

République Algérienne Démocratique et populaire  
Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou



Faculté de Génie de la Construction  
Département Génie Mécanique



## Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme  
Master Académique en Génie Mécanique  
Spécialité : Construction Mécanique

### Thème

*Etude et Conception d'un Moule-Palette en  
Polystyrène Expansé pour un Réfrigérateur ENIEM*

**Proposé par**

ENIEM

**Dirigé par**

Ahmed SALHI  
Mohamed SAAL  
Yahia DIFELLAH

**Réalisé par**

Lounès AIT GANA  
Abderahim MEHANI

### Membres de Jury

|                     |       |              |
|---------------------|-------|--------------|
| M. HAKEM Ahmed      | UMMTO | Président    |
| M. MOUHALBI Mouloud | UMMTO | Examineur    |
| M. SALHI Ahmed      | UMMTO | Encadreur    |
| M.SAAL Mohamed      | UMMTO | Co-encadreur |
| M.DIFFALLAH Yahia   | ENIEM | Co-encadreur |

**Soutenue le 02/11/2017**

*Promotion 2016-2017*

## Remerciements

*Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.*

*En second lieu, la personne que nous tenons à remercier est notre promoteur **Mr. SALHI Ahmed**, pour l'orientation, la confiance, la patience qui a constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.*

*Nos remerciements s'étendent également à **Mr. DIFELLAH Yahia**, **Mr. SAAL Mohamed**, nos deux co-encadreurs, pour leurs bonnes explications qui nous ont éclairé le chemin de la recherche et leur collaboration avec nous dans l'accomplissement de ce modeste travail.*

*Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études, spécialement à **Mr. MOUHALEBI Mouloud**, **Mr. ZIANI Hocine** aussi **Mr. ZEROUKI Marzak**,*

*Enfin, on remercie tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail, surtout **Mme. SADOUDI Taous** et l'équipe de maintenance au sein de l'entreprise ENIEM, spécialement **Rachid ET Karim**. Et tous nos camarades de l'Université MOULOUD MAMMERI du département de Génie Mécanique.*

MERCI.

# Dédicaces

*Je dédie ce travail à :*

*Ma chère maman, affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.*

*Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte.*

*A mon père avec toute ma reconnaissance, Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.*

*Mes très chers frères « Ghani, Malek », vous étiez le père et la mère, les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous.*

*A mes frères « Mohamed, Mahrez, Moustapha. ».*

*Ma chère sœur et son époux et leurs enfants « Sadia, Hachimi. ».*

*Mes oncles et tantes.*

*Tous mes amis (es). Spécialement : Aghiles, Arezki, Azwaw, Cylia, Lydia, Mohamad, Samir.*

*La promotion de fin cycle Master II, construction mécanique.*

*Mon binôme MEHANI A/Rahim.*

*AIT GANA Lounés.*

# Dédicaces

*Je dédie ce travail à :*

## *A MES CHERS PARENTS*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.*

*Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.*

*Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez.*

*Puisse dieu, le très haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.*

*A ma bien aimée Kahina, je te remercie pour tes sacrifices, ton soutien moral et ta gentillesse, ton profond attachement m'ont permis de réussir mes études, sans ton aide, tes encouragements ce travail n'aurait vu le jour.*

*A mes chers frères, Yacine, Sofiane, Madjid et amine pour leur soutien et leurs encouragements.*

*A mon binôme AIT GANA Lounes.*

*A mes amis (es): yazid. Yacine, Anis, Aghilas, Samir, Wardia, Zaki et Cylia.*

*MEHANI Abderahim*

# Sommaire

---

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| Liste des figures.....          |    |
| Liste des normes.....           |    |
| Liste des tableaux.....         |    |
| Liste des symboles.....         |    |
| Résumé.....                     |    |
| Abstract.....                   |    |
| Historique de l'entreprise..... | 22 |
| Introduction générale.....      | 29 |

## Chapitre I : Généralités sur les polymères

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| I-1-Introduction.....                                                       | 31 |
| I-2-Quelques définitions.....                                               | 32 |
| I-2-1-Définition d'un monomère.....                                         | 32 |
| I-2-2-Définition d'un polymère.....                                         | 32 |
| I-2-3-Définition de la Polymérisation.....                                  | 32 |
| I-2-4-Définition et formation du plastique.....                             | 33 |
| I-3-Différentes classes de polymères.....                                   | 33 |
| I-3-1-Classification selon l'origine.....                                   | 33 |
| I-3-2-Classification selon l'architecture.....                              | 34 |
| I-3-2-1-Les polymères d'architecture linéaire.....                          | 34 |
| I-3-2-2-Les architectures ramifiées.....                                    | 34 |
| I-3-3-Classification selon la structure chimique.....                       | 35 |
| I-3-3-1-Les homopolymères.....                                              | 35 |
| I-3-3-2-Les copolymères.....                                                | 35 |
| I-3-4-Classification selon le comportement thermique.....                   | 35 |
| I-3-4-1-Les thermoplastique.....                                            | 36 |
| I-3-4-2-Les thermodurcissables.....                                         | 37 |
| I-3-4-3-Les élastomères.....                                                | 38 |
| I-3-4-4-Deux grandes classes de polymères.....                              | 39 |
| I-4-Les adjuvants, charges et renforts.....                                 | 39 |
| I-5-Propriétés des polymères.....                                           | 39 |
| I-5-1-Propriétés chimiques des polymères.....                               | 40 |
| I-5-2-Propriétés physiques des polymères.....                               | 42 |
| I-5-3-Resistance au feu.....                                                | 42 |
| I-5-4-Propriétés mécaniques des polymères.....                              | 43 |
| I-6-Structure et transformations structurales.....                          | 46 |
| I-7-Les mousses de polymères et les polymères expansés.....                 | 47 |
| I-7-1-Mousses obtenues à partir de résines thermoplastiques.....            | 47 |
| I-7-2-Mousse de PVC.....                                                    | 47 |
| I-7-3-Mousses obtenues à partir de résines thermodurcissables.....          | 47 |
| I-7-4-Mousse de polyuréthane.....                                           | 48 |
| I-8-Tuyauteries en polymères.....                                           | 49 |
| I-9-Avantages et inconvénients des Polymères.....                           | 49 |
| I-10-Les principaux procédés de transformation des matières plastiques..... | 54 |
| I-11-Conclusion.....                                                        | 55 |

## Chapitre II : polystyrène et copolymères de styrène

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| II-1-Introduction.....                                                                                               | 57 |
| II-2-Le polystyrène.....                                                                                             | 58 |
| II-3-Aperçu historique .....                                                                                         | 58 |
| II-4-Origine.....                                                                                                    | 59 |
| II-4-1-Monomères constitutifs.....                                                                                   | 59 |
| II-4-2-Butadiène.....                                                                                                | 60 |
| II-5- Formes de polystyrène.....                                                                                     | 62 |
| II-6-Principe des procédés de polymérisation.....                                                                    | 62 |
| II-6-1-Polymérisation radicalaire en suspension.....                                                                 | 62 |
| II-6-2-Polymérisation anionique en solution.....                                                                     | 63 |
| II-6-3-Polymérisation en masse (radicalaire).....                                                                    | 63 |
| II-6-4-Procédé en masse continu.....                                                                                 | 64 |
| II-7-Fabrication du polystyrène expansible.....                                                                      | 65 |
| II-7-1 Polymérisation.....                                                                                           | 65 |
| II-7-2-Traitement de finition.....                                                                                   | 66 |
| II-8-Principaux polymères styréniques.....                                                                           | 67 |
| II-9-Production du polystyrène expansé PSE-M à partir du polystyrène expansible... ..                                | 68 |
| II-9-1-Pré-expansion des perles en polystyrène expansible.....                                                       | 69 |
| II-9- 2-la maturation et le stockage/expéditions.....                                                                | 71 |
| II-9- 3-Moulage de blocs.....                                                                                        | 73 |
| II-9- 4-Moulage en forme.....                                                                                        | 74 |
| II-9-4-2-Machines équipées de vide.....                                                                              | 74 |
| II-9-4-3-Machines « transfert ».....                                                                                 | 75 |
| II-9-4-4- Machines de complexage.....                                                                                | 75 |
| II-9-4-5-Le séchage du polystyrène expansé.....                                                                      | 76 |
| II-9-4-6-Traitements complémentaires.....                                                                            | 76 |
| II-10-Production de polystyrène expansé extrudé PSE-X (XPS).....                                                     | 77 |
| II-11-Propriétés du polystyrène expansé PSE.....                                                                     | 78 |
| II-11-1-Généralités.....                                                                                             | 78 |
| II-11-2-Propriétés mécaniques.....                                                                                   | 79 |
| II-11-3-Propriétés thermiques.....                                                                                   | 80 |
| II-11-4-Propriétés diverses.....                                                                                     | 81 |
| II-11-4-1-Comportement à l'eau.....                                                                                  | 81 |
| II-11-4-2-Résistance chimique.....                                                                                   | 82 |
| II-11-4-3-Propriétés biologiques et stabilité dans le temps.....                                                     | 82 |
| II-11-4-4-Alimentarité.....                                                                                          | 82 |
| II-11-4-5-Comportement au feu.....                                                                                   | 83 |
| II-11-5-Comparaison entre le polystyrène expansé moulé (PSE-M) et le polystyrène expansé extrudé (PSE-X ou XPS)..... | 83 |
| II-11-6-Avantages et inconvénients du polystyrène expansé.....                                                       | 84 |
| II-12-Applications du polystyrène expansé.....                                                                       | 85 |
| II-12-1-Isolation thermique des bâtiments.....                                                                       | 85 |
| II-12-1-1-Isolation des murs.....                                                                                    | 85 |
| II-12-1-2-Isolation des planchers.....                                                                               | 86 |
| II-12-1-3-Isolation des toitures.....                                                                                | 86 |
| II-12-2-Autres usages dans le domaine du bâtiment et des travaux publics.....                                        | 86 |
| II-12-3-Emballages industriels.....                                                                                  | 87 |
| II-12-4-Emballages alimentaires.....                                                                                 | 87 |

## Sommaire

---

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| II-12-5-Applications diverses.....                         | 87 |
| II-13-Gestion des déchets de PSE.....                      | 88 |
| II-13-1-Réduction à la source.....                         | 88 |
| II-13-2-Réutilisation.....                                 | 88 |
| II-13-3-Recyclage.....                                     | 88 |
| II-13-3-1-Simple broyage.....                              | 89 |
| II-13-3-2-Extrusion.....                                   | 89 |
| II-13-4-Récupération d'énergie.....                        | 89 |
| II-13-5-Mise en décharge.....                              | 90 |
| II-14-Consommations de matière et d'énergie.....           | 90 |
| II-15-Quelques propriétés du polystyrène.....              | 90 |
| II-15-1-Propriétés électriques et thermiques.....          | 90 |
| II-15-2-Comportement au feu.....                           | 91 |
| II-15-3-Vieillessement.....                                | 91 |
| II-15-4-Résistance aux produits chimiques – Corrosion..... | 91 |
| II-16-Utilisation du polystyrène.....                      | 94 |
| II-17-Collecte et recyclage du polystyrène.....            | 95 |
| II-18-Le polystyrène et l'environnement.....               | 96 |
| II-18-1-Effet sur la couche d'ozone.....                   | 97 |
| II-18-2-Risque sur la santé.....                           | 97 |
| II-19-Inconvénients du polystyrène.....                    | 97 |
| II-20-Conclusion .....                                     | 97 |

