'objectif de ce travail est la conception d'une machine de traction, compression permettant d'effectuer de test d'adhésion.

Ce dispositif doit nous permettre d'effectuer de test d'arrachement à faible et à grande vitesse.

Le résultat final est l'enregistrent de la valeur de l'effort en cadran, soit du temps, soit du déplacement.

A partir de la valeur de l'effort, on peut remonter aux caractéristiques de l'adhésion ou l'adhérence.

2. Description du principe de fonctionnement

L'appareillage est constitué d'une base, sur laquelle est fixée la colonne et le mors inférieur. Parallèlement et à l'extrémité de la colonne on trouve la tête. Cette dernière abrite le motoréducteur, par l'intermédiaire de l'accouplement on transmet le mouvement rotatif de moteur à la vis à bille qui permet de transformer le mouvement de rotation en un mouvement de translation.

Le contrôle de la vitesse de déplacement du mors supérieur, est assuré par le motoréducteur, la mesure de l'effort d'arrachement se fait par un capteur de force fixé sur le mors supérieur.

L'échantillon à testé, est déposé sur un support de matériau, lui-même fixé sur le mors inférieur.

2.1. Schéma cinématique

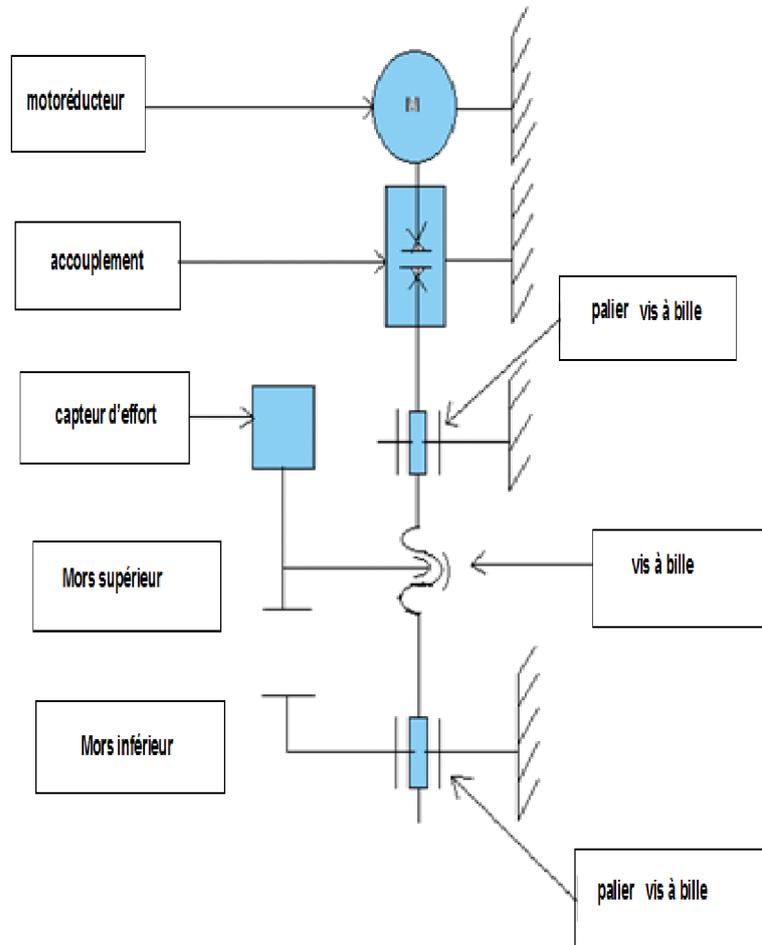


Figure V-1 : Schéma cinématique.

2.1. Elément constitutif de dispositif

2.1.1. Le motoréducteur

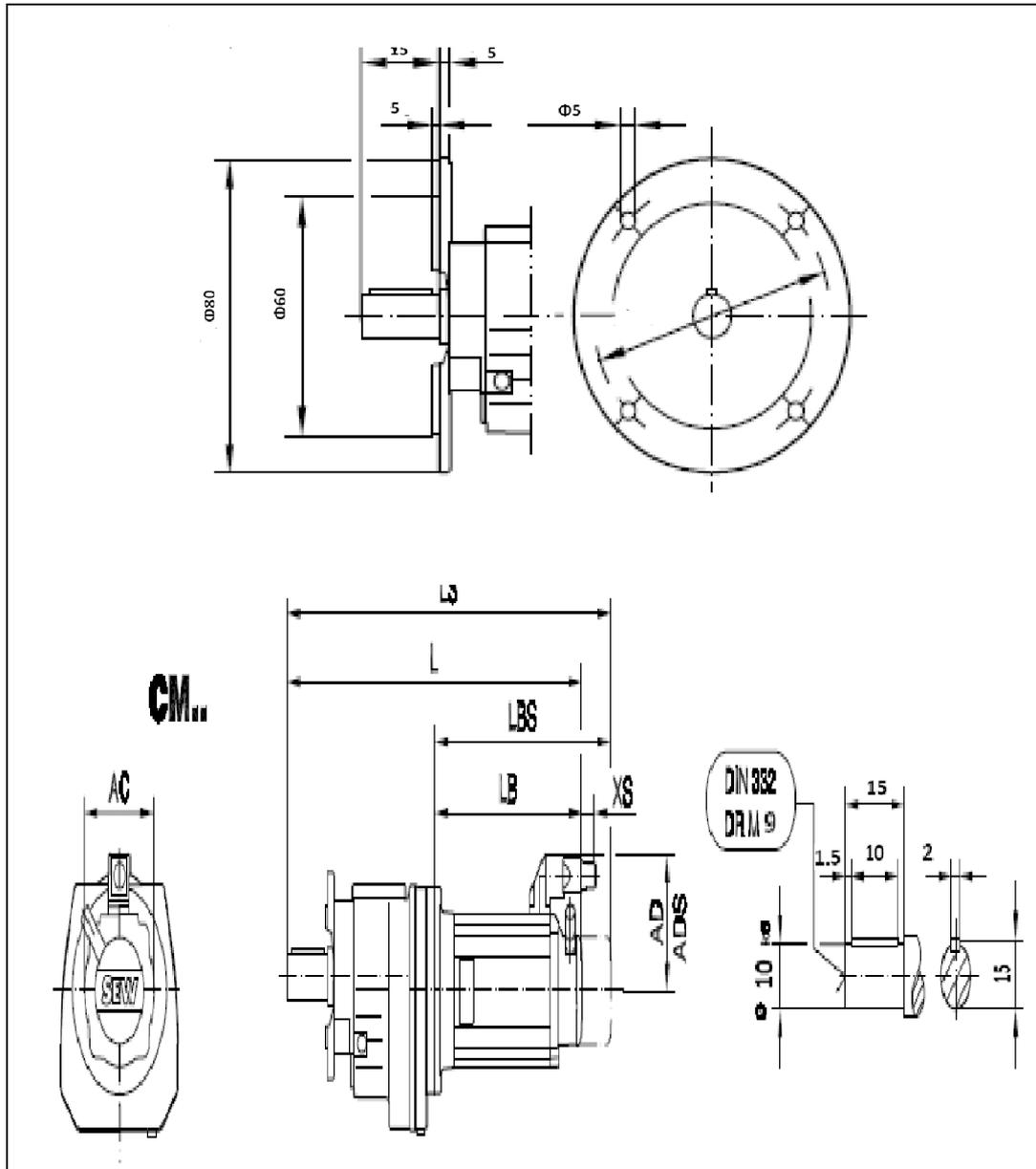


Figure V-2 : Motoréducteur

2.1.2. L'accouplement [10]

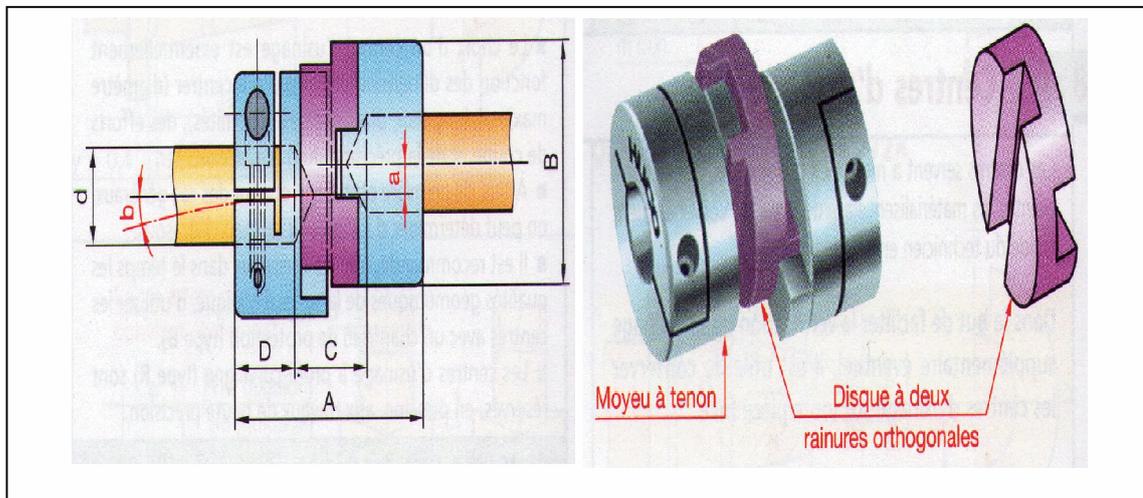


Figure V-3 : L'accouplement (joints d'Oldham).

Taille	A	B	C	D	d	T^{**}	a	b
						max.	max.	max.
25	28. 4	25. 4	11. 2	8.6	6 8 10	2.43	5	1°

Tableau V-1 : Les dimensions de l'accouplement.

2.1.3. La vis à bille et son palier [10]

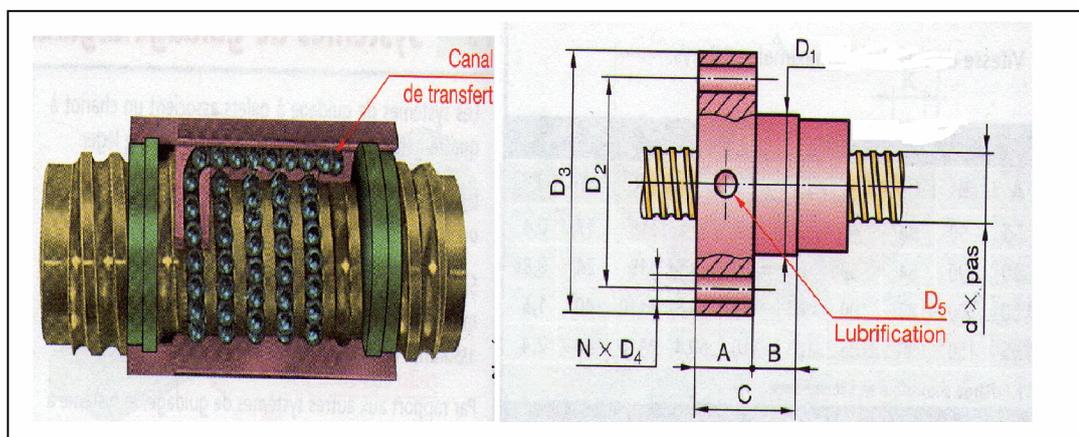


Figure V-4 : La vis à bille.

d	A	B	C	D1	D2	D3	n
$\times pas$							$\times d4$
10	8	8	16	16	23	30	6
$\times 2$							$\times 3.4$

Tableau V-2 : Les dimensions de la vis à bille.

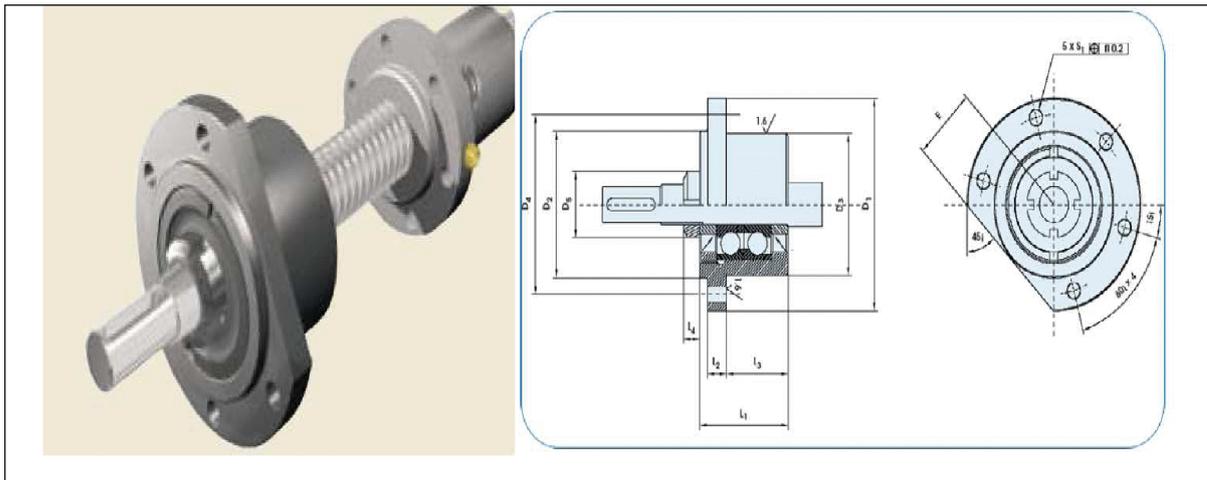


Figure V-5 : Palier vis à bille.

Taille	L1	L2	L3	L4	D1	D2	D3	D4	D5	S1	Vis de fixation	E
d0							h7					
8	20	5	13	5	24	12	12	18	10	4.5	M4	8

Tableau V-3 : Les dimensions de palier vis à bille.

2.1.4. Le capteur d'effort



Figure V-6 : Image de capteur de force.