## Chapitre III : Conception et étude

|                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| III-1-Introduction.....                                                         | 99  |
| III-2-Palette ENIEM 790x640x95mm en Polystyrène Expansé (EPS-FRI-350S).....     | 100 |
| III-2-1-Présentation de la palette PSE-FRI-350S.....                            | 100 |
| III-2-2-Données techniques et caractéristiques de la palette EPS-FRI-350S.....  | 101 |
| III-2-3-Présentation du produit à emballer.....                                 | 102 |
| III-2-4-Présentation de la palette montée sur le produit (maquette 3D).....     | 102 |
| III-3-Les caractéristiques des machines de polystyrène expansé moulé.....       | 104 |
| III-4-Les machines utilisées à l'ENIEM.....                                     | 105 |
| III-4-1-Préparation de la mise en marche.....                                   | 105 |
| III-4-2-Mode de commande.....                                                   | 106 |
| III-4-3- Le tableau de commande de la machine ACE 25AR.....                     | 107 |
| III-4-4-Inter-verrouillage de pression pneumatique.....                         | 111 |
| III-5-Etude du moule pour PSE.....                                              | 112 |
| III-5-1-Paramètres du remplissage.....                                          | 113 |
| III-5-2-Système de refroidissement.....                                         | 114 |
| III-6-Conception du moule.....                                                  | 115 |
| III-6-1-Le logiciel utilisé pour la conception du moule.....                    | 115 |
| III-6-2-Les fonctions d'un moule.....                                           | 115 |
| III-6-2-1-Fonction mise en forme.....                                           | 116 |
| III-6-2-2-Fonction alimentation.....                                            | 117 |
| III-6-2-3-Fonction refroidissement.....                                         | 117 |
| III-6-2-4-Fonction éjection.....                                                | 118 |
| III-6-3-Vue des deux parties partie fixe (PF) et partie mobile (PM) du moule... | 119 |
| III-6-4-Vue éclatée du moule.....                                               | 120 |

## Sommaire

---

|                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------|-----|
| III-7-Présentation des éléments constituant l'outillage..... | 121 |
| III-7-1-Les chargeuses.....                                  | 121 |
| III-7-2-Les Ejecteurs.....                                   | 123 |
| III-7-3-Les serpentins.....                                  | 124 |
| III-7-4-Les brides et les bague de centrages.....            | 125 |
| III-8-Choix des matériaux.....                               | 127 |
| III-8-1-Aluminium et Ses Alliages.....                       | 127 |
| III-8-2-Cuivre et alliages.....                              | 128 |
| III-9-Partie calcul.....                                     | 128 |
| III-9-1-Masse de matière mise en œuvre.....                  | 128 |
| III-9-2-Pression de moulage.....                             | 129 |
| III-9-3-Résistance des éléments du moule.....                | 129 |
| III-9-3-1-Condition de résistance au matage.....             | 129 |
| III-9-3-2-Calcul de résistance des vis.....                  | 131 |
| III-10-Simulation numérique.....                             | 134 |
| III-10-1-Le code de calcul par éléments finis ABAQUS.....    | 134 |
| III-10-1-1-Définition.....                                   | 134 |
| III-10-1-2-ABAQUS/Standard (Implicite).....                  | 135 |
| III-10-1-3-ABAQUS/Explicite.....                             | 135 |
| III-10-2-Simulation.....                                     | 135 |
| III-11-conclusion.....                                       | 140 |
| Conclusion générale.....                                     | 142 |
| Perspectives.....                                            | 143 |
| Bibliographie.....                                           | 145 |
| Annexe A : Le code de calcul par éléments finis ABAQUS.....  | 147 |

# Liste des figures

| N° de la figure   | Titre de la figure                                                                                                                                                                                                                                            | N° de la page |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>Chapitre I</b> |                                                                                                                                                                                                                                                               |               |
| Figure I.1.       | Polymérisation des monomères en polymères.....                                                                                                                                                                                                                | 32            |
| Figure I.2.       | Formation du plastique.....                                                                                                                                                                                                                                   | 33            |
| Figure I.3.       | Classification des architectures macromoléculaires.....                                                                                                                                                                                                       | 34            |
| Figure I.4.       | Copolymère et homopolymère                                                                                                                                                                                                                                    | 34            |
| Figure I.5.       | Courbes contrainte-déformation typiques de polymères en traction: 1- polymère fragile( $T < T_g$ )-2- polymère ductile ( $T < T_g$ )-3- élastomère ou caoutchouc ( $T > T_g$ ).....                                                                           | 43            |
| Figure I.6.       | Evolutions typiques du module d'Young en fonction de la température pour les polymères thermoplastiques : 1- un polymère amorphe – 2- un polymère semi-cristallin. $T_g$ désigne la température de transition vitreuse et $T_f$ la température de fusion..... | 43            |
| Figure I.7.       | Évolutions schématiques du volume massique $V_m$ et du module de Young $E$ d'un polymère en fonction de la température.....                                                                                                                                   | 45            |
| Figure I.8.       | Évolution schématique du module de Young $E$ d'un polymère en fonction de la température, pour divers taux de réticulation.....                                                                                                                               | 46            |
| Figure I.9.       | Évolution schématique du comportement en traction d'un polymère en fonction de la température ou de la vitesse de traction.....                                                                                                                               | 46            |
| Figure I.10.      | Structure d'une mousse.....                                                                                                                                                                                                                                   | 48            |
| <b>CHAPITRE 2</b> |                                                                                                                                                                                                                                                               |               |
| Figure II.2.      | Polystyrène sous sa forme commerciale.....                                                                                                                                                                                                                    | 58            |
| Figure II.2.      | Modèle pelote bâtonnet de Polystyrène                                                                                                                                                                                                                         | 58            |
| Figure II.3.      | Polymérisation du monomère de styrène en polystyrène.....                                                                                                                                                                                                     | 59            |
| Figure II.4.      | Code d'identification du polystyrène.....                                                                                                                                                                                                                     | 60            |
| Figure II.5.      | Polystyrène expansé (PSE).....                                                                                                                                                                                                                                | 61            |
| Figure II.6.      | Polystyrène expansé moulé (PSE-M).....                                                                                                                                                                                                                        | 62            |
| Figure II.7.      | Polystyrène expansé extrudé (PSE-X).....                                                                                                                                                                                                                      | 62            |
| Figure II.8.      | Styrène monomère (C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> ).....                                                                                                                                                                                                        | 65            |
| Figure II.9.      | Unité de fabrication du polystyrène expansible.....                                                                                                                                                                                                           | 66            |
| Figure II.10.     | Motif du polystyrène expansé.....                                                                                                                                                                                                                             | 66            |
| Figure II.11.     | La matière première dans des cartons de grande capacité.....                                                                                                                                                                                                  | 68            |
| Figure II.12.     | Unité de fabrication du polystyrène expansé moulé.....                                                                                                                                                                                                        | 68            |
| Figure II.13.1.   | Préexpandeur a fonctionnement continue.....                                                                                                                                                                                                                   | 69            |
| Figure II.13.2.   | Préexpandeur à fonctionnement continue utilisé à l'ENIEM.....                                                                                                                                                                                                 | 69            |
| Figure II.14.     | Préexpandeur a fonctionnement discontinu.....                                                                                                                                                                                                                 | 69            |
| Figure II.15.     | Courbes d'expansion de PSE.....                                                                                                                                                                                                                               | 70            |
| Figure II.16.     | Le stockage du polystyrène dans les silos à l'ENIEM.....                                                                                                                                                                                                      | 71            |
| Figure II.17.     | Moule à bloc de PES et installation de vide.....                                                                                                                                                                                                              | 72            |
| Figure II.18.     | Cycle de moulage d'un bloc de polystyrène expansé (PSE).....                                                                                                                                                                                                  | 73            |
| Figure II.19.     | Moulage en forme du polystyrène expansé (PSE).....                                                                                                                                                                                                            | 74            |
| Figure II.20.     | Résistance industriel pour la découpe du PSE-M utilisée par l'ENIEM.....                                                                                                                                                                                      | 77            |
| Figure II.31.     | Extrusion de plaques de polystyrène expansé (PSE).....                                                                                                                                                                                                        | 77            |
| Figure II.22      | Structure alvéolaire du polystyrène expansé moulé (grossissement de 50 fois la taille initial).....                                                                                                                                                           | 79            |

## Liste des figures

---

|                  |                                                                                                     |     |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure II.23.    | Influence de la masse volumique apparente du PSE-M sur ces propriétés mécaniques.....               | 80  |
| Figure II.24     | La variation de la conductivité thermique du PSE-M à 10 °C en fonction de la masse volumique.....   | 81  |
| Figure II.25.    | Différents produits selon le type de PS utilisé.....                                                | 94  |
| CHAPITRE 3       |                                                                                                     |     |
| Figure III.4.    | La conception 3D de la palette avec le logiciel SOLIDWORKS.....                                     | 100 |
| Figure III.5.    | Le réfrigérateur ENIEM série 350S.....                                                              | 102 |
| Figure III.3.    | Le produit (réfrigérateur 350S) placé sur la palette EPS-FRI350S.....                               | 102 |
| Figure III.4.    | Vue générale de l'expandeur ACE 25 AR.....                                                          | 105 |
| Figure III.5.    | Tableau de commande de la machine ACE 25 AR de l'ENIEM.....                                         | 106 |
| Figure III.6.    | Ensemble d'étapes de la machine ACE AR25 ENIEM.....                                                 | 108 |
| Figure III.7.    | Liste des étapes de moulage pour PSE.....                                                           | 108 |
| Figure III.8.    | Les réglages de temps pour chaque étape du procédé.....                                             | 109 |
| Figure III.9.    | Le tableau de commandes des temps des étapes du procédé                                             | 109 |
| Figure III.10.   | Les pressions nécessaires au fonctionnement de la machine ACE AR25.....                             | 111 |
| Figure III.11.   | Exemple d'une pièce moulé dans les normes et moulé défectueuse.....                                 | 111 |
| Figure III.12.   | Paramètres optimales pour la conception d'un moule à injection.....                                 | 112 |
| Figure III.13.   | Serpentin de refroidissement à eau.....                                                             | 114 |
| Figure III.14.   | Tuyère d'aération et vaporisation                                                                   | 114 |
| Figure III.15.   | Exemple d'un montage du serpentin sur un moule, et indication des voies d'air.....                  | 114 |
| Figure III.16.1. | Forme non dépouillée.....                                                                           | 116 |
| Figure III.16.2. | Forme dépouillée.....                                                                               | 116 |
| Figure III.17.   | Partie fixe du moule en 3D conçu par SolidWorks.....                                                | 119 |
| Figure III.18.   | Partie mobile du moule en 3D conçu par SolidWorks.....                                              | 119 |
| Figure III.19.   | Vue en 3D du moule conçu par SolidWorks.....                                                        | 120 |
| Figure III.20.   | Chargeuse réelle et en 3d conçu par SolidWorks.....                                                 | 121 |
| Figure III.21.   | Exemple d'une chargeuse et son emplacement sur un expandeur industriel ENIEM.....                   | 121 |
| Figure III.22.1. | Ejecteur conçu par SolidWorks.....                                                                  | 122 |
| Figure III.22.2. | Ejecteurs places sur la partie fixe.....                                                            | 122 |
| Figure III.23.1. | Coupe horizontale du moule fermé en 3D conçu par SolidWorks.....                                    | 123 |
| Figure III.23.2. | Vue complète du moule fermé en 3D conçu par SolidWorks.....                                         | 123 |
| Figure III.24.   | Coupe intérieur du moule après fermeture.....                                                       | 124 |
| Figure III.25.   | Le serpentin (régulateur de la température) conçu par SolidWorks.....                               | 125 |
| Figure III.26.   | Une bride conçue par SolidWorks, et une bride réelle.....                                           | 125 |
| Figure III.27.   | Bague de centrage conçue par SolidWorks et une bague de centrage réelle.....                        | 126 |
| Figure III.28.   | Emplacement de la bague de centrage et de la bride sur la plaque porte chargeuses et éjecteurs..... | 126 |

## Liste des figures

---

|                |                                                                                                    |     |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure III.29. | Zone d'application de la charge.....                                                               | 135 |
| Figure III.30. | Les conditions aux limites imposées sur la palette en polystyrène<br>expansé.....                  | 136 |
| Figure III.31. | Maillage adopté pour la palette.....                                                               | 136 |
| Figure III.32. | Aperçu des déplacements engendrés à l'intérieur de la structure de la<br>palette EPS-FRI-350S..... | 137 |
| Figure III.33. | Répartition des déformations et leurs intensités sur la palette EPS-<br>FRI-350S.....              | 138 |
| Figure III.34. | Les contraintes de Van Mises.....                                                                  | 139 |
| Figure III.35. | Les réactions de la palette.....                                                                   | 139 |

# Organismes et normalisation

---

## Organismes

Association of Plastics Manufacturers in Europe APME

- Association pour la Certification des Matériaux Isolants ACERMI
- European Manufacturers of Expanded Polystyrene EUMEPS
- Syndicat National des Plastiques Alvéolaires SNPA
- Syndicat Professionnel des Producteurs de Matières Plastiques SPMP

Sont données ci-après les normes internationales et les normes françaises applicables au polystyrène expansé.

## Normalisation

### - International Organization for Standardization (ISO) :

- **ISO 844** 1978 Plastiques alvéolaires. Essai de compression des matériaux rigides.
- **ISO 845** 1988 Caoutchoucs et plastiques alvéolaires. Détermination de la masse volumique apparente.
- **ISO 1209** 1990 Plastiques alvéolaires rigides.
  - Partie 1 : Essai de flexion
  - Partie 2 : Détermination des propriétés de flexion.
- **ISO 1663** 1981 Plastiques alvéolaires. Détermination du taux de transmission de la vapeur d'eau des matériaux rigides.
- **ISO 1922** 1981 Plastiques alvéolaires. Détermination de la résistance au cisaillement des matériaux rigides.
- **ISO 1926** 1979 Plastiques alvéolaires. Détermination des caractéristiques de traction des matériaux rigides.
- **ISO 2581** 1975 Plastiques alvéolaires rigides. Détermination de la conductivité thermique apparente au moyen d'un fluxmètre thermique.
- **ISO 2796** 1986 Plastiques alvéolaires rigides. Essai de stabilité dimensionnelle.
- **ISO/TR 2799** Plastiques alvéolaires. Détermination de la température à laquelle un effort de compression produit une déformation permanente fixée des matériaux rigides.
- **ISO 2896** 1987 Plastiques alvéolaires rigides. Détermination de l'absorption d'eau.
- **ISO 3582** 1978 Matières alvéolaires à base de plastiques ou de caoutchoucs. Méthode de laboratoire pour la détermination du comportement au feu de petites éprouvettes soumises, en position horizontale, à une flamme de faible intensité.
- **ISO 4651** 1988 Caoutchoucs et plastiques alvéolaires. Détermination de la capacité d'amortissement dynamique.

## Organismes et normalisation

---

- **ISO 4897** 1985 Plastiques alvéolaires. Détermination du coefficient de dilatation linéique thermique des plastiques alvéolaires rigides aux températures inférieures à l'ambiante.
  - **ISO 4898** 1984 Plastiques alvéolaires. Spécifications des matériaux rigides utilisés dans l'isolation thermique des bâtiments.
  - **ISO 7616** 1986 Plastiques alvéolaires rigides. Détermination du fluage sous compression dans des conditions spécifiées de charge et de température.
  - **ISO 7850** 1986 Plastiques alvéolaires rigides. Détermination du fluage en compression.
- **Association française de normalisation (AFNOR) :**

Les essais normalisés applicables aux matériaux alvéolaires sont regroupés dans la **sous-classe T 56** des normes AFNOR. En voici les principales :

- **NF T 56-001 10.80** Vocabulaire des plastiques alvéolaires souples et rigides (éqv. ISO 472).
- **NF T 56-101 12.76** Produits alvéolaires à base d'élastomères ou de matières plastiques. Essai de compression des matériaux rigides (éqv. ISO 844).
- **NF T 56-102 12.76** Produits alvéolaires à base d'élastomères ou de matières plastiques. Essai de flexion des matériaux rigides (éqv. ISO 1209).
- **NF T 56-103 12.79** Matières alvéolaires à base de caoutchouc ou de matières plastiques. Détermination des caractéristiques de traction des matériaux alvéolaires rigides (éqv. ISO 1926).
- **[N1] NIMP 15** (ISPM 15 en anglais) signifie Norme Internationale de Mesures Phytosanitaires n° 15. Son adoption définitive le 23 août 2003 a pour objectif d'uniformiser les mesures à appliquer afin d'éviter l'infestation des forêts d'un pays importateur par des nuisibles présents dans le bois des emballages
- **[N2] NF P 92-507** Les conditions dans lesquelles il est fait usage des résultats d'essais pour établir le classement en ce qui concerne la réaction au feu.

# Liste des tableaux

---

| N° du tableau         | Titre du tableau                                                                        | N° de la page |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>CHAPITRE 1</b>     |                                                                                         |               |
| <b>Tableau I.1.</b>   | Classification et usages des thermoplastiques.....                                      | 36            |
| <b>Tableau I.2.</b>   | Caractéristiques et usages des thermdurcissables.....                                   | 37            |
| <b>Tableau I.3.</b>   | Caractéristiques et usages des élastomères.....                                         | 38            |
| <b>Tableau I.4.</b>   | Valeurs courantes pour des propriétés physiques des polymères usuels.....               | 41            |
| <b>Tableau I.5.</b>   | Certains polymères sous l'effet du feu.....                                             | 42            |
| <b>Tableau I.6.</b>   | Propriétés mécaniques de certains polymères.....                                        | 44            |
| <b>CHAPITRE 2</b>     |                                                                                         |               |
| <b>Tableau II.1.</b>  | Principaux polymères styréniques.....                                                   | 67            |
| <b>Tableau II.2.</b>  | Période de séchage pour le polystyrène expansé moulé.....                               | 75            |
| <b>Tableau II.3.</b>  | Résistances mécaniques pour différentes masses volumiques apparentes du PSE-M.....      | 79            |
| <b>Tableau II.4.</b>  | $\Delta\lambda$ en fonction de la variation de la masse volumique $\rho$ .....          | 80            |
| <b>Tableau II.5.</b>  | Perméabilité à la vapeur d'eau du PSE-M.....                                            | 81            |
| <b>Tableau II.6.</b>  | Résistance chimique du polystyrène expansé.....                                         | 82            |
| <b>Tableau II.7.</b>  | Comparaison des avantages et des inconvénients du PES et du XPS.....                    | 84            |
| <b>Tableau II.8.</b>  | Consommation de matière et d'énergie pour la production d'une tonne de polystyrène..... | 90            |
| <b>Tableau II.9.</b>  | Caractéristiques polymères stériques.....                                               | 92            |
| <b>CHAPITRE 3</b>     |                                                                                         |               |
| <b>Tableau III.1.</b> | La charge en fonction de la masse volumique pour le PSE-M.....                          | 101           |
| <b>Tableau III.2.</b> | Fiche technique de certaines machines à expansion du polystyrène expansé.....           | 104           |
| <b>Tableau III.3.</b> | Conditions de mise en marche de la machine ACE 25AR.....                                | 105           |
| <b>Tableau III.4.</b> | Outillages du moule.....                                                                | 115           |
| <b>Tableau III.5.</b> | Terminologie des éléments constituant l'outillage.....                                  | 120           |
| <b>Tableau III.6.</b> | Choix des matériaux.....                                                                | 127           |
| <b>Tableau III.7.</b> | Calculs du poids et du volume de chaque pièce.....                                      | 132           |

## Liste des symboles

---

|                                 |                                                            |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------|
| <b>2D :</b>                     | Deux dimensions.                                           |
| <b>3D :</b>                     | Trois dimensions.                                          |
| <b><math>\alpha</math>-MS :</b> | Alpha Méthylstyrène.                                       |
| <b>ABS :</b>                    | Styrène butadiène + styrène acrylonitrile.                 |
| <b>ACM :</b>                    | Polyacrylates.                                             |
| <b>ACE 25AR :</b>               | Machine (expanseur grand model) utilisé par l'ENIEM.       |
| <b>ACE 7AR :</b>                | Machine (expanseur petit model) utilisé par l'ENIEM.       |
| <b>AEM :</b>                    | Ethylène acrylate de méthyle.                              |
| <b>(AU, EU) :</b>               | Polyuréthanes malaxables.                                  |
| <b>B :</b>                      | Angle de dépouille intérieure.                             |
| <b>BASF, Dow :</b>              | Compagnies américaine de fabrication du polystyrène.       |
| <b>BD :</b>                     | Basse densité.                                             |
| <b>BR :</b>                     | Polybutadiène.                                             |
| <b>C5H12 :</b>                  | Composition chimique du gaz pentane.                       |
| <b>C6H5 :</b>                   | Structure chimique du phényle.                             |
| <b>C6H5CH — CH2 :</b>           | Composition chimique du styrène.                           |
| <b>(C8H8)<sub>n</sub> :</b>     | (Composition chimique du polystyrène.                      |
| <b>CAO :</b>                    | Conception assistée par ordinateur.                        |
| <b>CD :</b>                     | Compact Disc.                                              |
| <b>CH3 :</b>                    | Composition chimique du méthyle.                           |
| <b>CH2 :</b>                    | Monomère de styrène.                                       |
| <b>Cl :</b>                     | Chlore.                                                    |
| <b>CLIPS :</b>                  | Clear Impact Polystyrène.                                  |
| <b>CM, CSM :</b>                | Polyéthylènes chlorés et chlorosulfonés.                   |
| <b>(CO, ECO, GECO) :</b>        | Epichlorhydrines.                                          |
| <b>CO :</b>                     | Oxyde de carbone.                                          |
| <b>CO<sub>2</sub> :</b>         | Dioxyde de carbone.                                        |
| <b>CP :</b>                     | Compound ou premix.                                        |
| <b>Crosslinked polymers :</b>   | Polymères réticulés.                                       |
| <b>D :</b>                      | Diamètre.                                                  |
| <b>DN :</b>                     | Diamètre nominale.                                         |
| <b>DP :</b>                     | Degré de polymérisation.                                   |
| <b>DVD :</b>                    | Digital Versatile Disc.                                    |
| <b>E :</b>                      | Module d'Yong.                                             |
| <b>ECO :</b>                    | ECOPSE, une marque commerciale d'ELIPSO.                   |
| <b>ENIEM :</b>                  | L'Entreprise Nationale de l'Industrie de l'Electroménager. |
| <b>EPM, EPDM :</b>              | Co- ou terpolymères d'éthylène propylène et diène.         |
| <b>EPS-FRI-350S :</b>           | Expanded polysterene-freeze-350S.                          |
| <b>EPDM :</b>                   | [poly (éthylène / propylène / diène monomère)].            |
| <b>EVM :</b>                    | Copolymères éthylène acétate de vinyle.                    |
| <b>F :</b>                      | Force.                                                     |
| <b>FAO :</b>                    | Fabrication assistée par ordinateur.                       |
| <b>FDES :</b>                   | Fiches de Déclarations Environnementales et Sanitaires.    |

## Liste des symboles

---

|                            |                                                          |
|----------------------------|----------------------------------------------------------|
| <b>F-M (M-F) :</b>         | Partie fixe-partie mobile (partie mobile-partie fixe).   |
| <b>FKM :</b>               | Elastomères fluorés.                                     |
| <b>GPPS :</b>              | General Purpose Polystyrène.                             |
| <b>H :</b>                 | Hydrogène.                                               |
| <b>HNBR :</b>              | Caoutchoucs nitrile hydrogénés.                          |
| <b>HIPS :</b>              | High Impact Polystyrène.                                 |
| <b>HD :</b>                | Haute densité.                                           |
| <b>HCFC :</b>              | Hydrochlorofluorocarbures.                               |
| <b>IR :</b>                | Polyisoprène synthétique.                                |
| <b>(IIR, BIIR, CIIR) :</b> | Copolymères d'isobutylène isoprène, chlorés ou bromés.   |
| <b>Kgf :</b>               | Kilogramme force.                                        |
| <b>[K] :</b>               | Coefficient de sécurité.                                 |
| <b>KIC :</b>               | Facteur de concentration de contrainte.                  |
| <b>M :</b>                 | Masse.                                                   |
| <b>M1 :</b>                | Matériaux dits "non inflammables".                       |
| <b>M4 :</b>                | Matériaux dits "facilement inflammables".                |
| <b>MD :</b>                | Moyenne densité.                                         |
| <b>MF :</b>                | Aminoplastes.                                            |
| <b>N :</b>                 | Nombre de vis.                                           |
| <b>n :</b>                 | Nombre de sections cisillées.                            |
| <b>NAPHTA :</b>            | Liquide transparent issue de la distillation du pétrole. |
| <b>NBR :</b>               | Copolymères de butadiène acrylonitrile.                  |
| <b>NR :</b>                | Polyisoprène.                                            |
| <b>P :</b>                 | Pression.                                                |
| <b>PJ :</b>                | Plan de joint.                                           |
| <b>PPC :</b>               | Principales of Polymer Chemistry.                        |
| <b>PE :</b>                | Polyéthylène.                                            |
| <b>PP :</b>                | Polypropylène.                                           |
| <b>PS :</b>                | Polystyrène.                                             |
| <b>PC :</b>                | Polycarbonate.                                           |
| <b>PET :</b>               | Polyesters et polyéthylène téréphtalate.                 |
| <b>POM :</b>               | Polyacétals ou polyoxyméthylène.                         |
| <b>PCV :</b>               | Vinyle.                                                  |