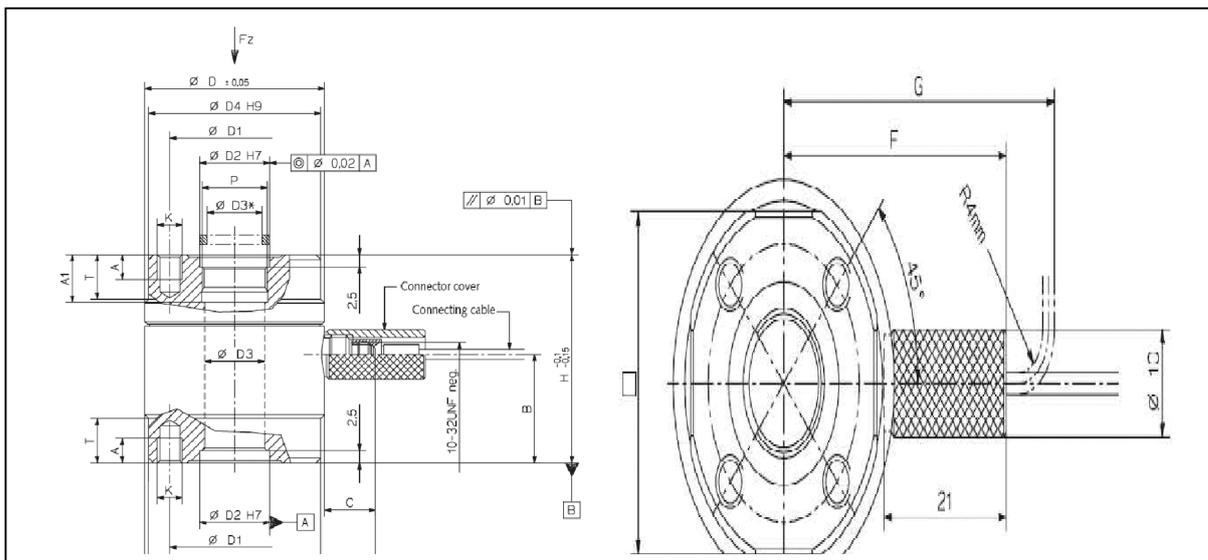


Figure V-7 : Dessin de définition de capteur de force.

Type	D	D1	D2	D3	D3*	D4	H	A	A1	B	C	⊗	E	F	G	K	P	T
9333	30	21	10	8	8	28,5	34	4	7	16,6	10,1	26	40,1	36	43,5	M4	M9x0, 5	8

Tableau V-4 : Les dimensions de capteur de force.

3. Les composants de machine d'essais de collage

➤ La base

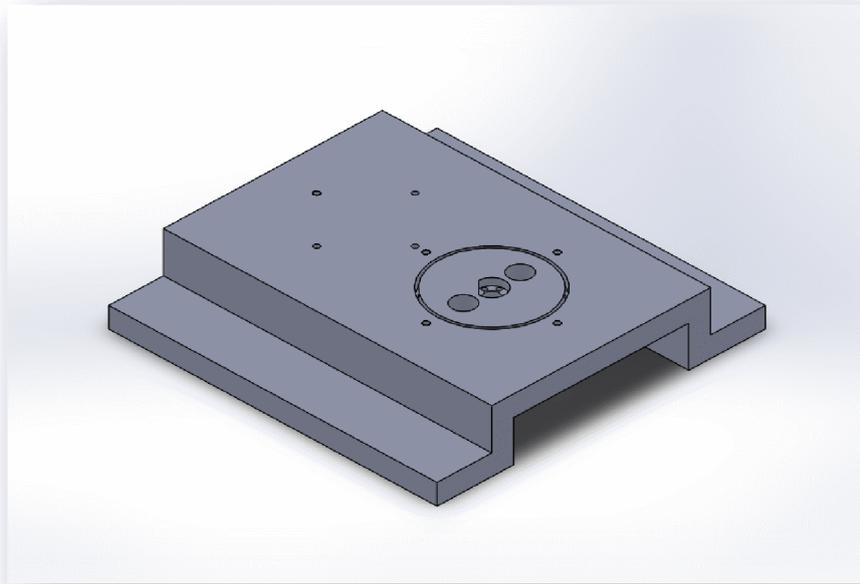


Figure V-8 : La base

➤ Colonne :