## Liste des symboles

---

|                                        |                                                                    |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| <b>PA :</b>                            | Polyamides.                                                        |
| <b>PMMA :</b>                          | Polyméthacrylate de méthyle.                                       |
| <b>PUR :</b>                           | Polyuréthanes.                                                     |
| <b>PF :</b>                            | Phénoplastes.                                                      |
| <b>PF :</b>                            | Partie fixe.                                                       |
| <b>PM :</b>                            | Partie mobile.                                                     |
| <b>PSE :</b>                           | Polystyrène expansé.                                               |
| <b>PSE-E (XPS) :</b>                   | Polystyrène expansé extrudé.                                       |
| <b>PSE-M :</b>                         | Polystyrène expansé moulé.                                         |
| <b>Re :</b>                            | Résistance élastique.                                              |
| <b>Rpe :</b>                           | Résistance pratique élastique.                                     |
| <b>S :</b>                             | Coefficient de sécurité.                                           |
| <b>S :</b>                             | Surface.                                                           |
| <b>S'' :</b>                           | volume d'un cylindre.                                              |
| <b>SBR :</b>                           | Copolymère styrène-butadiène.                                      |
| <b>SW-3</b>                            | Sélecteur de mode de commande.                                     |
| <b>Styrofoam :</b>                     | Mousse expansée.                                                   |
| <b>T<sub>f</sub> (θ<sub>f</sub>) :</b> | Température de fusion.                                             |
| <b>T<sub>g</sub> (θ<sub>v</sub>) :</b> | Température de transition vitreuse (glass transition temperature). |
| <b>TGV :</b>                           | Voyage à grande vitesse.                                           |
| <b>V :</b>                             | Volume.                                                            |
| <b>V<sub>m</sub> :</b>                 | Volume massique.                                                   |
| <b>VAPO-CRAQUAGE :</b>                 | Procédé pétrochimique.                                             |
| <b>(VMQ, FVMQ) :</b>                   | Caoutchoucs de silicone.                                           |
| <b>ρ :</b>                             | Masse volumique.                                                   |
| <b>λ :</b>                             | Conductivité thermique.                                            |
| <b>Δλ :</b>                            | Variation de la conductivité thermique.                            |
| <b>α :</b>                             | Angle de dépouille extérieure.                                     |
| <b>§ :</b>                             | Paragraphe.                                                        |
| <b>σ :</b>                             | Contrainte.                                                        |
| <b>[τ]<sub>cis</sub> :</b>             | Contrainte admissible au cisaillement.                             |
| <b>τ :</b>                             | Contrainte au cisaillement.                                        |

## Liste des unités

---

|                                    |                                                                                                                                                       |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Pa (pascal)</b>                 | : Unité SI (Système international d'unités) de contrainte et de pression.                                                                             |
| <b>MPa (méga pascal)</b>           | : $1 \text{ MPa} = 1\,000\,000 \text{ Pa} = 1\,000\,000 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2} = 1 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ .                               |
| <b>GPa (giga pascal)</b>           | : $1 \text{ GPa} = 1\,000\,000\,000 \text{ Pa} = 1\,000\,000\,000 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2} = 1 \text{ kN}\cdot\text{mm}^{-2}$ .                    |
| <b>M (mètre)</b>                   | : Unité SI de longueur.                                                                                                                               |
| <b>mm (millimètre)</b>             | : $1 \text{ mm} = 1 \times 10^{-3} \text{ m} = 0,001 \text{ m}$ .                                                                                     |
| <b>M<sup>2</sup> (mètre carré)</b> | : Unité de mesure d'aire.                                                                                                                             |
| <b>M<sup>3</sup> (mètre cube)</b>  | : Unité de mesure de volume.                                                                                                                          |
| <b>°C (degré Celsius)</b>          | : Unité de l'échelle de température Celsius.                                                                                                          |
| <b>° (degré)</b>                   | : Unité d'angle.                                                                                                                                      |
| <b>W (watt)</b>                    | : Unité internationale de puissance ou de flux énergétique (dont le flux thermique, $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$ , Kilowatt (kW), soit 1 000 watts). |
| <b>J (joule)</b>                   | : Unité pour quantifier l'énergie.                                                                                                                    |
| <b>Seconde(s).</b>                 | : Unité de mesure du temps                                                                                                                            |
| <b>Pa.s</b>                        | : Unité de viscosité pascal * seconde.                                                                                                                |

## Résumé

---

Ce stage de fin d'étude s'est déroulé au sein de l'entreprise ENIEM, qui est une entreprise spécialisée dans la production des produits électroménagers (réfrigérateurs, climatiseurs, cuisinières,...etc.). Spécifiquement, nous avons effectué ce stage dans un bureau d'étude, l'unité de prestation technique (EPT), parmi des ingénieurs et techniciens spécialisés dans l'innovation, la conception et la maintenance des systèmes de production.

Ce projet est formé de deux parties :

La première partie consiste à étudier et analyser une nouvelle matière plastique, qui est le polystyrène (PS), pour le moulage d'une nouvelle palette d'un réfrigérateur (350S). L'ENIEM veut optimiser sa production en trouvant un plastique de moulage ayant une disponibilité et de meilleures caractéristiques afin de gagner en coût et éliminer le surplus d'emballage attribués auparavant à ces produits comme les palettes en bois.

La deuxième partie de notre travail est basé sur une mission d'optimisation et de changement d'équipements pour la machine qui est l'expandeur ACE 25 AR, cette mission consiste en la conception d'un nouveau moule pour la palette EPS-FRI-350S, ce nom que nous-même avons attribué pour cette palette en polystyrène expansé pour le réfrigérateur 350S.

Ce projet nous a permis de concevoir et d'étudier un nouveau moule pour l'entreprise ENIEM qui pourra bénéficier d'un gain en temps et en matières.

Enfin, ce stage nous a ouvert la possibilité d'avoir une vision globale du métier d'ingénieur en menant une étude de conception ainsi que la découverte d'une nouvelle matière plastique très prometteuse dans le futur pour les entreprises Algériennes.

Nous avons pu aborder deux aspects de ce projet : un aspect technique et un aspect scientifique.

# Abstract

---

This end-of-course internship took place on the site of the company ENIEM, which is specialized in the production of household appliances products (refrigerators, air conditioners, cookers...etc.), specifically we carried out this internship in an technical service unit (EPT), design office, with the breasts of engineers and technicians specialized in innovation, design, and maintenance of production systems.

This project is divided into two parts:

The first part consists in the study and analysis of a new plastic material which is polystyrene (PS), for the molding of a new pallet for the refrigerator (350S). ENIEM wants to optimize its production by finding a plastic molding having an availability and better characteristics in order to gain in cost and the elimination of surplus packaging previously allocated to these products such as wooden pallets.

The second part of our internship is based on a mission of optimization and change of equipment for the machine which is the expander ACE 25 AR, this mission consists in the design of a new mold for the pallet EPS-FRI-350S, we assigned this name to this expanded polystyrene pallet for the 350S refrigerator.

This project allowed us to design and study a new mold for the company ENIEM, which can benefit from a saving of time and materials.

Finally, this internship permitted to have a global version of the engineering profession by conducting a design study, also the discovery of a very promising new plastic material in the future for Algerian companies.

In this work, were able to discuss two aspects of this project: a technical aspect and a scientific aspect.

## I-Historique

L'entreprise Nationale des industries de l'électroménager (ENIEM) est issue de la restructuration organique de la SONELEC (société nationale de fabrication et de montage et de commercialisation des produits électroménagers) et disposait à sa création de :

- Complexe d'Appareils Ménagers (CAM) de TIZI OUZOU, entrée en production en juin 1977.
- Unité Lampes de Mohamma (ULM), entrée en production en février 1979.

En 1989, l'entreprise ENIEM est devenue une société par actions au capital De 40.000.000DA. Avec un capital social de 10.279.800.000 DA, détenu en totalité par la société de gestion de participation «Industries Electrodomestique» (INDELEC). Son siège social est à TIZI OUZOU. Ses unités de production issues de l' ex CAM sont implantées au niveau de la zone industrielle «Aissat idir». Son unité commerciale est située également à la zone industrielle «Aissat Idir». Sa filiale lampes est implantée à Mohamma.

Le champ d'activité de l'entreprise ENIEM consiste en la conception, la fabrication et la commercialisation des produits électroménagers, ainsi que la prise en charge de la fonction service après-vente.

Actuellement, l'entreprise ENIEM est constituée de :

- La direction générale (DG).
- L'unité froid (UF).
- L'unité cuisson (UCuis).
- L'unité climatisation (UCL).
- L'unité prestation technique (UPT).
- L'unité commerciale (UC).
- L'unité sanitaire (US).
- La filiale FILAMP.

L'effectif de l'entreprise (hors FILAMP et l'unité sanitaire) est de 2830 agents au 31 décembre 2003

L'entreprise ENIEM aujourd'hui a une importante gamme de production, ces produits sont :

Les réfrigérateurs petit et grand modèle (RPM et RGM).

- Le congélateur vertical.
- Le combiné.
- Cuisinières à 4 et à 5 feux.
- Climatiseurs

Ces produits sont destinés au grand public et la distribution se fait par des agents agréés dont la liste se trouve au niveau de l'unité commerciale (Département vente).

## II-Situation géographique

Le complexe, premier fabricant national d'appareils ménagers, peut être classé parmi les plus grandes unités de productions industrielles du pays. Son siège social se situe au chef-lieu de la Wilaya de Tizi-Ouzou, à proximité de l'ancienne gare routière. La superficie totale du complexe s'étale sur 5,5 Hectares.

Les unités de production Froid, Cuisson et Climatisation sont implantées à la zone industrielle Aissat Idir de Oued-Aissi, distante de 7 km du chef-lieu de la wilaya. La filiale sanitaire est installée à Miliana, wilaya d'Ain Defla et la filiale lampe à Mohammedia, wilaya de Mascara.

## III-Objet social et champ d'activité

ENIEM est leader de l'Electroménager en Algérie, elle possède des capacités de production et une expérience de plus 30 ans dans la fabrication et le développement dans les différentes branches de l'électroménager ; notamment :

- Les appareils ménagers domestiques.
- Les appareils des collectivités.
- Les lampes d'éclairage.
- Les produits sanitaires.

Elle assure également la commercialisation et le service après-vente de ses appareils.

## IV-principales missions et activités de l'entreprise

### IV-1-Direction générale

La direction générale est responsable de la stratégie et du développement de l'entreprise. Elle exerce son autorité hiérarchique et fonctionnelle sur l'ensemble des directions et des unités.

### IV-2-Unité froid

La mission globale de l'unité est de produire et développer les produits froids domestiques. Ses activités sont:

- Transformation des tôles.
- Traitement et revêtement de surface (peinture, plastification).
- Injection plastique et polystyrène.
- Fabrication de pièces métalliques.
- Isolation.
- Thermoformage.
- Assemblage.

### IV-3-Unité cuisson

La mission principale de l'unité est de produire et développer la cuisson à gaz électrique ou mixte et tout produit de technologie similaire. Ses activités sont :

- Transformation de la tôle.
- Traitement et revêtement de surface (Zingage, Chromage).

# Présentation de l'entreprise d'accueil ENIEM.

- Assemblage.

## IV-4-Unité climatiseur

La mission globale de l'unité est de développer les produits de climatisation. Ses activités sont:

- Transformation.
- Traitement et revêtement de surface (peinture).
- Assemblage.

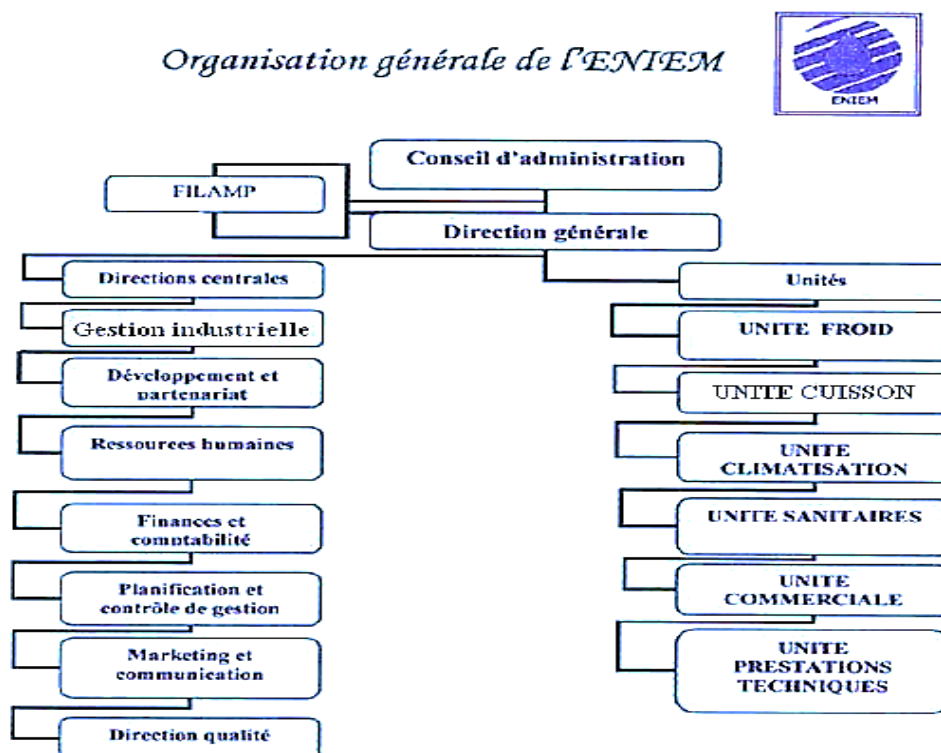
## IV-5-Unité sanitaire

L'unité sanitaire de Miliana est acquise par l'entreprise ENIEM en l'an 2000. Elle n'entre pas dans le champ de certification de l'entreprise.

La mission globale de l'unité est de produire et développer les produits sanitaires (baignoires, lavabos ...).

## IV-6-Filiale FILAMP

L'Unité Lampes de Mohamma (ULM) qui a démarré en février 1979 pour fabriquer des lampes d'éclairage domestique ainsi que des lampes de réfrigérateurs est devenue filiale à 100% ENIEM le 01/01/1997. Cette filiale est dénommée «FILAMP».



**Figure.1.** Organigramme de l'entreprise ENIEM.

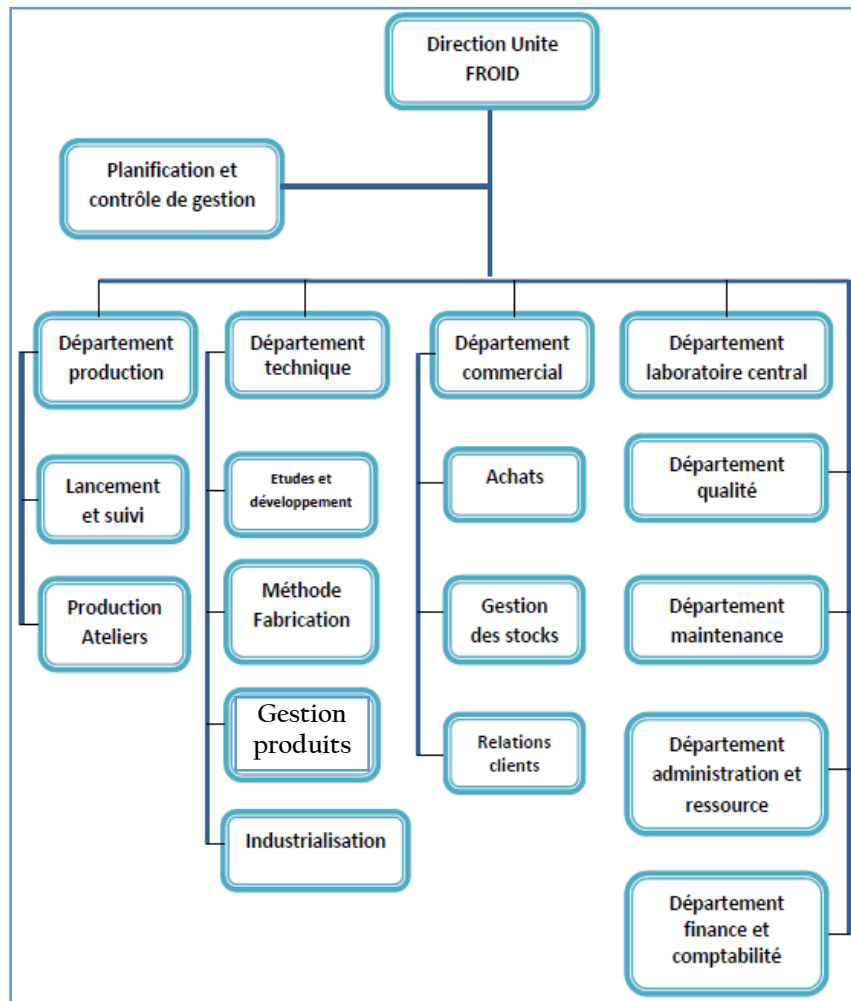


Figure.2. Organigramme de l'unité froid.

## V-Politique de l'entreprise

ENIEM est certifiée ISO 14001/2004 ENVIRONNEMENT et ISO 9001/2008 QUALITÉ.

### V-1-Politique qualité

L'entière satisfaction durable du client constitue pour l'entreprise l'objectif essentiel. Face aux enjeux économiques, l'**ENIEM** a mis en œuvre et développé un système de management de la qualité conforme au référentiel international ISO 9001/2008.

Cette politique qualité basée sur l'amélioration continue des processus se manifeste par la volonté de la Direction Générale à :

Comprendre les besoins présents et futurs de ses clients et y répondre efficacement

- en mettant à leur disposition des produits et services compétitifs.
- Développer la culture de l'entreprise et le professionnalisme de son personnel.
- Améliorer en continue l'efficacité du système de management de la qualité.

## **V-1-1-Engagement de la direction**

Pour mettre en œuvre sa politique, la Direction Générale de l'ENIEM s'engage à :

- Se conformer aux exigences légales et réglementaires en vigueur.
- Appliquer et respecter les dispositions et procédures établies.
- Fournir les ressources nécessaires à l'atteinte des objectifs.

## **V-1-2-Ses objectifs**

Pour aboutir les missions précitées, l'ENIEM se fixe les objectifs suivants :

- Accroître la satisfaction des clients.
- Améliorer les compétences du personnel.
- Réduire les rebuts.
- Augmenter la valeur de la production.
- Améliorer le chiffre d'affaire.

## **V-2-Politique environnementale**

La politique environnementale de l'ENIEM s'inscrit dans le développement durable en intégrant un management proactif dans le domaine de la protection de l'environnement. Pour y parvenir, l'ENIEM se base sur la prévention de toute pollution, la préservation des ressources, la sensibilisation et la formation, la responsabilité et l'implication de son personnel. Pour cela, l'ENIEM a décidé de s'engager dans une démarche volontaire d'amélioration continue en mettant en place un système de management environnemental selon le référentiel ISO 14001/2004. La direction générale met à disposition les moyens nécessaires à la réussite de ce projet.

### **V-2-1-Engagements**

- Respecter les exigences légales et réglementaires en vigueur.
- Prévenir et maîtriser les risques de pollutions qui peuvent être générés par ses activités.
- Améliorer la gestion des déchets (papier, emballages, consommables informatiques, déchets, des processus...).
- Rationaliser les consommations d'énergies.
- Améliorer la communication avec les parties intéressées (interne et externe).
- Continuer la formation pour améliorer la compétence du personnel.
- Continuer l'amélioration de l'efficacité du Système de Management Environnemental.
- Mener des revues de direction

### V-2-2-OBJECTIFS ET CIBLES ENVIRONNEMENTAUX

Dernièrement en 2012 l'ENIEM a fixé des objectifs et cibles environnementaux :

✓ **Objectifs** : En conformité avec sa politique environnementale, l'ENIEM se fixe pour l'année 2012 les objectifs suivants :

- L'amélioration de la gestion des déchets.
- La rationalisation de la consommation des énergies et fluides.
- La prévention des risques de pollution.
- La sensibilisation des parties intéressées.
- La formation du personnel sur l'environnement.

✓ **Cibles** :

- Réduire les déchets générés de 1%.
- Elever le niveau de tri des déchets de 2%.
- Réduire les stocks morts de 4 %.
- Ratio consommation d'eau/Production < 20 M3/tonne.
- Ratio consommation d'énergie électrique/Production < à 635 KWh/tonne.
- Ratio consommation de gaz/Production < à 1,76 kTh/tonne.
- Mesurer les rejets atmosphériques.
- Former 200 agents sur l'environnement.
- Continuer la sensibilisation des fournisseurs, agents agréés et les sous- traitants sur l'environnement.

*Introduction  
générale*

## Introduction générale

---

Les procédés de moulage par expansion tels que l'injection, l'extrusion et le moulage conventionnel associé aux emballages et l'isolation sont en plein essor et connaissent des développements sans cesse croissant.

Ces procédés sont adaptés pour assurer la transformation de plusieurs polymères, dont entre autre, le polypropylène, le polyéthylène, le polystyrène, .....et ce, pour la production de produits allégés afin de réaliser des gains substantiels de matière.

Dans le cadre de notre stage de mise en situation professionnelle au niveau de l'Entreprise Nationale de l'Industrie de l'Electroménager (ENIEM), le bureau d'études de l'unité de prestations techniques (UPT) nous a confié l'étude et la conception d'un moule pour la fabrication d'une palette de manutention en polystyrène expansé destinée aux réfrigérateurs type ENIEM série 350S.

Ainsi, pour accomplir cette mission, nous nous sommes intéressés aux matériaux polymériques et aux procédés associés.

Compte tenu de la spécificité du produit objet de l'étude et de la conception, nous avons passé en revue le procédé de moulage par expansion existant au niveau de l'ENIEM y compris la matière première utilisée usuellement.

Dans une première étape, nous avons fait une synthèse bibliographique sur le polystyrène contenant un agent gonflant et le procédé spécifique de mise en œuvre.

Dans une seconde étape, nous avons entrepris la définition du produit sur la base des paramètres de design, de résistance mécanique à l'usage et par voie de conséquence, l'aspect économique via une optimisation de la quantité de matière nécessaire pour la fabrication du produit.

Enfin, dans une troisième étape, nous avons abordé l'étude et la conception du moule en utilisant des logiciels de conception CAO et de fabrication FAO. Il reste entendu que pour les besoins de l'étude, nous avons procédé à l'évaluation et à la sélection des aciers et alliages nécessaires à la réalisation du moule.

*Chapitre I*  
*Généralités sur les*  
*polymères*

**I-1-Introduction**

Les matériaux organiques, les matières plastiques que nous appelons polymères, constituent l'une des trois grandes classes des matériaux métalliques et les céramique et verres. Les polymères sont devenus l'élément essentiel d'un nombre très important d'objets de la vie courante, ils ont souvent remplacé les substances naturelles. Ils sont présents dans de nombreux domaines industriels. Les matériaux polymères sont généralement utilisés pour leurs propriétés mécaniques particulières et leur aptitude à être mis en œuvre. Ces qualités sont étroitement liées à leur structure et il est possible, à partir d'une structure moléculaire donnée, d'imaginer la morphologie qui en découle et les propriétés qui s'y rattachent.

Compte tenu de la grande variété des polymères utilisés dans des domaines de plus en plus vastes, il nous paraît utile:

- De présenter les règles d'établissement systématique des noms chimiques permettant d'identifier de façon univoque les principaux polymères commercialisés;
- de classer ces derniers par « familles chimiques » de polymères dont la structure, donc les propriétés, sont voisines ;

Ce premier chapitre a comme objectif de définir et de représenter les polymères d'une manière générale, avec les différentes propriétés mécanique et physique et chimique sous forme de tableaux.