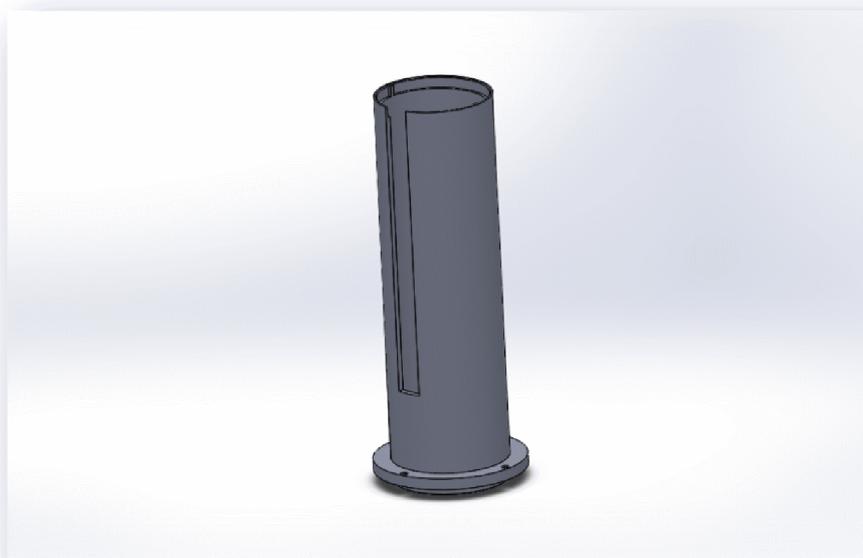


Figure V-9 : Colonne

➤ **Colonne de guidage**

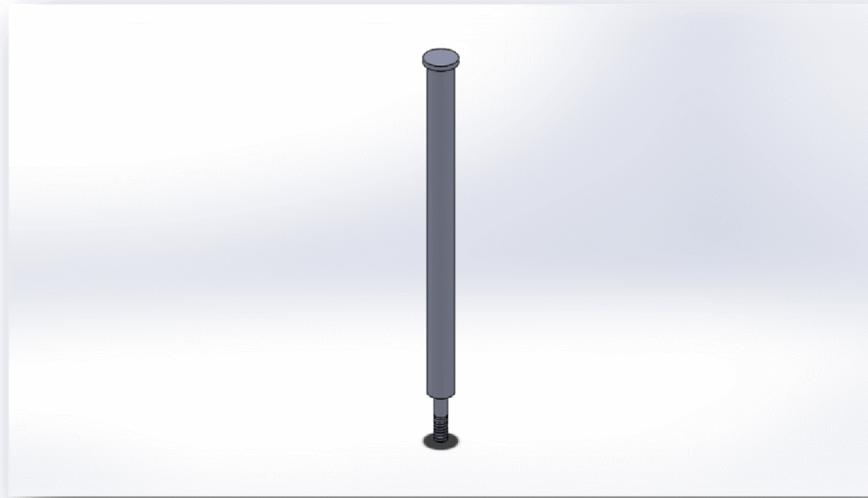


Figure V-10 : Colonne de guidage

➤ **Murs de la tête**

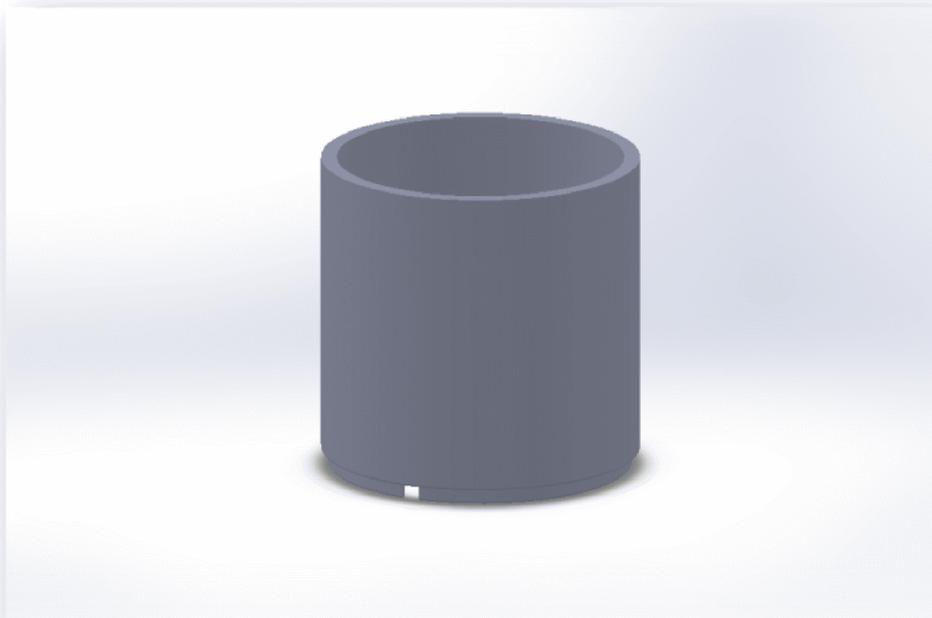


Figure V-11 : Murs de la tête

➤ **La base de la tête**

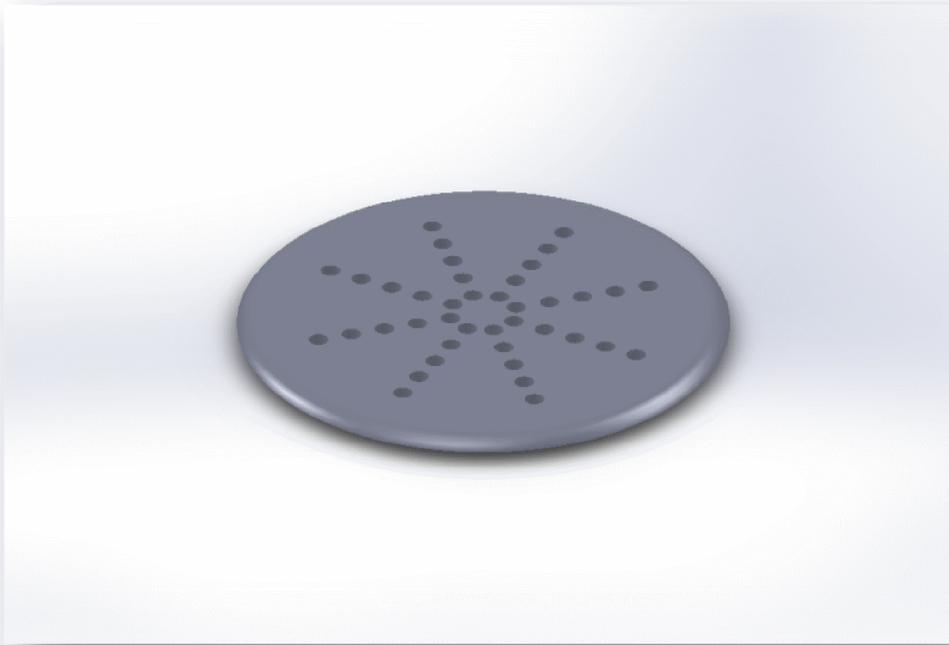


Figure V-12 : La base de la tête

➤ **Bride de moteur**

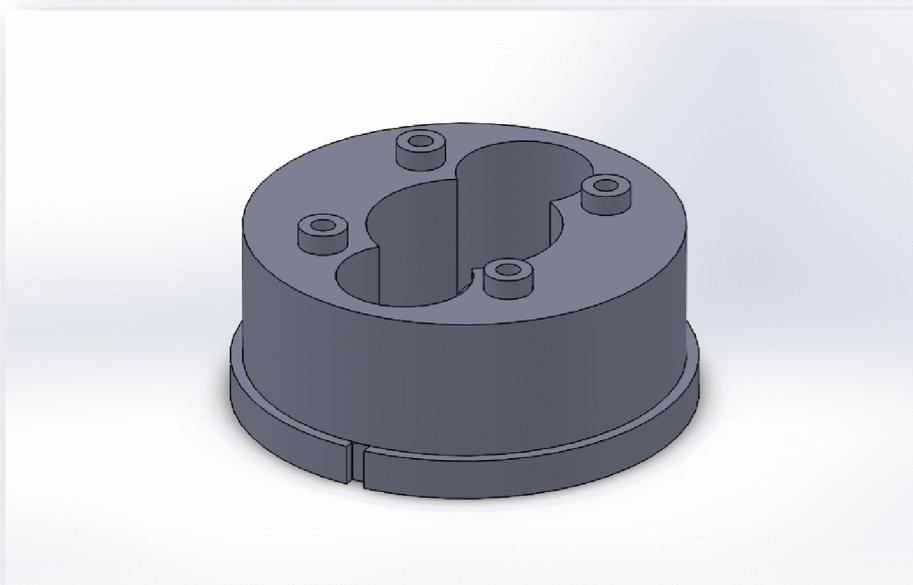


Figure V-13 : La bride de moteur

➤ **Bride de capteur**

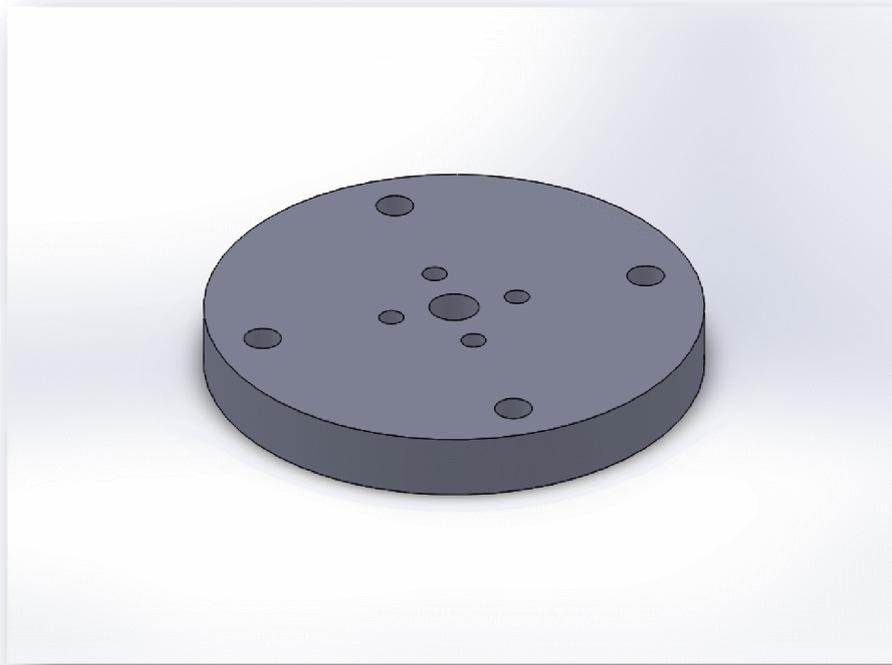


Figure V-14 : La bride de capteur

➤ **Mors inférieur**

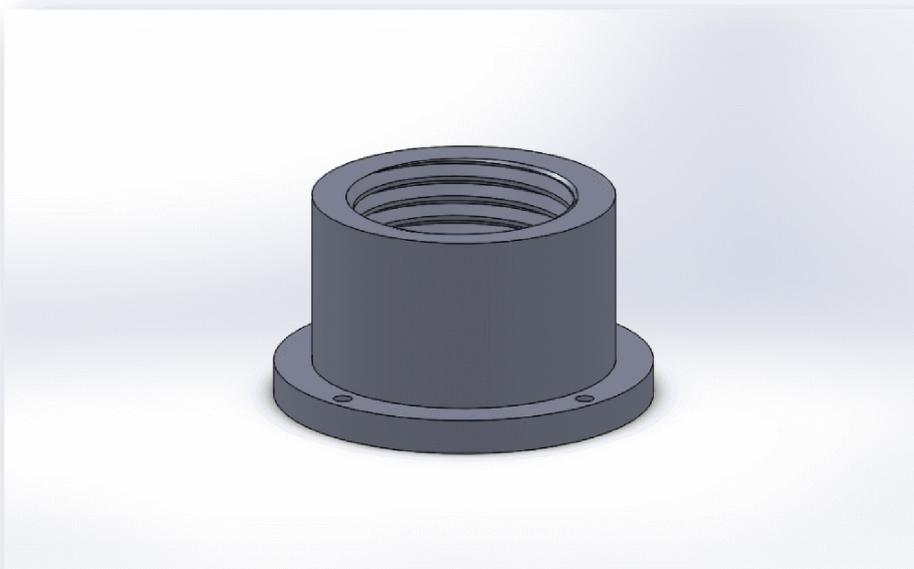


Figure V-15 : Mors inférieur

➤ **Support de matériau**

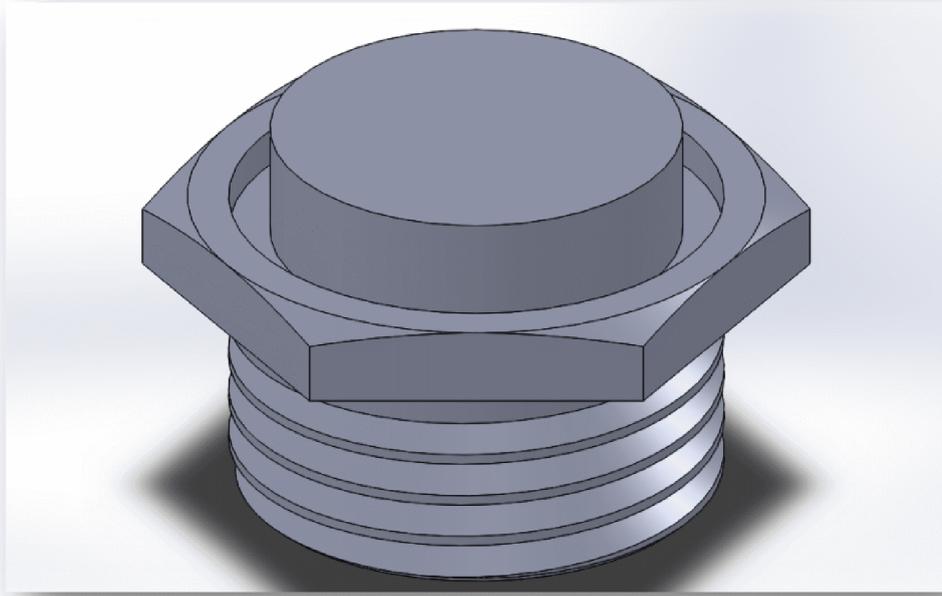


Figure V-16 : Support de matériau

➤ **Mors supérieur**

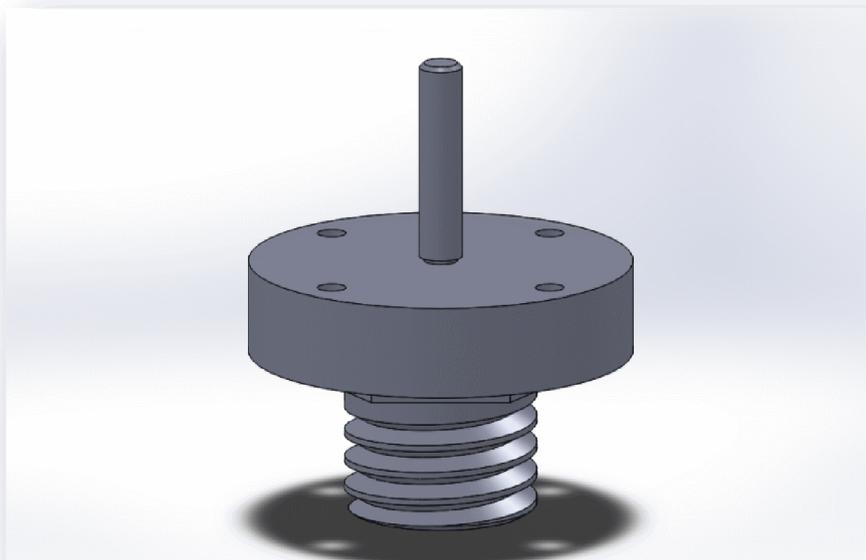