## I-2-Quelques définitions

### I-2-1-Définition d'un monomère

Ce sont les composés de base des polymères. Relevant de la chimie organique, ils associent par des liaisons covalentes des atomes de carbone et des atomes d'hydrogène, d'oxygène, d'azote, plus éventuellement des atomes de chlore, de fluor, de soufre, etc. Chaque atome de carbone, tétravalent, est relié aux atomes voisins par quatre liaisons covalentes, orientés dans l'espace vers les quatre sommets d'un tétraèdre régulier [1].

### I-2-2- Définition d'un polymère

Un polymère est une macromolécule formée de l'enchaînement covalent d'un très grand nombre d'unités de répétition qui dérivent d'un ou de plusieurs monomères (qui sont également appelés motifs) et préparée à partir de molécules appelées monomères. La (Figure I.2) montre un exemple d'un polymère vinylique, l'un des plus importantes classes des polymères industrielles. Dans l'unité de répétition, X est l'un des unités monofonctionnelles comme H, CH<sub>3</sub>, Cl, et C<sub>6</sub>H<sub>5</sub> (phényle) [1].

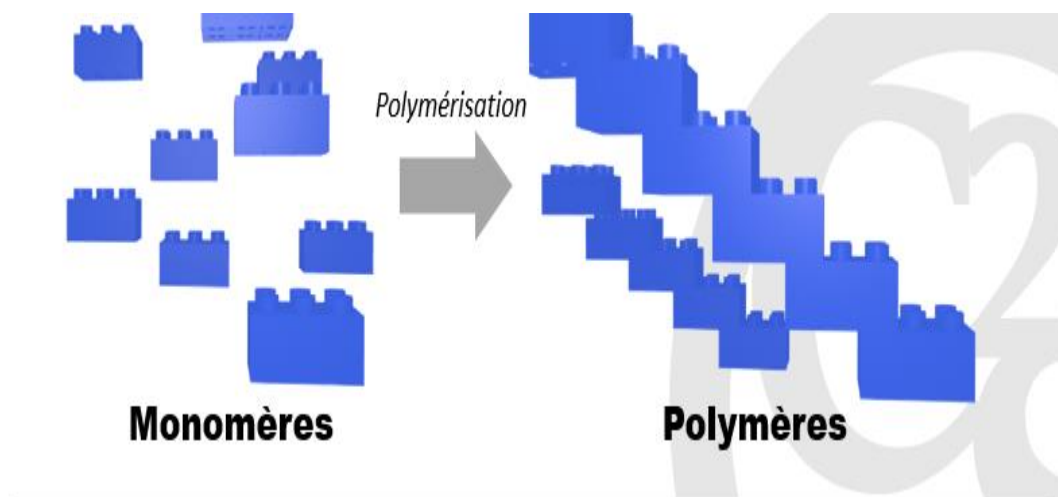


Figure I.1. Polymérisation des monomères en polymères.

### I-2-3-Définition de la Polymérisation

La polymérisation (Figure I.3), est un Processus de transformation d'un monomère, ou d'un mélange de monomères, en polymère. La polymérisation désigne une réaction chimique, fonction du temps et de la température, conduisant la matrice ou la résine à se solidifier de manière irréversible (valable uniquement pour les thermodurcissables) [1].

### I-2-4- Définition et formation du plastique

Les matières plastiques (Figure I.2) sont des matériaux organiques (issus des êtres vivants) constitués de macromolécules obtenues par polymérisation de monomères. Elles sont produites par transformation de substances naturelles, ou par synthèse directe, à partir de substances extraites du pétrole, du gaz naturel, du charbon ou d'autres matières minérales [9].

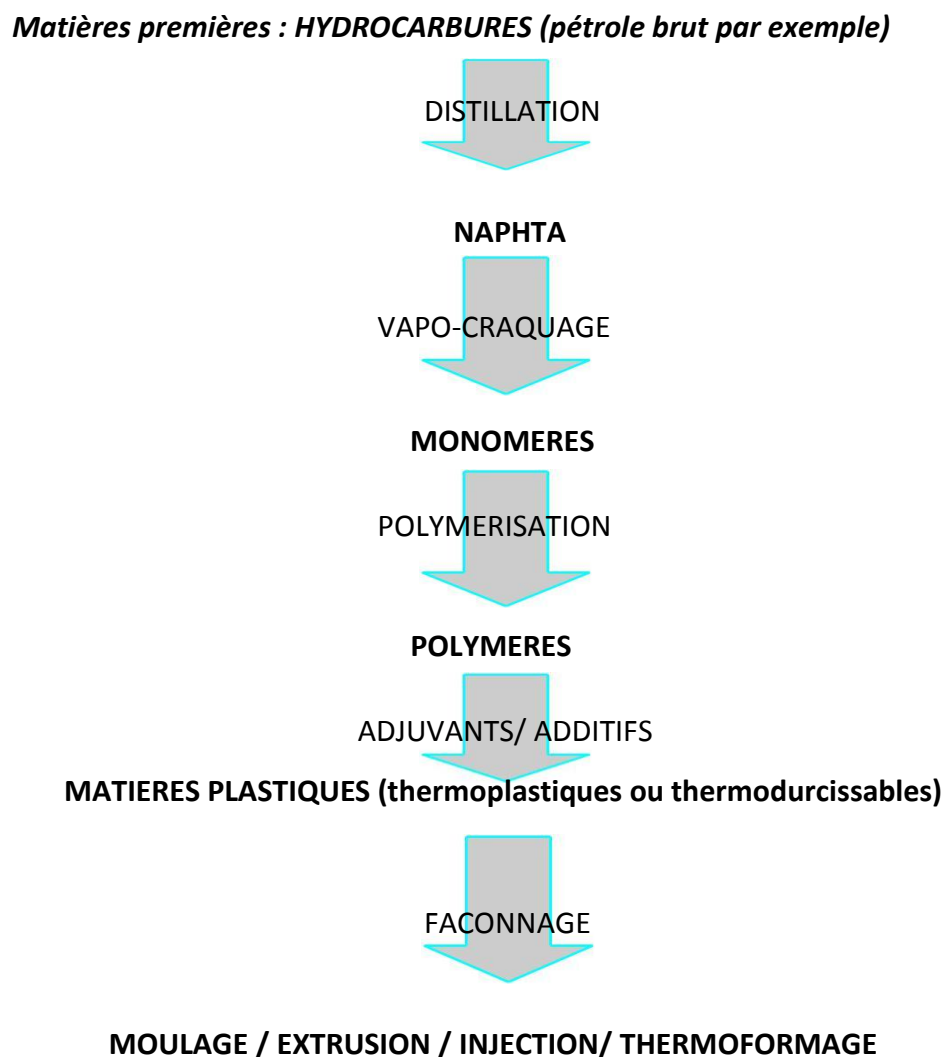


Figure I.2. Formation du plastique [9].

### I-3- Différentes classes de polymères

Plusieurs classifications des composés macromoléculaires peuvent être proposées selon qu'on choisit l'origine, le type d'architecture, la structure chimique des motifs ou le types de polymérisation, comme base de la classification [1].

#### I-3-1-Classification selon l'origine

Les polymères classés selon l'origine peuvent être [1]:

- **Des polymères naturels** : ce sont des composés organiques formant la matière vivante, comme les protéines, les acides nucléiques, la cellulose, la chitine...
- **Polymères artificiels (ou régénérés)**: des polymères obtenus par modification chimique d'un polymère naturel, exemple: méthylcellulose.
- **Des polymères synthétiques**: Ce sont les matières plastiques, les élastomères, les fibres, les adhésifs Les molécules monomères qui permettent de les obtenir n'existent pas dans la nature. Cependant, on peut remarquer que les structures réalisées par la synthèse sont souvent proches de celles des polymères naturels.

### I-3-2- Classification selon l'architecture

Les architectures macromoléculaires (Figure I.3) peuvent être divisées en quatre grandes familles : les polymères linéaires, ramifiés, réticulés et plus récemment, les polymères dendritiques [11].

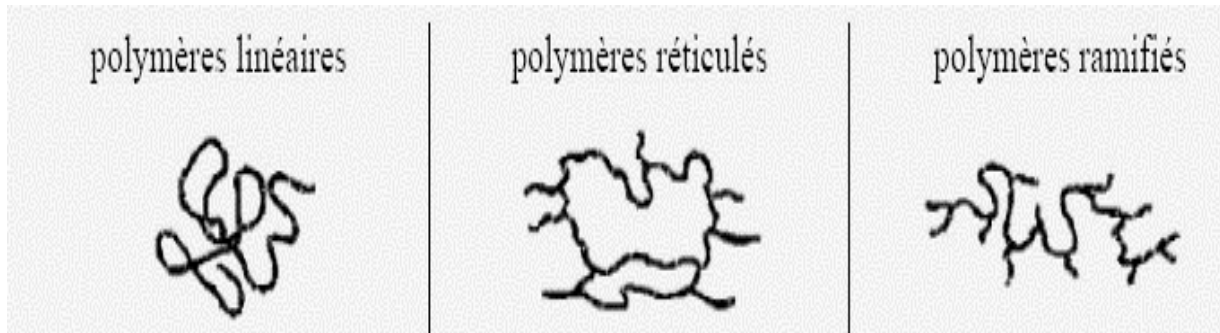


Figure I.3. Classification des architectures macromoléculaires [11].

#### I-3-2-1- Les polymères d'architecture linéaire

Sont essentiellement obtenus par des techniques de polymérisation en chaîne (« vivante », depuis de nombreuses années, ou radicalaire contrôlée, plus récemment) ou des réactions de polymérisation par étapes ou polycondensation (entre monomères strictement difonctionnels). [1]

#### I-3-2-2- Les architectures ramifiées

Découlent de réactions de transfert de chaîne, ou bien sont générées par des réactions de greffage. Dans tous les cas, ces architectures linéaires ou ramifiées définissent le domaine des thermoplastiques. Le Nylon, le Plexiglas (polymères linéaires), dont la production a débuté dans les années 1930, ou bien le polyéthylène basse densité (polymère branché), produit à partir des années 1960, sont des exemples de thermoplastiques. [1]

L'introduction de liaisons covalentes entre chaînes de polymères linéaires ou ramifiés aboutit à la troisième famille, les polymères réticulés ou « crosslinked polymers ». Paul Flory a étudié le premier ces nouvelles architectures dès le début des années 1940. Elles définissent aujourd'hui le domaine communément appelé des thermodurcissables. Les résines époxy et les caoutchoucs sont des exemples de systèmes polymères réticulés. Les systèmes dendritiques constituent la quatrième famille d'architecture macromoléculaire. [1]

C'est Paul Flory en 1953 qui a le premier évoqué la possibilité de synthétiser des dendrimères à partir de monomères multifonctionnels, dans son célèbre livre "Principales of Polymer Chemistry" [5].

### I-3-3-Classification selon la structure chimique [12]

La structure chimique des motifs permet une classification des composés macromoléculaires en homopolymères et copolymères.

**I-3-3-1-Les homopolymères** : sont des polymères qui ne possèdent qu'une seule unité, ces homopolymères sont des longues chaînes formées par la répétition d'un monomère, leurs propriétés mécaniques, écoulement à l'état fondu, optique, sont dues à la structure chimique des monomères et à la longueur des chaînes [12].

Il existe au sein des homopolymères différentes familles, on trouve: les homopolymères linéaires, branchés et étoilés.

**I-3-3-2-Les copolymères** : sont des polymères qui possèdent plusieurs unités, comme pour les homopolymères, les copolymères peuvent se classer dans différentes familles, citons: le mode statistique, alterné, séquencé et greffé [12].