Figure V-17 : Mors supérieur

➤ **Indenteur plane**

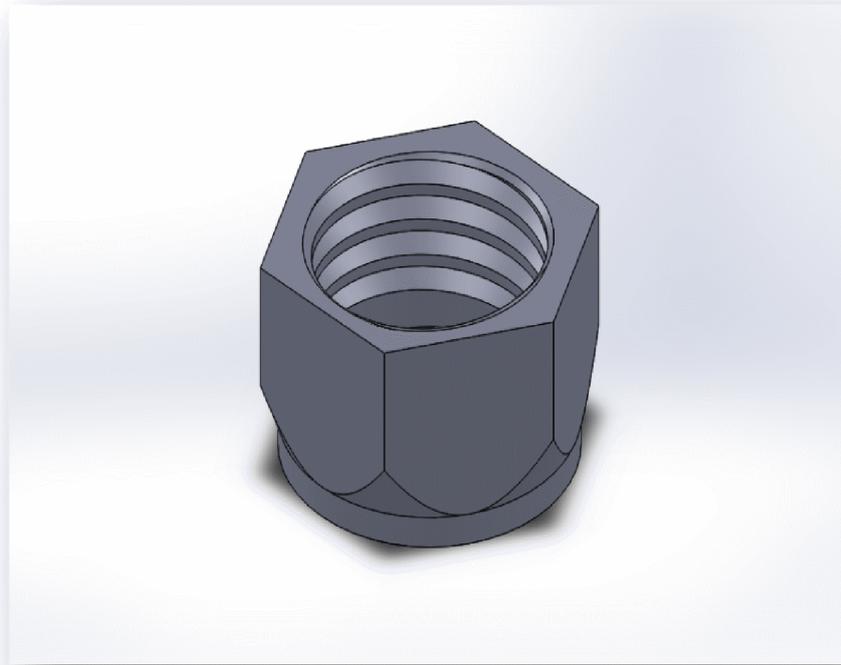


Figure V-18 : Indenteur plane

➤ **Indenteur sphérique**

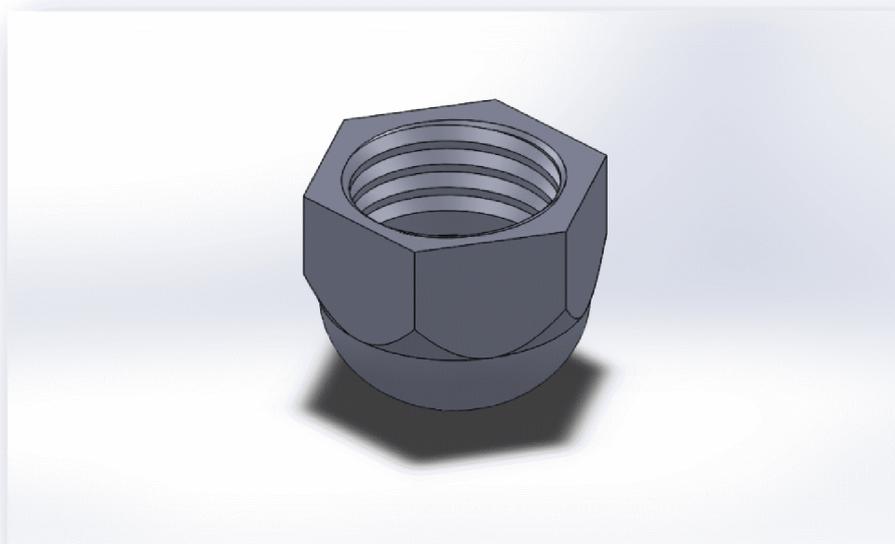


Figure V-19 : Indenteur sphérique

➤ **La pièce intermédiaire**

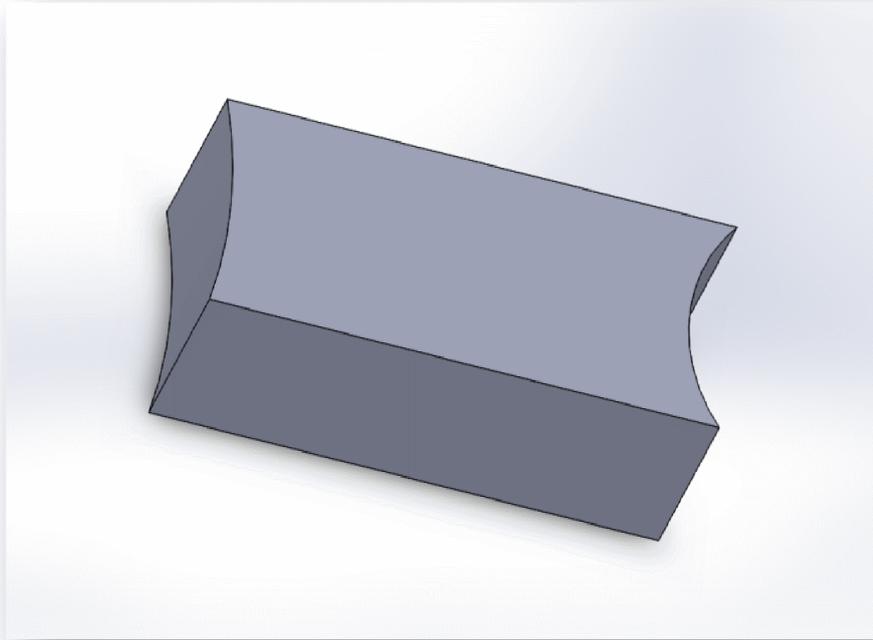


Figure V-20 : La pièce intermédiaire

➤ **Travers mobile**

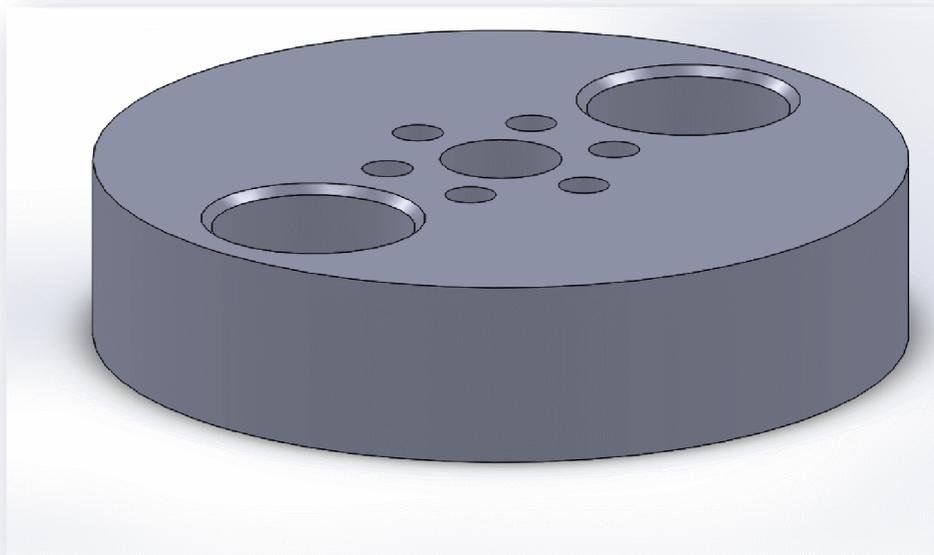


Figure V-21 : Travers mobile

4. Schéma technologie

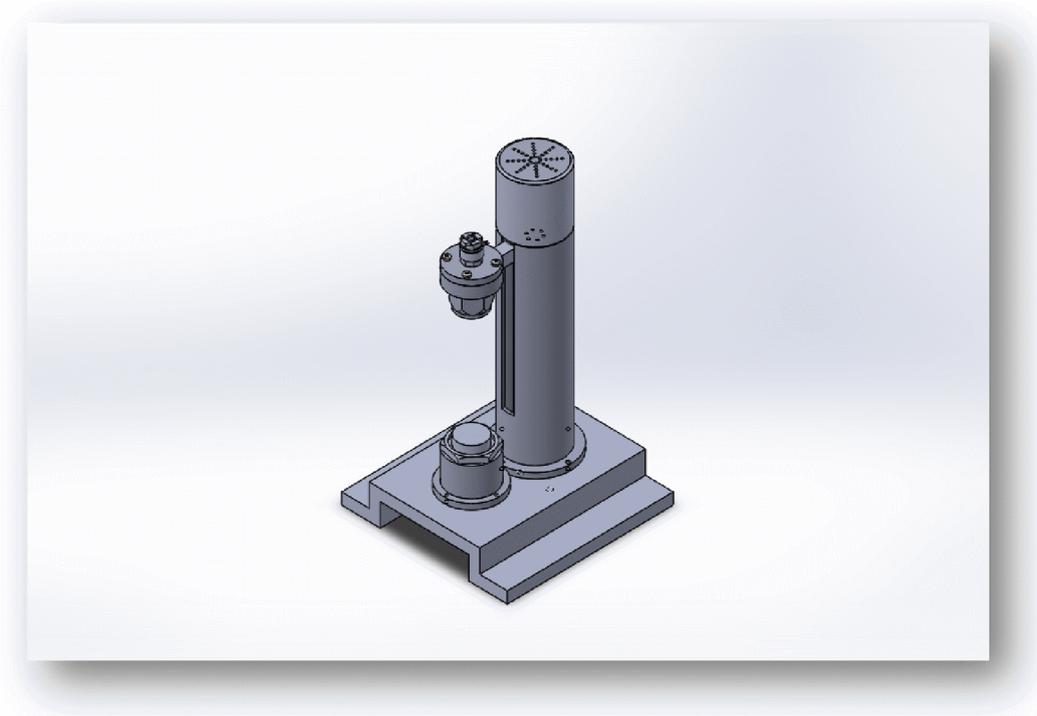
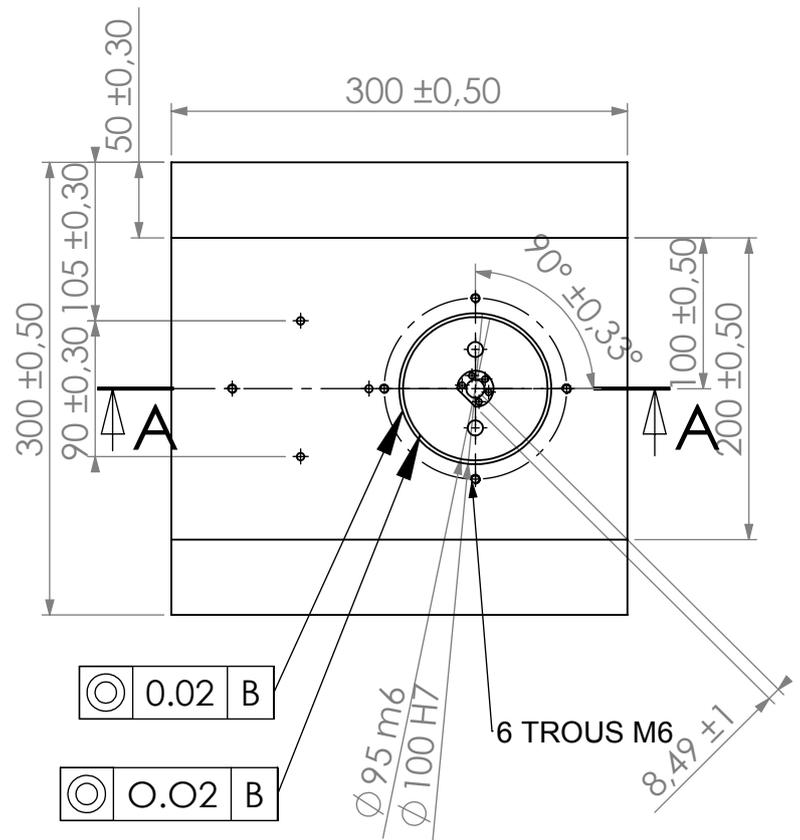
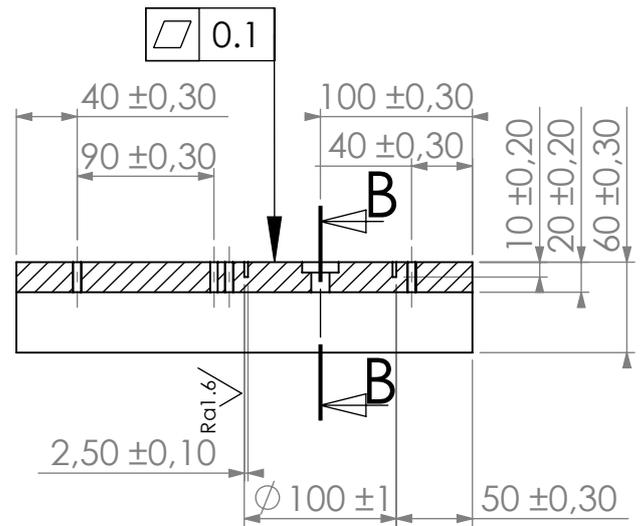
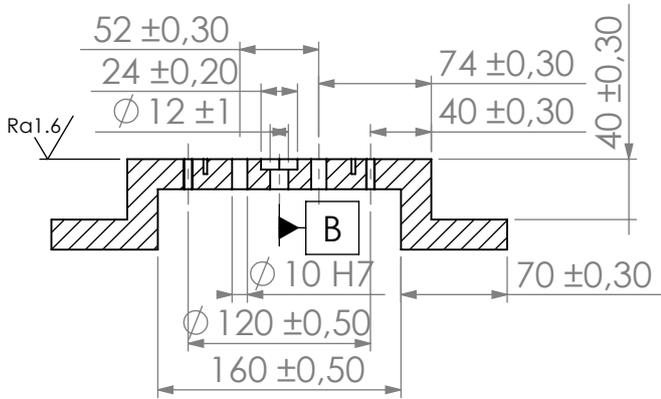


Figure V-22 : Machine d'essais de collage

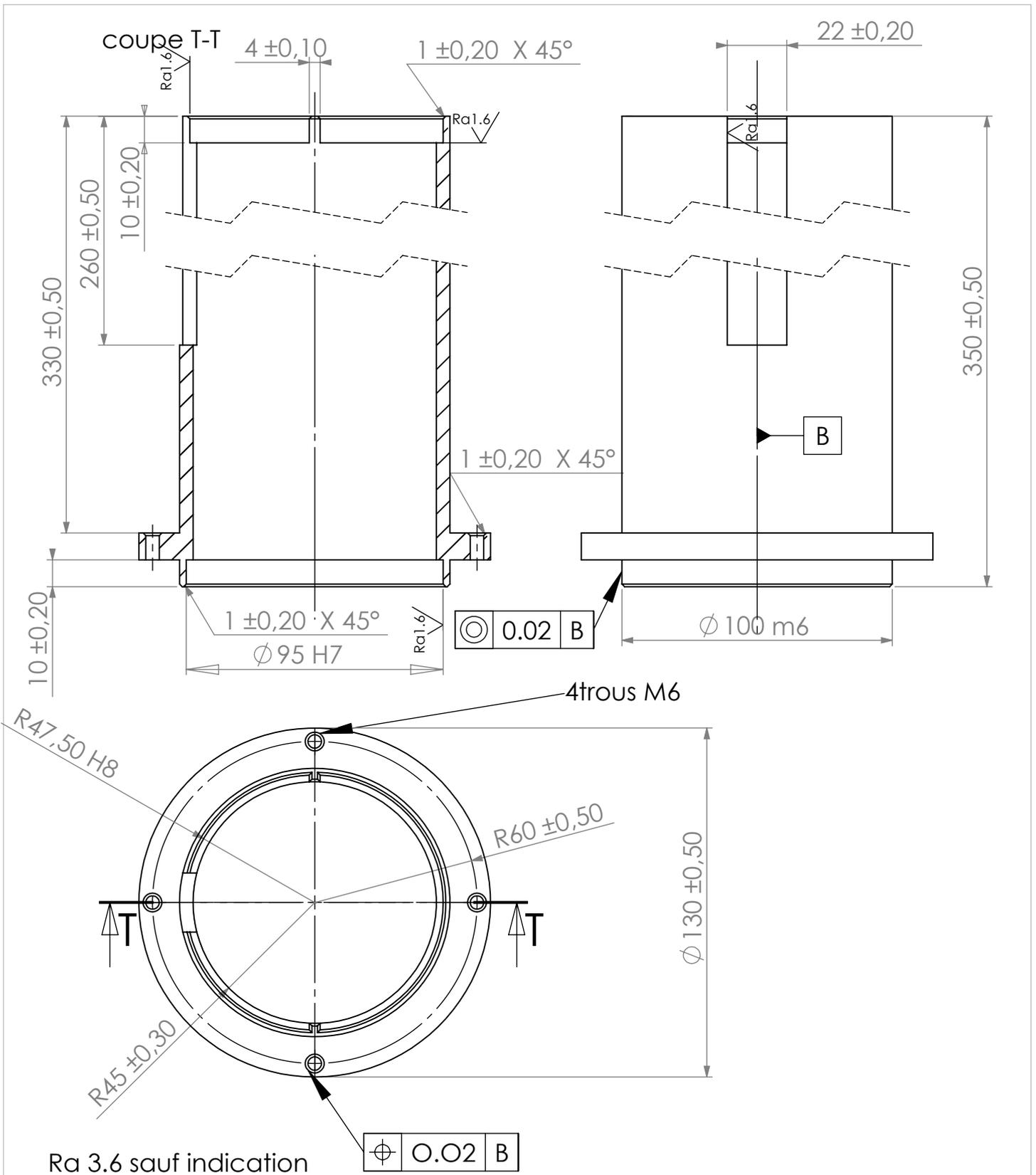
coupe B-B

coupe A-A

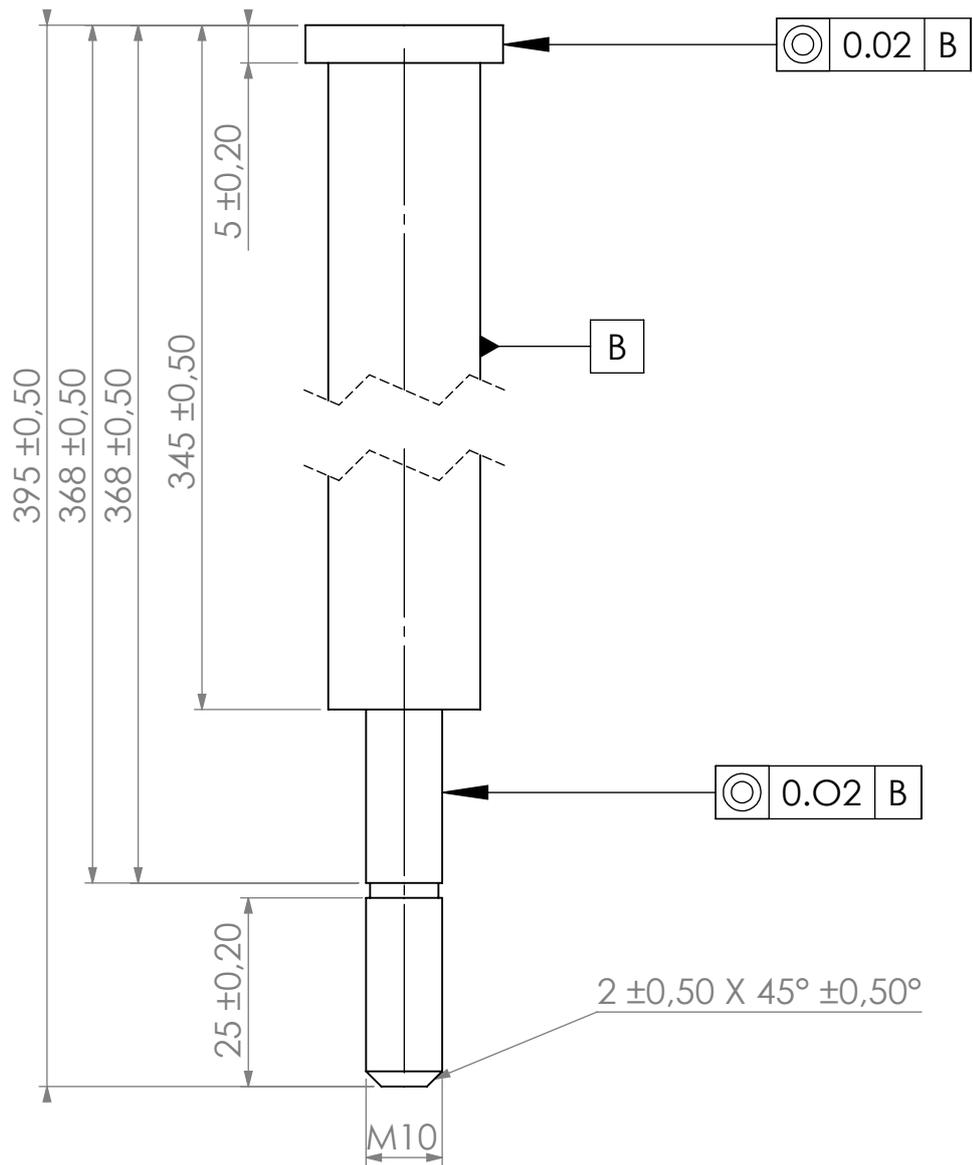
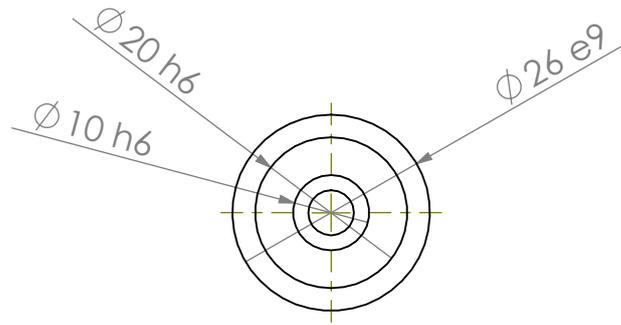


Ra:3.6 sauf indication

1	1	Base	XC48	
REP	NB	DESIGNATION	MATIERE	OBSERVATION
ECHELLE 1 : 5		Base		N° : 1
				2012-2013
A4		LEGHIMA SOUHILA		FMP(M)-UMMTO

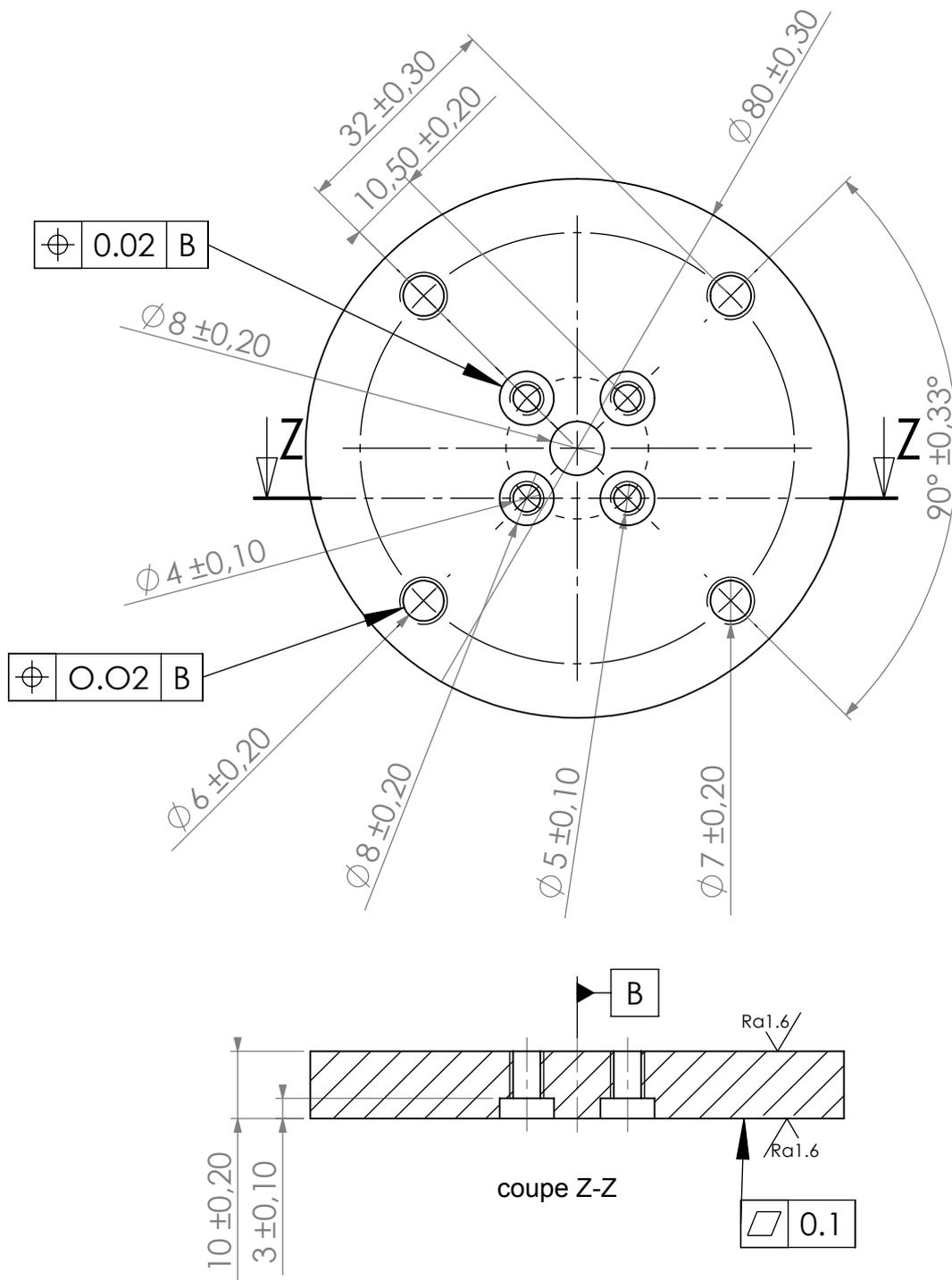


2	1	colonne	XC48	
REP	NB	DESIGNATION	MATIERE	OBSERVATION
ECHELLE 1 : 2		Colonne		N° : 2
				2012-2013
A4		LEGHIMA	SOUHILA	FMP(M)-UMMTO



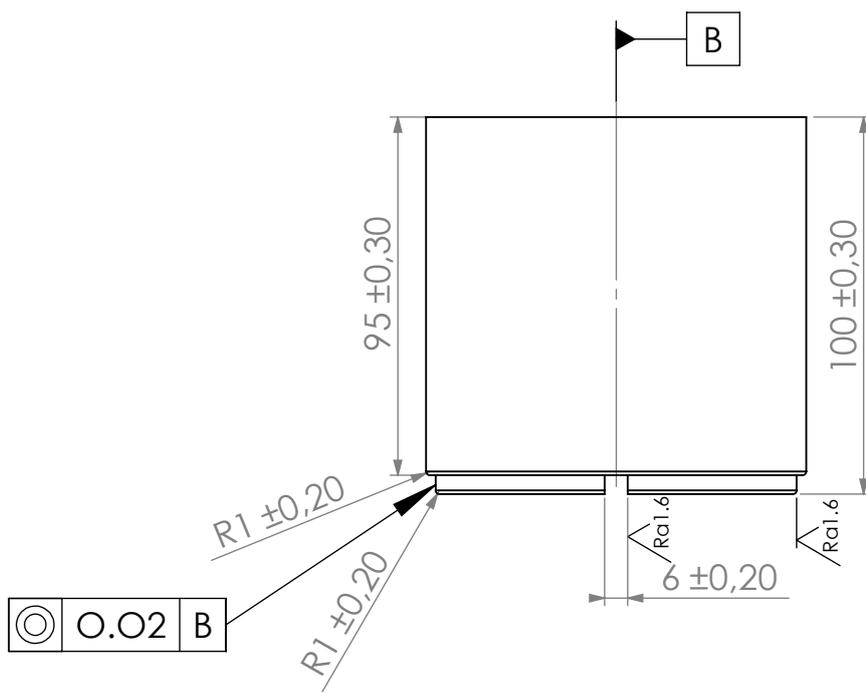
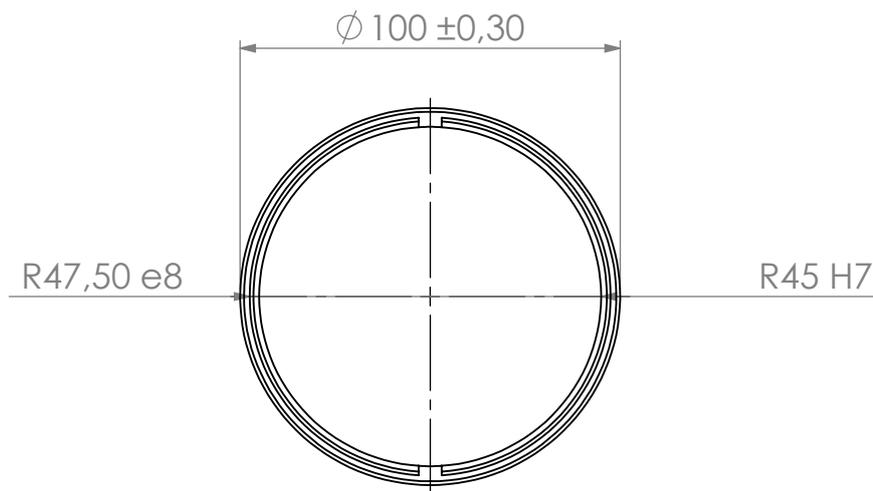
Ra0.8

3	1	colonne de guidage	Bronze	
REP	NB	DESIGNATION	MATIERE	OBSERVATION
ECHELLE 1 :1		Colonne de guidage	N°: 3	
			2012-2013	
A4		LEGHIMA SOUHILA	FMP(M)-UMMTO	

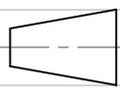
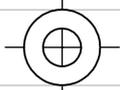


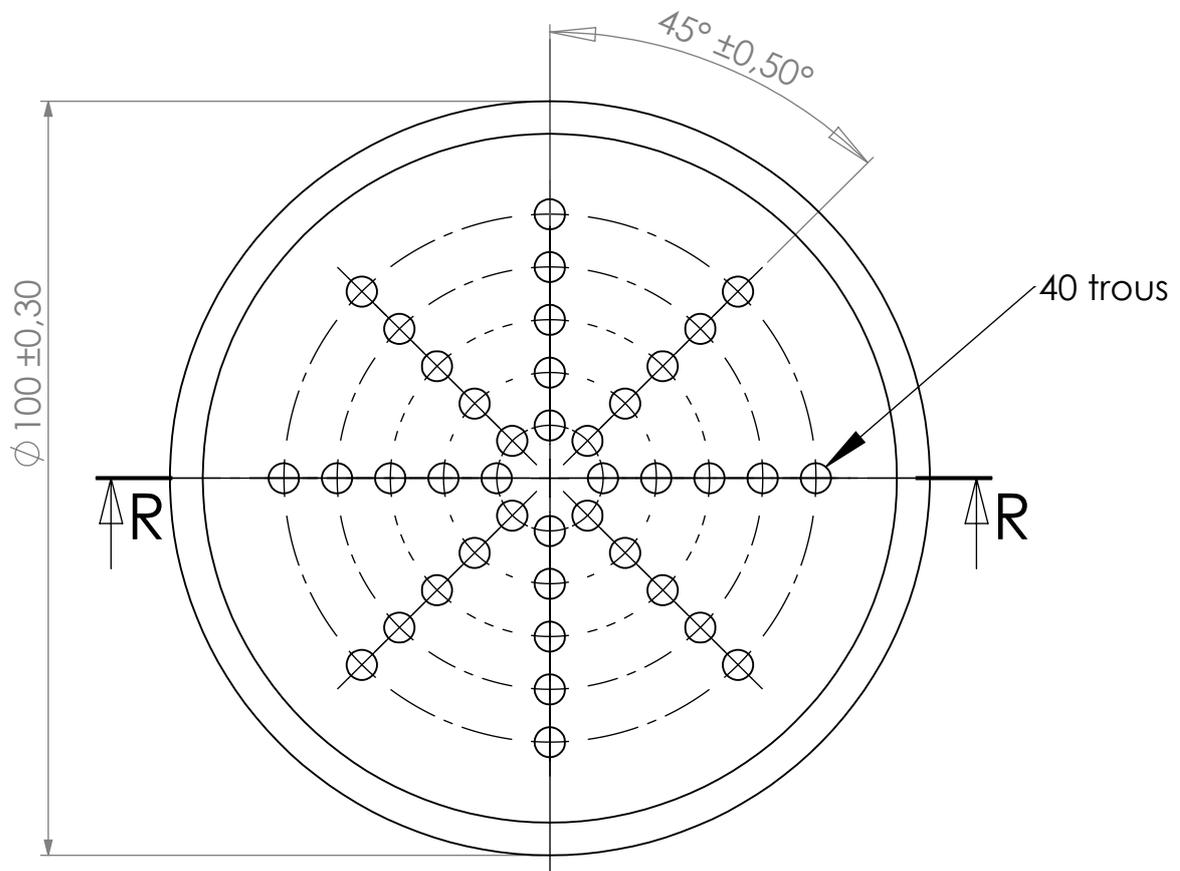
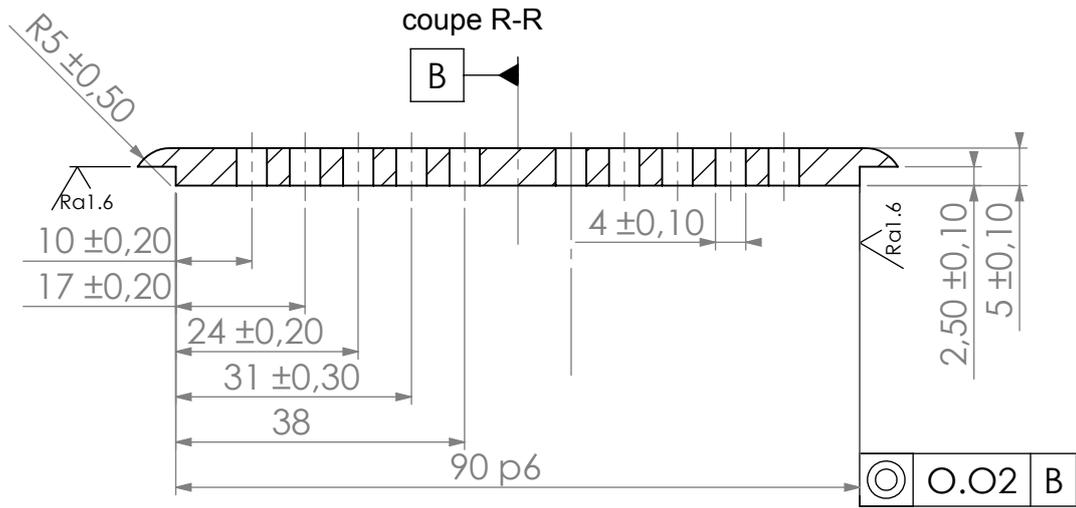
Ra: 3.6 sauf indication