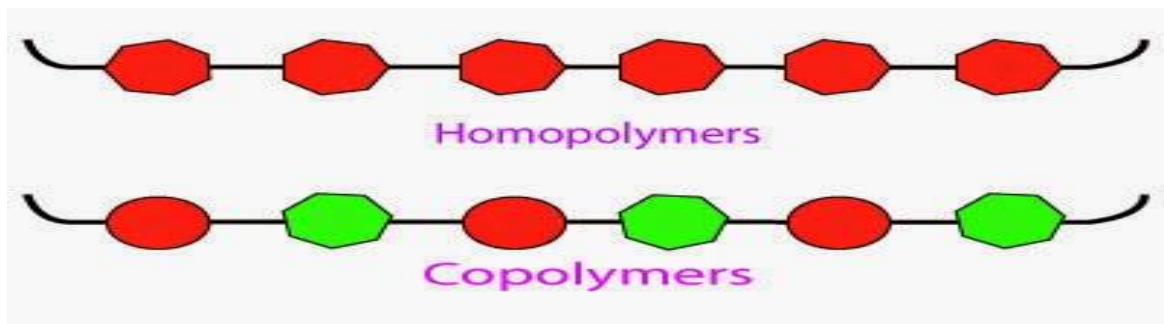


Figure I.4. Copolymère et homopolymère.

### I-3-4-Classification selon le comportement thermique [10]

Les plastiques sont des matériaux déformables ; ils peuvent être moulés ou modelés facilement, en général à chaud ou et sous pression. Leurs facilités de mise en forme, résistance aux chocs, aux variations de températures, à l'humidité, aux détergent...etc. les rendent utiles dans tous les domaines : emballage, bâtiment, automobile, électricité, etc.

Il existe un grand nombre de plastique aux propriétés différentes, on les classe en trois grandes catégories : les thermoplastiques, les thermodurcissables, les élastomères [14].

#### I-3-4-1-LES THERMOPLASTIQUE

Sous l'effet de la chaleur, les thermoplastique ramollissent et deviennent souples. On peut alors leur donner une forme qu'ils garderont en refroidissant. La transformation est réversible et renouvelable un grand nombre de fois, les thermoplastique sont ainsi facilement recyclables. Cependant ils ne sont pas biodégradables et ont une durée de vie de plusieurs centaines d'années. Ce sont de matières plastique les plus utilisés notamment le (PE et le PVC). [14]

Tableau 1. Classification et usages des thermoplastiques.

| Nom, abréviation                                     | caractéristiques                                                                                                                                                                                                                                  | usages                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>polyéthylène (PE)</b>                             | Translucide, inerte, facile à manier, résistant au froid.<br>On distingue deux familles:<br>-le PEBD (polyéthylène basse densité) bonne résistance chimique, olfactivement, gustativement et chimiquement neutre, facilement transformé et soudé. | Utilisé dans la moitié des emballages plastiques et dans les domaines les plus divers.<br>PEBD : produits souples : sacs, films, sachets, bidons, récipients et bouteilles souples (sauces, shampoing, crèmes...)*<br>PEHD : objets rigides (bouteilles, flacons, bacs poubelles, tuyaux, jouets, ustensiles ménagers, boîtes de conservation, sacs plastiques** |
| <b>polypropylène (PP)</b>                            | Très facile à colorer. N'absorbe pas l'eau. Aspect brillant et résistant à la température (160°C).<br><br>Difficile à recycler surtout s'il est imprimé                                                                                           | Pièces moulées d'équipements automobiles (pare-chocs, tableaux de bord...), mobilier de jardin, Film d'emballage, bouteilles rigides, boîtes alimentaires résistantes à la température du lave-vaisselle. Fibres de tapis, moquettes, cordes, ficelles                                                                                                           |
| <b>polystyrène (PS)</b>                              | Dur et cassant. Trois types:<br>- polystyrène "cristal" transparent<br>- polystyrène "choc" (HIPS) ; acrylonitrile butadiène styrène ABS)<br>- polystyrène expansé (PSE), inflammable et combustible                                              | Usages variés: mobilier, emballages, jouets, verres plastiques, pots de yaourt,<br>-"cristal": nombreux types de boîtes, boîtiers CD...<br>-ABS: produits rigides, légers et moulés (bacs à douche...)<br>-PSE : emballage « anti chocs », isolant thermique                                                                                                     |
| <b>polycarbonate (PC)</b>                            | Excellentes propriétés mécaniques, bonne résistance thermique jusqu'à 120°C, très transparent, physiologiquement neutre<br>Mauvaise résistance aux contacts prolongés avec l'eau, aux agents chimiques et aux rayons ultraviolets.                | casques de moto, boucliers de police, CD et DVD, vitres pare-balle, phares, feux arrière et clignotants d'automobile, matériel médical et prothèses, biberons incassables, profilés de toiture, vitres de cabine téléphonique...                                                                                                                                 |
| <b>polyesters et polyéthylène téréphtalate (PET)</b> | Mou à moyenne température.                                                                                                                                                                                                                        | Fabrication de fils textiles, de films et de bouteilles d'eau et de sodas. Usage limité par la température.                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>polyacétals ou polyoxyméthylène (POM)</b>         | Solides et avec des qualités de métaux. Résistant à la plupart des agents chimiques, faible coefficient de frottement. Densité élevée. Assez faible résistance thermique.                                                                         | Pièces à fortes exigences mécaniques: engrenages, poulies. La recherche vise à augmenter leur résistance au choc pour permettre la réalisation de plus grosses pièces.                                                                                                                                                                                           |
| <b>polychlorure de vinyle (PCV)</b>                  | Rigide ou souple selon les ingrédients qu'on lui incorpore.<br>PVC rigide : aspect lisse et dur                                                                                                                                                   | Dans l'industrie de l'ameublement, bâtiment, le génie civil et dans l'alimentaire: pots de margarine, blisters, bouteilles d'eau, emballage alimentaire ... PVC rigide: utilisé pour les tuyaux de canalisation. PVC souple: recouvre certains manches de pinces...                                                                                              |
| <b>polyamides (PA)</b>                               | Différents types de PA (selon la longueur des chaînes) distingués par des chiffres. Bon compromis entre qualités mécaniques, thermiques et chimiques. Hydrophiles.                                                                                | Pièces moulées dans l'appareillage ménager et automobile, tapis et moquettes, pièces de robinetterie, de serrurerie, engrenages, ...<br>Textiles (lingerie et voilages)...                                                                                                                                                                                       |
| <b>polyméthacrylate de méthyle (PMMA)</b>            | Transparent, même avec une très grande épaisseur (jusqu'à 33 cm d'épaisseur); à la différence du verre<br>L'ajout de PMMA dissout permet aux huiles lubrifiantes et fluides hydrauliques de conserver leur liquidité au froid (jusqu'à -100°C!)   | Nom commercial <i>Plexiglas, Lucite, Altuglas</i> , ... Utilisé pour remplacer le verre pour des vitres incassables, les surfaces des baignoires et des éviers, pour les vitres de grands aquariums résistantes à la pression de l'eau... feux arrière et clignotants, hublots d'avion, fibres optiques, enseignes lumineuses...                                 |

- La température de «ramollissement» étant moins élevée que celle du verre, les thermoplastiques ne peuvent pas être utilisés avec des produits chauds (comme par exemple la confiture qui, encore très chaude, sera mise dans des pots de verre)
- Les sacs plastiques en PEHD se froissent facilement sous la main, avec un bruit craquant et reviennent spontanément à sa forme d'origine, les sacs en PEBD se froissent sans bruit et se percent facilement et ont un toucher plus « soyeux ».

### I-3-4-2-LES THERMODURCISSABLES

Ces plastiques prennent une forme définitive au premier refroidissement ; ils deviennent durs et ne se ramollissent plus une fois moulés. La technique de fabrication est difficile à mettre en œuvre mais elle produit des matériaux très solides et très résistants aux agressions chimiques et la chaleur. Les aminoplastes sont les plastiques thermodurcissables les plus utilisés [14].

**Tableau 2.** Caractéristiques et usages des thermodurcissables.

| Nom, abréviation            | caractéristiques                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Usage                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>polyuréthanes (PUR)</b>  | Grande diversité de dureté et textures en fonction des associations chimiques de différents monomères.                                                                                                                                                                                                                                 | Mousses souples ou rigides grâce à des agents d'expansion, colles, fibres ( <i>Licra</i> )<br>Matelas, sièges de voiture, tableaux de bord, roues de patins à roulettes, chaussures de ski...                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>polyesters insaturés</b> | Prix peu élevé, durcissement assez rapide sans élimination de produits secondaires. Imprégnation facile des fibres de verre.                                                                                                                                                                                                           | Pièces plastiques renforcées par coulée: pales d'éoliennes, coques et cabines de bateaux, piscines, carrosseries d'automobiles... Textiles (Dacron, Tergal, Térylène...)                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>phénoplastes (PF)</b>    | Bonne résistance aux produits chimiques et à la chaleur et électriquement isolantes.<br>Transformable par moulage et par compression.<br>Souvent colorés en brun foncé                                                                                                                                                                 | Domaines scientifiques et réalisation d'objets: téléphones, postes de radio, pour fabriquer les poignées de casserole, de fer à repasser et des plaques de revêtement.                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Aminoplastes (MF)</b>    | deux types principaux : urée-formaldéhyde (UF) et mélamine-formaldéhyde (MF) dont le plus connu est le <i>formica</i> .<br>Dureté et rigidité exceptionnelles, peu sensibles à l'hydrolyse et à la lumière, résistance à l'abrasion, bonne tenue aux solvants, difficilement inflammables.<br>Peuvent être produits en teintes claires | Usages variés : mobilier de cuisine, plans de travail, liants (adhésifs) dans les contreplaqués, bois agglomérés, mélaminés, etc.), moulage en stratifiés décoratifs de revêtements, pièces moulées d'ustensiles de cuisine (plateaux...), matériel électrique (interrupteurs, prises de courant...), vernis de parquets (vitrification), apprêts pour rendre les tissus indéfroissables ou plastifiés, peintures, etc. |

## I-3-4-3-LES ELASTOMERES

Les élastomères sont élastiques ; ils se déforment et tendent à prendre leur forme initiale et supportent de très grandes déformations avant rupture. Ce ne sont pas réellement des (plastiques). Issu de latex d'Hévéas (arbre d'Amazonie), le caoutchouc naturel, est resté longtemps le seul élastomère connu mais les méthodes modernes de fabrication ont permis d'obtenir une grande diversité de matériaux en ajoutant des additifs accélérateurs, agent protecteurs (Anti-UV, anti-oxygène.....) et on les combine à d'autres matériaux (métaux, textiles, autres plastiques.). [14]

On distingue trois grandes catégories qui présentent chacune de nombreux produit aux propriétés variées.

**Tableau 3.** Caractéristiques et usages des élastomères.

| Catégories                       | matériaux                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | caractéristi                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Caoutchoucs</b>               | <ul style="list-style-type: none"> <li>- caoutchouc naturel, cis</li> <li>- 1,4- polyisoprène (NR) ;</li> <li>- copolymère styrène-butadiène (SBR)</li> <li>- polybutadiène (BR) ;</li> <li>- polyisoprène synthétique (IR)</li> </ul>                                                                                                                                                                                      | <p>Chauffés au-dessus de 65 °C, ils commencent à vieillir et deviennent poisseux. Faible résistance à l'huile et à l'ozone.</p> <p>Propriétés d'amortissement et grande extensibilité (jusqu'à 750 % avant rupture). Excellent résistance au déchirement.</p>                                                                                                                                                                           |
| <b>élastomères spéciaux</b>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>-co- ou terpolymères d'éthylène propylène et diène (EPM et EPDM)</li> <li>- copolymères d'isobutylène isoprène, chlorés ou bromés (IIR, BIIR, CIIR)</li> <li>- copolymères de butadiène acrylonitrile (NBR)</li> </ul>                                                                                                                                                               | <p>Température maximum d'utilisation: 150 °C.</p> <p>Selon les matériaux: résistance aux produits pétroliers, aux solvants; à l'oxydation (O2 et O3), aux intempéries, aux produits chimiques corrosifs et au vieillissement...Certains sont ininflammables et ont une grande imperméabilité aux gaz.</p> <p>Parfois sensible à la lumière et à l'ozone et au</p>                                                                       |
| <b>élastomères très spéciaux</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- caoutchoucs de silicone (VMQ, FVMQ)</li> <li>- élastomères fluorés (FKM)</li> <li>- polyéthylènes chlorés et chlorosulfonés (CM, CSM)</li> <li>- polyacrylates (ACM)</li> <li>- copolymères éthylène acétate de vinyle (EVM)</li> <li>- éthylène acrylate de méthyle (AEM)</li> <li>- caoutchoucs nitrile hydrogénés (HNBR)</li> <li>- épichlorhydrines (CO, ECO, GECO)</li> </ul> | <p>Très variables en fonction des matériaux :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- hautes performances chimiques : résistance aux carburants, à l'ozone, aux huiles, imperméabilité aux gaz et aux produits chimiques agressifs</li> <li>- température de service continu allant de -80°C à 250 °C</li> <li>- Résistance au vieillissement, stabilité de couleur</li> </ul> <p>Propriétés adhésives (colles thermofusibles)</p> |

**NB :** Les élastomères présentes des caractéristiques bien spécifiques ; grande élasticité, bonne étanchéité, fort pouvoir amortissant.....Employés essentiellement en tant que pneumatiques, on les utilise également sous la forme de joints, de tubes et tuyaux, de membranes, de dispositifs antivibratoires.....dans de nombreux domaines d'activités : automobile, industrie, aéronautique, médecine.