12	1	Bride decapteur	XC48	
REP	NB	DESIGNATION	MATIERE	OBSERVATION
ECHELLE 1 : 1		Bride de capteur		N° : 12
				2012-2013
A4		LEGHIMA SOUHILA		FMP(M)-UMMTO



Ra: 3.6 sauf indication

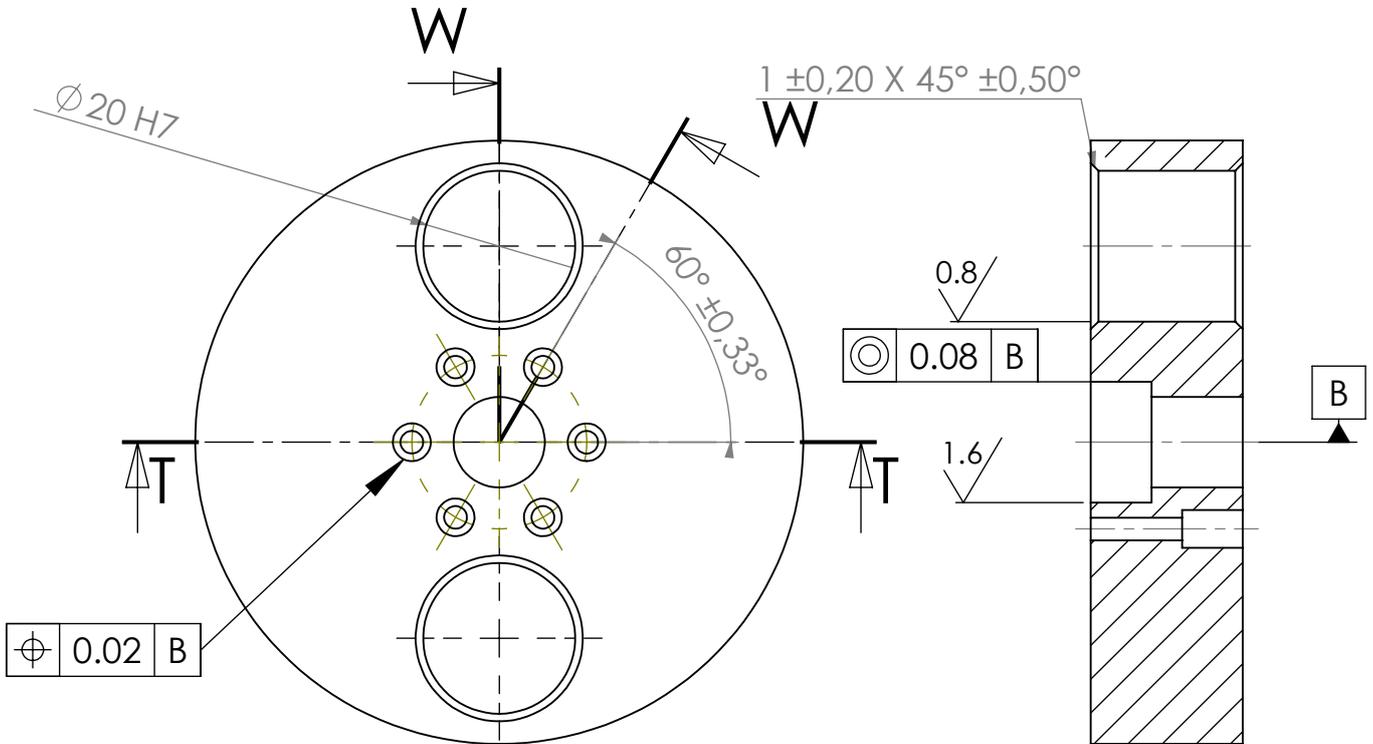
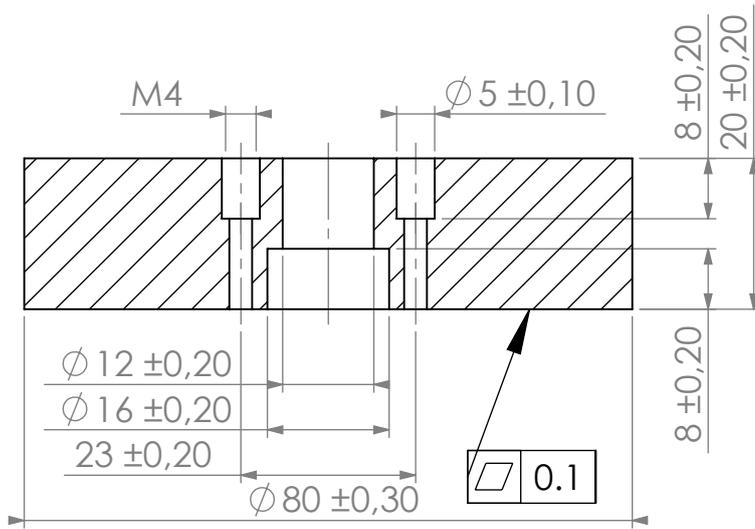
5	1	Murs de la tête	XC48	
REP	NB	DESIGNATION	MATIERE	OBSERVATION
ECHELLE 1 :2		Murs de la tête		N° : 5
				2012-2013
A4		LEGHIMA	SOUHILA	FMP(M)-UMMTO



Ra: 3.6 sauf indication

6	1	La base de la tête	XC48	
REP	NB	DESIGNATION	MATIERE	OBSERVATION
ECHELLE 1 : 1		La base de la tête		N° : 6
				2012-2013
A4		LEGHIMA	SOUHILA	FMP(M)-UMMTO

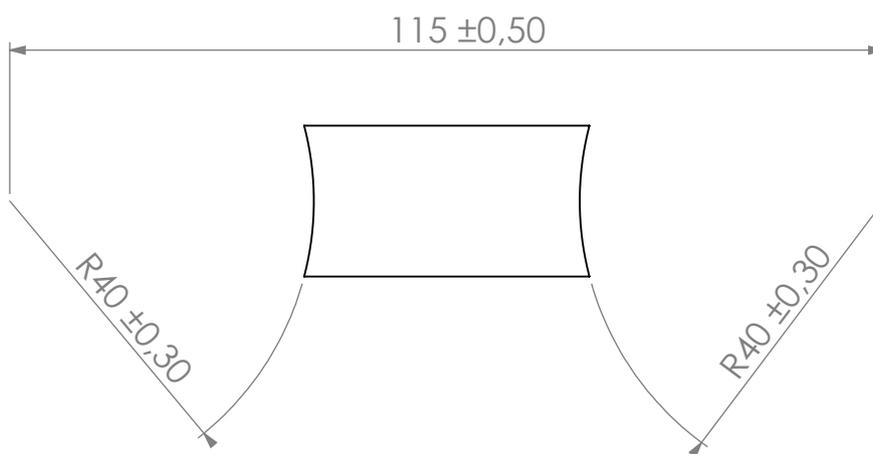
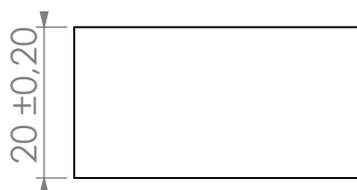
Coupe T-T



Ra: 3.6 sauf indication

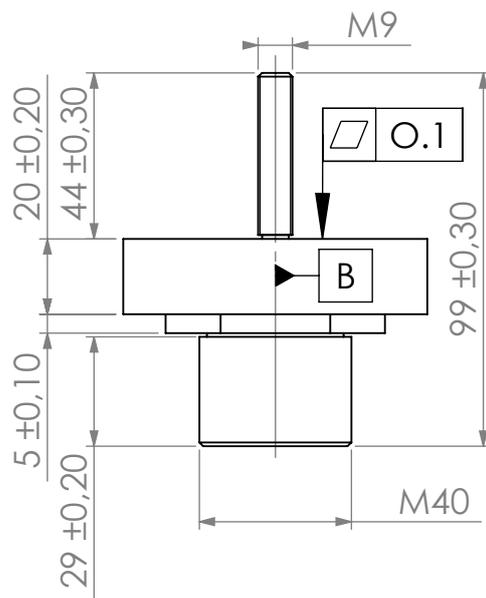
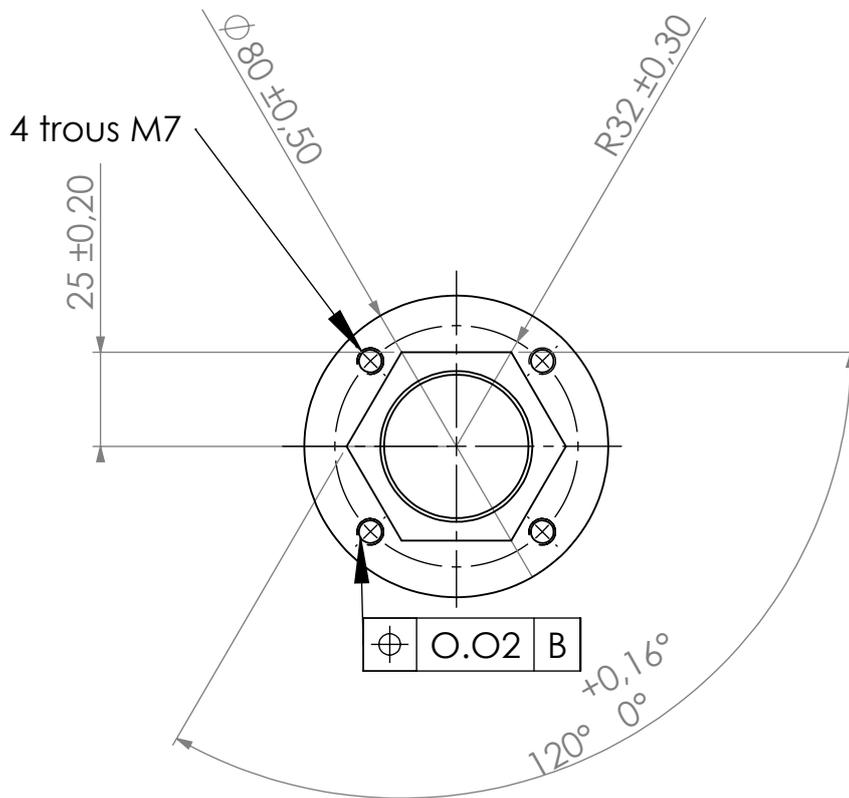
Coupe W-W

7	1	Traverse mobile	XC48	
REP	NB	DESIGNATION	MATIERE	OBSERVATION
ECHELLE 2 : 1		Traverse mobile		N° : 7
				2012-2013
A4		LEGHIMA	SOUHILA	FMP(M)-UMMTO

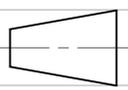
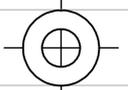


Ra: 3.6

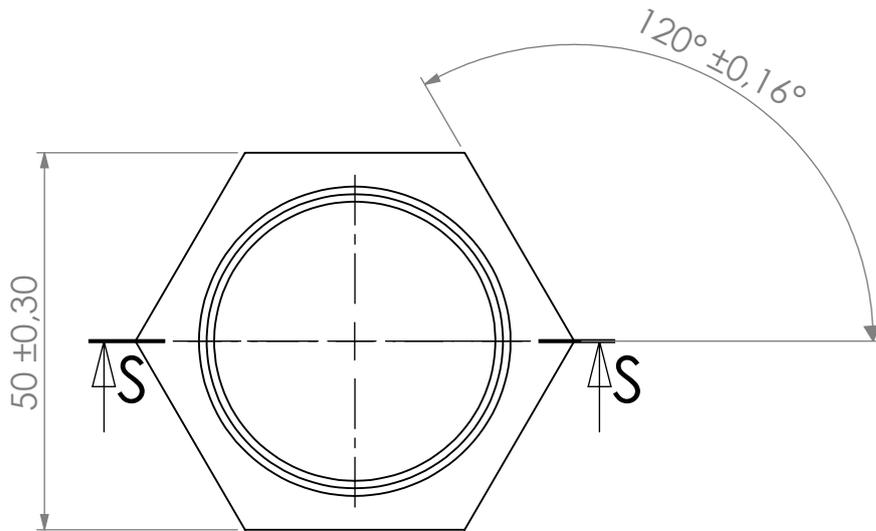
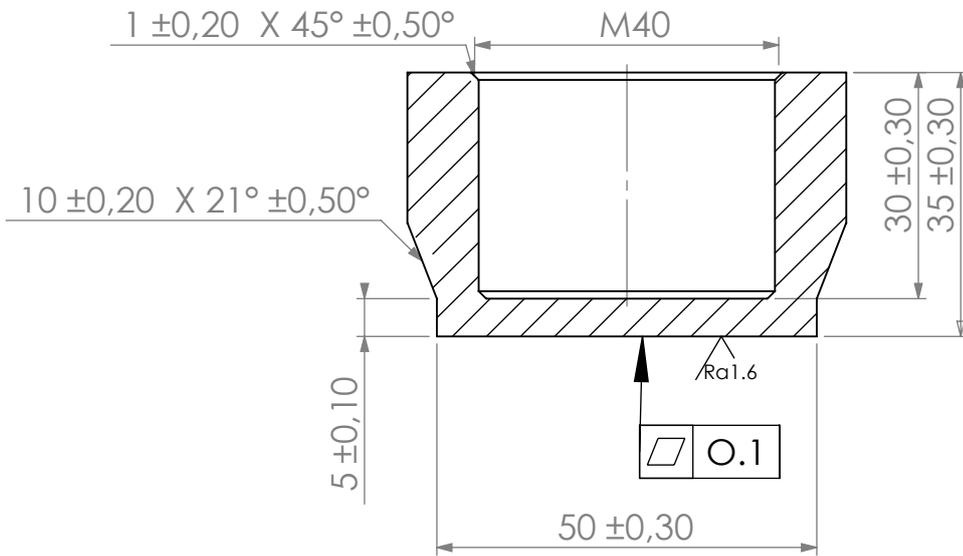
8	1	Piece intermédiaire	XC48	
REP	NB	DESIGNATION	MATIERE	OBSERVATION
ECHELLE 1 : 1		Piece intermédiaire		N°:8
				2012-2013
A4		LEGHIMA	SOUHILA	FMP(M)-UMMTO



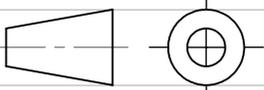
Ra: 3.6

9	1	mors supérieur	XC48	
REP	NB	DESIGNATION	MATIERE	OBSERVATION
ECHELLE 1 :2		Mors supérieur		N° :9
				2012-2013
A4		LEGHIMA	SOUHILA	FMP(M)-UMMTO

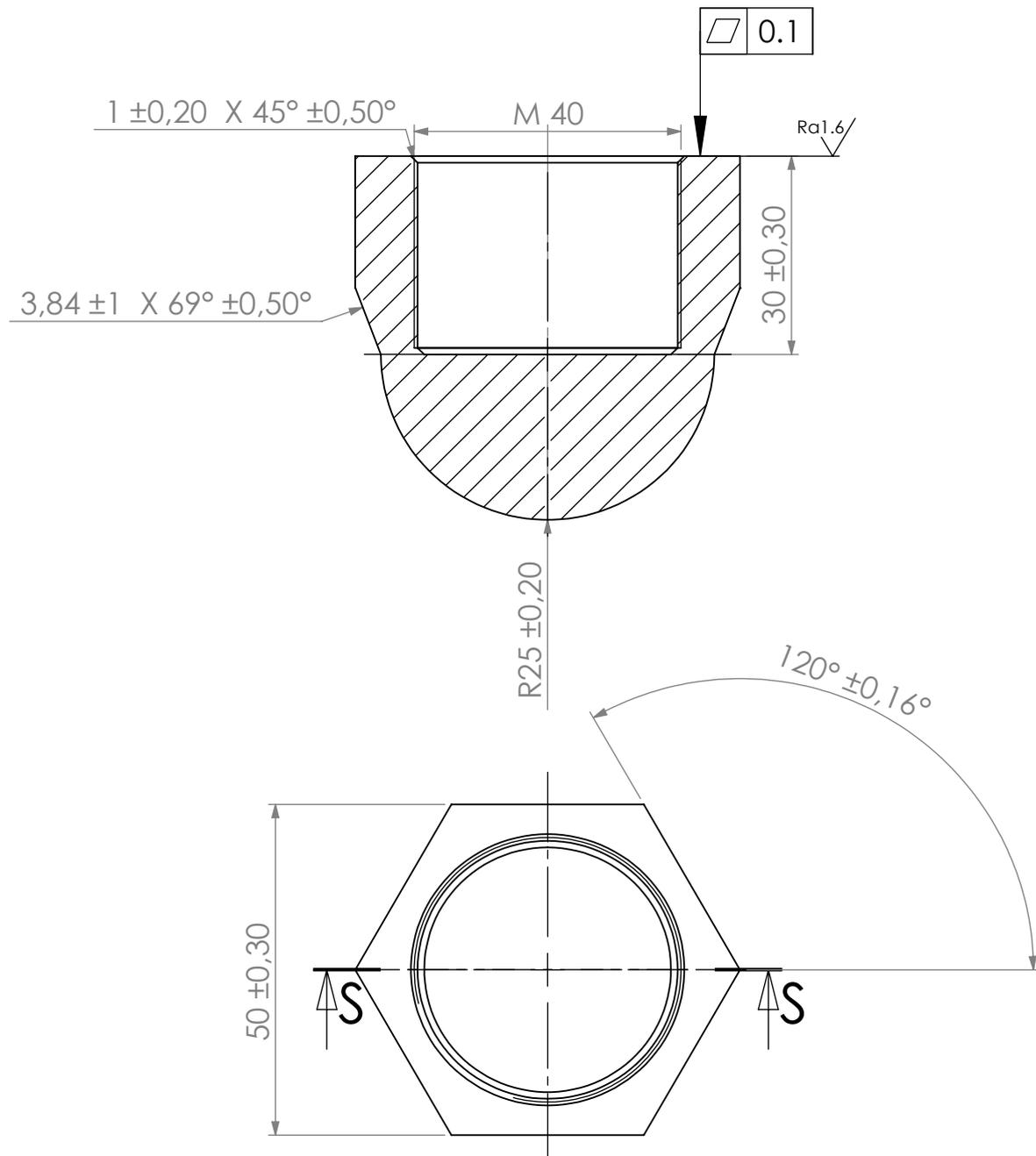
coupe S-S



Ra: 3.6 sauf indication

10	1	Indenteur plane	XC48	
REP	NB	DESIGNATION	MATIERE	OBSERVATION
ECHELLE 1 : 1		Indenteur plane		N° : 10
				2012-2013
A4		LEGHIMA	SOUHILA	FMP(M)-UMMTO

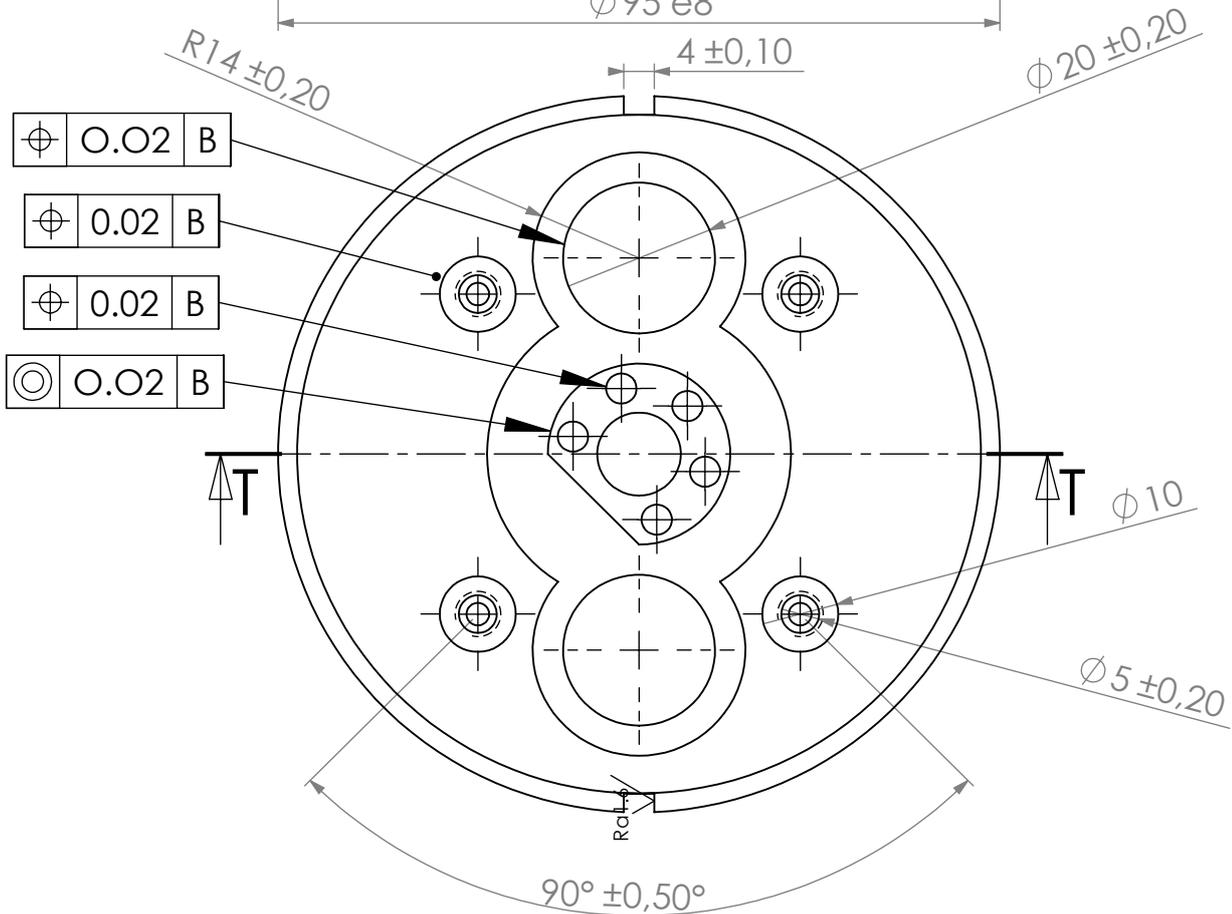
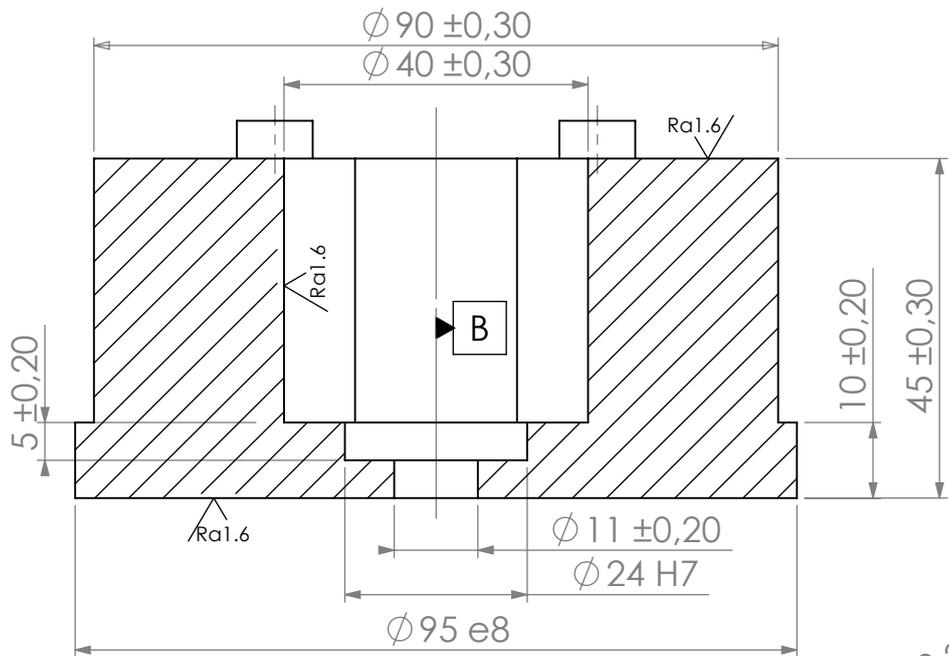
Coupe S-S



Ra:3.6sauf indication

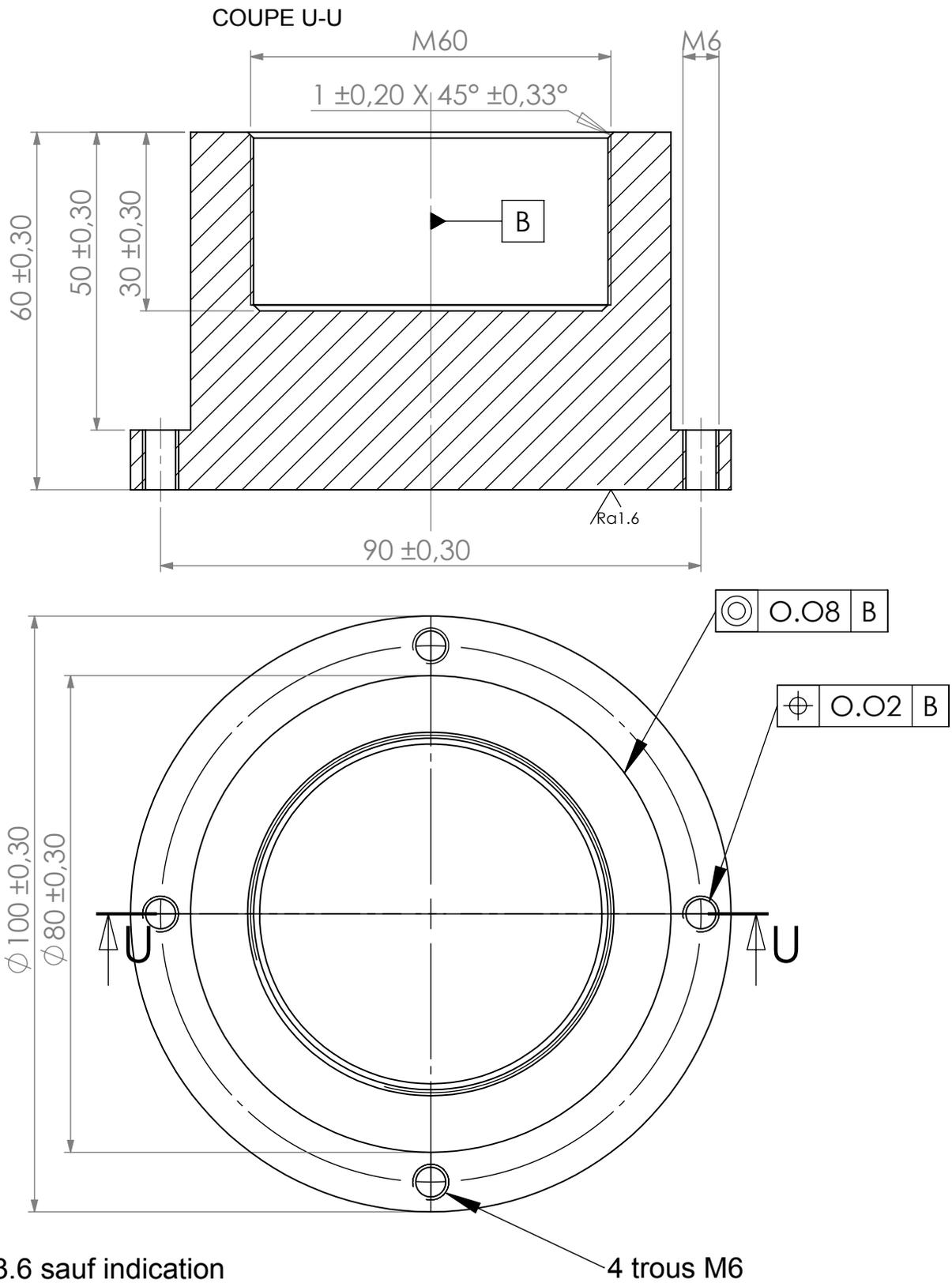
11	1	Indenteur sphérique	XC48	
REP	NB	DESIGNATION	MATIERE	OBSERVATION
ECHELLE 1 :1		Indenteur sphérique		N° :11
				2012-2013
A4		LEGHIMA	SOUHILA	FMP(M)-UMMTO

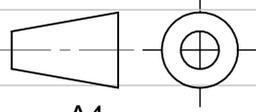
coupe T-T

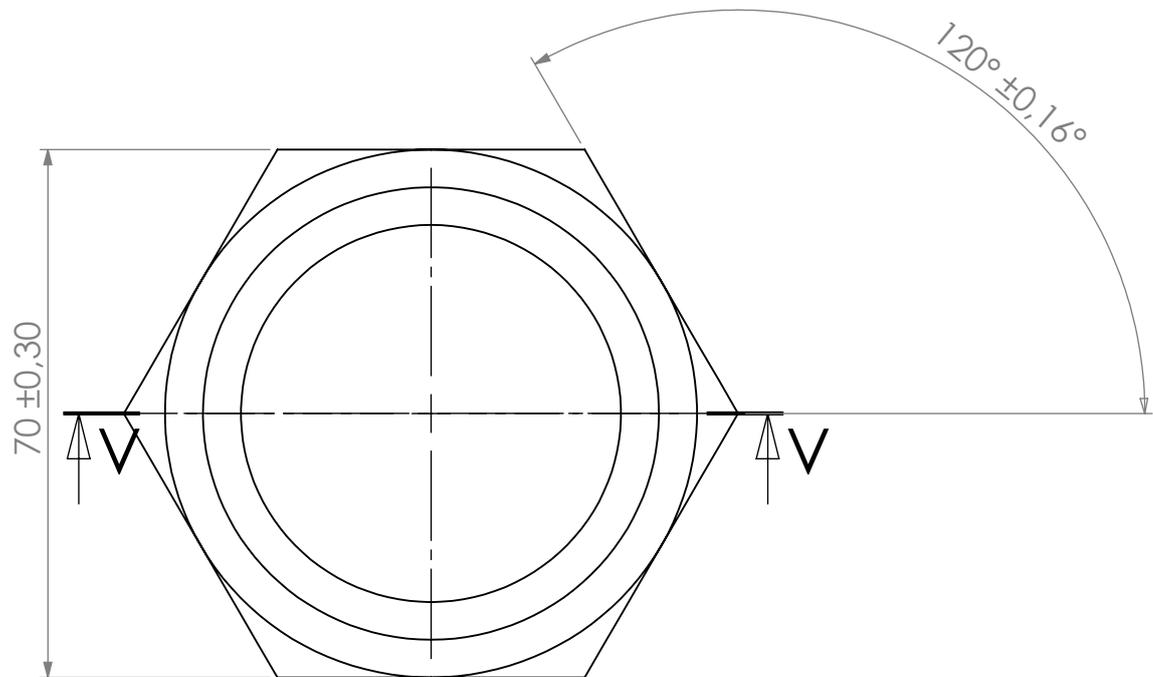
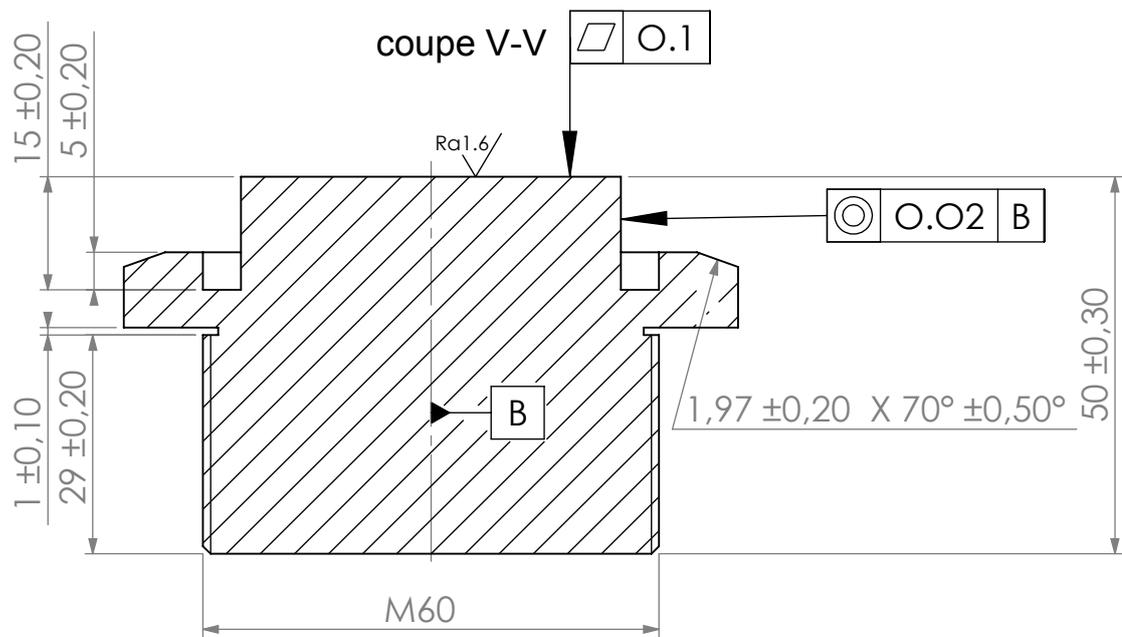


Ra: 3.6 sauf indication

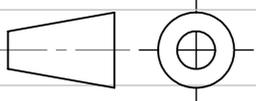
4	1	Bride de moteur	XC48	
REP	NB	DESIGNATION	MATIERE	OBSERVATION
ECHELLE 1 : 1		Bride de moteur		N° : 4
				2012-2013
A4		LEGHIMA SOUHILA		FMP(M)-UMMTO

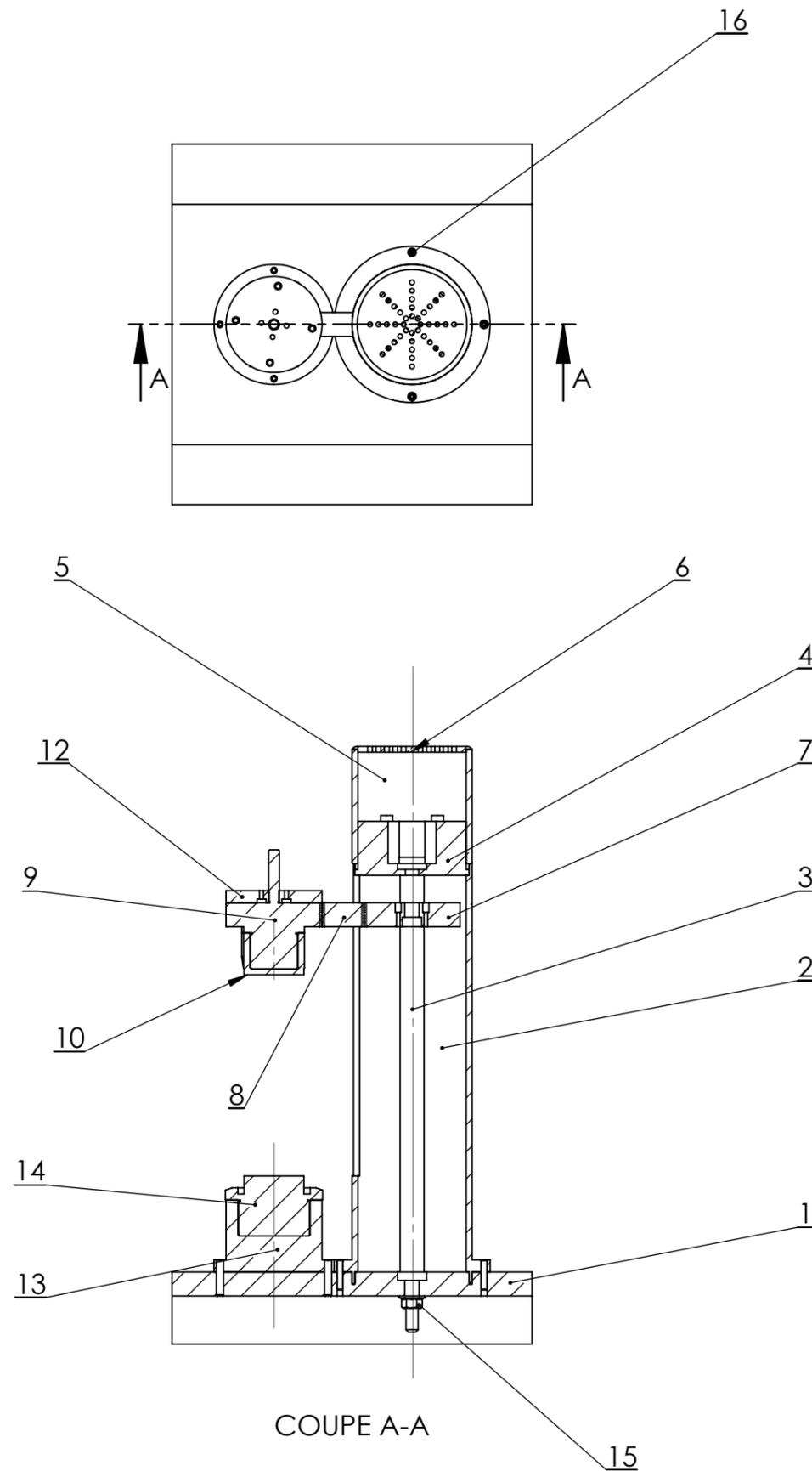


13	1	Mors inférieur	XC48	
REP	NB	DESIGNATION	MATIERE	OBSERVATION
ECHELLE 1 : 1		Mors inférieur		N° :13
 A4				2012-2013
		LEGHIMA	SOUHILA	FMP(M)-UMMTO



Ra: 3.6 sauf indication

14	1	Support de matériau	XC48	
REP	NB	DESIGNATION	MATIERE	OBSERVATION
ECHELLE 1 : 1		Support de matériau		N° :14
				2012-2013
A4		LEGHIMA	SOUHILA	FMP(M)-UMMTO



16	3	Vis sans tete à 6 pans creux bout plat		
15	2	Ecrou hexagonal à embase grade		
14	1	Support de matériau	XC48	
13	1	Mors inférieur	XC48	
12	1	Bride de capteur	XC48	
10	1	Indenteur plane	XC48	
9	1	Mors supérieur	XC48	
8	1	Pièce intermédiaire	XC48	
7	1	Travers mobile	XC 48	
6	1	La base de la tete	XC48	
5	1	Murs de la tete	XC48	
4	1	Bride de moteur	XC48	
3	1	Colonne de guidage	Bronze	
2	1	Colonne	XC48	
1	1	Base	XC48	
REP	NB	DESINATION	MATIERE	OBSERVATION
ECHELLE 1:5		Machine d'essais de collage		N°:I
				2012-2013
A3		LEGHIMA	SOUHILA	FMP(M)-UMMTO

Conclusion générale

La pégosité des matériaux, ainsi que les autres sensations tactiles, est encore un phénomène mal connu. Les testes sensitifs permettent seulement une approche qualitative des propriétés des matériaux. La finalité de cette étude est de corréler les propriétés mécaniques mesurées à l'aide d'un doigt artificiel à des essais tactiles. A cet effet, la mise au point d'un appareil de mesure permet, dans un premier temps, de déterminer les propriétés mécaniques des matériaux avec des sollicitations équivalentes aux essais sensorielle. La qualification d'un doigt artificiel, proche d'un doigt humain, permettra une caractérisation des matériaux ainsi qu'une corrélation avec les tests sensitifs.

Bibliographique

Bibliographie

- [1] COGNARD (Ph.) : Le collage industriel. Éditions Usine Nouvelle 1981.
- [2] J. POLESEL : Modélisation et Expérimentation en Microscopie à Force Atomique Dynamique en Ultra Vide. Thèse de doctorat, Université Toulouse III, 2005.
- [3] J.N. ISRAELACHVILI: The Nature of van der Waals Forces. Intermolecular and Surface forces (3rd Ed). Academic, 2010.
- [4] R.A.SAUER: An Atomic Interaction based Continuum Model for Computational Multiscale contact Mechanics. These de doctorat , University of California , Berkeley, 2006.
- [5] Sébastien ALVO: Etude et mesure des forces d'adhésion à l'échelle Microscopique. Thèse de doctorat, université pierre et marie curie, 2012.
- [6] H. RUMPF: Particle Technology. Chapman and Hall, London, 1990.
- [7] Jérémie TEISSEIRE: Tack de Matériaux Modèles , Thèse de doctorat, 2006.
- [8] k.L. Johnson, contact mechanic, cambridge university Press, 1985.
- [9] H. Lakrout, C. Creton, J. of adhesion, 1999.
- [10] Chevalier: guide du dessinateur industriel. Edition hachette technique, 2004