#### I-3-4-4-Deux grandes classes de polymères: différenciation par la microstructure

- **Les polymères amorphes:** Ils sont transparents. En dessous de leur température de transition vitreuse (ramollissement) ils sont à l'état vitreux et l'on parle de verres organiques. Ils sont généralement peu résistant à la rupture. L'adjonction de particules d'élastomère permet de les rendre plus ductiles. Les chaînes macromoléculaires peuvent être orientées au cours de la mise en œuvre, ce qui leur confère des propriétés anisotropes [1].
- **Les polymères semi-cristallins:** Ils sont constitués de phases cristallines et de phases amorphes du même polymère. Leur microstructure est souvent complexe en conséquence, la description de leurs propriétés aussi. Leur propriétés mécaniques sont généralement bonnes [1].

#### I-4- Les adjuvants, charges et renforts [10]

Les adjuvants peuvent avoir pour rôle de faciliter la mise en œuvre ou de modifier les propriétés d'usage. Les principaux agents sont les rhéo-fluidifiants, démoulants, plastifiants, les stabilisants aux UV, les stabilisants à l'oxydation, les antistatiques, les anti-moisissures et les ignifugeants. Les charges, telles que le kaolin, le carbonate de calcium, le talc, l'argile, sciure de bois, l'alumine, ont généralement pour rôle de diminuer le coût du matériau. Les charges métalliques modifient les propriétés électromagnétiques. Lorsque des fibres sont ajoutées – généralement des fibres de verre mais il peut aussi s'agir de carbone, de coton, de jute... - pour renforcer les propriétés mécaniques on parle alors de "matériau composite" ou simplement "composite". Pour renforcer les polymères fragiles au choc on utilise des particules souples à base d'élastomère. On peut aussi obtenir de bonnes propriétés en mélangeant des polymères (ABS = styrène butadiène + styrène acrylonitrile, par exemple). Enfin on rajoute des pigments pour modifier la couleur. Dans le jargon du fabricant, le mélange du polymère avec ses divers additifs est appelé compound ou premix (CP). Actuellement se développent des nanocomposites à base de microparticules de silice pour améliorer la résistance à la rayure et à l'abrasion des polymères (essentiellement les polymères transparents). Enfin, dans le cas des caoutchoucs naturels (latex vulcanisé), le noir de carbone ou des microparticules de silice ont pour rôles d'améliorer les propriétés mécaniques (modules d'élasticité, dissipation d'énergie et résistance à la déchirure) [10].

#### I-5-Propriétés des polymères

Un polymère comme tout autre matériau, présente des performances et des qualités, qui le rendent très utilisés dans pratiquement tous les domaines. Ces qualités permettent aux constructeurs de faire le choix de polymères à utiliser dans une structure donnée.

##### I-5-1-Propriétés chimiques des polymères

La teneur en eau affecte les propriétés mécaniques des polyamides. La présence d'eau peut favoriser l'hydrolyse des polyesters (ainsi que la rupture des fibres de verres qu'ils

contiennent éventuellement). Mais généralement les polymères sont peu affectés par les solutions salines, les acides faiblement dosés. En revanche ils sont pour la plupart sensibles aux solvants organiques (dérivés du pétrole...). Compte-tenu de la diversité des polymères, il faut toujours spécifier au fabricant (via le fournisseur éventuellement) les conditions d'utilisation de son produit et l'associer au choix du meilleur produit ou compromis [1].

On peut résumer cela Comme suit:

- **Sensibilité aux agents extérieurs:** Les matières plastiques offrent en général, une bonne résistance aux produits chimiques (acides, solvants). Les plastiques sont insensibles aux bactéries, champignons et parasites.
- **Humidité :** Certains plastiques absorbent (1 à 4% d'humidité) et provoquent un gonflement néfaste (condensation). Les propriétés mécaniques varient avec le taux d'humidité.
- **Stabilité Dimensionnelle** des gauchissements, des contractions ou des fluages peuvent provenir de l'humidité, de la chaleur ou d'un mauvais stockage.
- **Imperméabilité :** Ils assurent une bonne barrière aux gaz et à l'eau.

### I-5-2-Propriétés physiques des polymères

Si l'on considère l'usage des matériaux polymères, on distingue deux classes: Les polymères techniques et les polymères à usage structural. Les polymères techniques sont généralement produits en petites quantités pour leur propriété optique, électronique, physico-chimique, pharmaceutique, etc. Les polymères à usage structural sont formulés pour adapter leurs propriétés mécaniques à un usage donné. C'est essentiellement la rigidité et l'amortissement qui sont concernés. Bien sûr plusieurs propriétés peuvent être concernées simultanément, par exemple dans le cas des polymères transparents où de bonnes propriétés optiques et une moindre fragilité sont exigées. Les polymères sont de bons, voire très bons, isolants électriques et des isolants thermiques de qualité moyenne tant qu'ils ne forment pas de mousse. [1]

- **Isolation :** Ceux sont de bons isolants électrique et thermique.
- **Légèreté :** La densité de la plupart des matières plastiques est comprise entre 0.9 (plus léger que l'eau) et 1.8 (plus lourde que l'eau). Le plus souvent c'est 1.
- **Transparence :** Certains plastiques ont un coefficient de transmission de la lumière voisin de celui du verre.
- **Esthétique :** Les couleurs sont variées et les possibilités de mise en œuvre sont nombreuses. L'aspect lisse du matériau confère à l'objet une impression "désigne".
- **Entretien :** Ils ont un entretien facile, ne nécessitent aucun traitement de surface et résistent à la corrosion.

Le (Tableau I.4) suivant indique les valeurs courantes pour des propriétés physiques des polymères les plus usuels. Les valeurs de ce tableau ont un caractère indicatif. En effet les

propriétés peuvent être très variables pour certains polymères. Par exemple les silicones et les PU sont des thermodurcissables à propriétés mécaniques très variables.

**Tableau I.4.** Valeurs courantes pour des propriétés physiques des polymères usuels [1].

| Polymère                                       | Densité (kg/m <sup>3</sup> ) | Module d'Young (MPa) | Allongement à rupture (%) | Coefficient de dilatation thermique (K <sup>-1</sup> ) | Conductivité thermique (W/m.K) | Température de transition vitreuse (Tg en °C) | Température de fusion (Tf en °C)         |
|------------------------------------------------|------------------------------|----------------------|---------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------|
| <b>PVC souple (PVC-P)</b>                      | 1160 à 1350                  | < 1000               | 200 à 500                 | 7 10 <sup>-5</sup>                                     | 0.16                           | -10 à -40                                     | < <b>130</b>                             |
| <b>PVC rigide (PVC-U)</b>                      | 1400                         | 2000 à 3000          | 20 à 70                   | 7 10 <sup>-5</sup>                                     | 0.16                           | 80                                            | < <b>150</b>                             |
| <b>PA</b>                                      | 1100                         | 2500                 | 30                        | 5 10 <sup>-5</sup>                                     | 0.2                            | 50                                            | <b>200</b>                               |
| <b>Polyoléfines</b>                            |                              |                      |                           |                                                        |                                |                                               |                                          |
| <b>PE-BD</b>                                   | 920                          | 200                  | 500                       | 2 10 <sup>-4</sup>                                     | 0.23                           | -110                                          | <b>115</b>                               |
| <b>PE-HD</b>                                   | 950                          | 1000                 | > 50                      | 1 à 2 10 <sup>-4</sup>                                 | 0.4                            | -110                                          | <b>130</b>                               |
| <b>PP</b>                                      | 900                          | 1000 à 2000          | > 20                      | 1 à 2 10 <sup>-4</sup>                                 | 0.2                            | -20                                           | <b>165</b>                               |
| <b>Transparents</b>                            |                              |                      |                           |                                                        |                                |                                               |                                          |
| <b>PC</b>                                      | 1200                         | 2500                 | > 100                     | 7 10 <sup>-5</sup>                                     | 0.2                            | 150                                           | <b>200</b>                               |
| <b>PMMA</b>                                    | 1180                         | 3000                 | < 3                       | 7 10 <sup>-5</sup>                                     | 0.2                            | 110 à 135                                     | <b>190 à 240</b>                         |
| <b>PMMA choc</b>                               | 1200                         | 2000                 | 30                        | 8 10 <sup>-5</sup>                                     | 0.2                            | 110 à 135                                     | <b>190 à 240</b>                         |
| <b>PS</b>                                      | 1050                         | 2300 à 4100          | < 3                       | 7 10 <sup>-5</sup>                                     | 0.1 à 0.13                     | 80                                            | <b>200</b>                               |
| <b>Thermodurcissable</b>                       |                              |                      |                           |                                                        |                                |                                               |                                          |
| <b>PU</b>                                      | 1200                         | variable             | variable                  | 1 à 2 10 <sup>-4</sup>                                 |                                | variable                                      | <b>thermodurcissable</b>                 |
| <b>Silicone</b>                                | 1000 à 1600                  | variable             | variable                  | 1.7 à 3.5 10 <sup>-4</sup>                             | 0.2 à 0.4                      | variable                                      | <b>&gt; 200 ou thermodurcissable</b>     |
| <b>Caoutchouc (poly isoprène) sans charges</b> | 950                          | De l'ordre de 1      | 100 à 800                 | 2 10 <sup>-4</sup>                                     | 0.15                           | Environ -50                                   | <b>Thermodurcissable (vulcanisation)</b> |
| <b>Acétate de cellulose</b>                    | <b>1300</b>                  | <b>500 à 5000</b>    | <b>6 à 70</b>             | <b>0.8 à 1.8 10<sup>-4</sup></b>                       | <b>0.16 à 0.36</b>             | <b>55 à 95</b>                                | <b>200</b>                               |

### I-5-3-Resistance au feu [1]

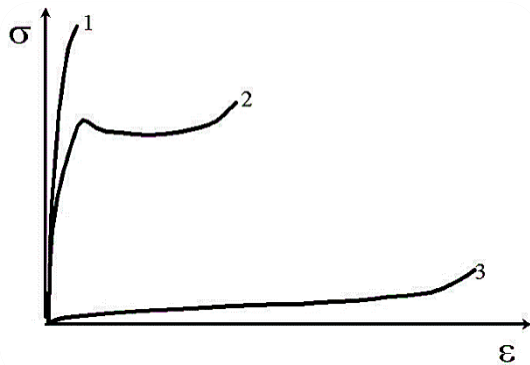
La combustion, si elle a lieu, peut-être plus ou moins rapide selon les natures chimiques des polymères (Tableau I.5). De même, selon la nature chimique du polymère et les charges éventuelles qu'il contient, le chauffage excessif ou l'éventuelle combustion peut dégager des fumées épaisses et des gaz nocifs. Certains polymères, certains PVC non plastifiés par exemple, sont ignifuges: chauffés, des gaz sont émis et empêchent la réaction exothermique d'oxydation de se produire. Ils sont qualifiés d'auto-extinguibles. Il est parfois possible de rendre un polymère auto-extinguible par adjonction d'adjuvants. Ceux-ci sont à base de gaz halogènes (chlore, fluor...) ou d'azote, de phosphore, etc. Pour ignifuger, le fabricant copolymérise des monomères inflammables avec des monomères auto-extinguibles, par exemple halogénés [1].

**Tableau I.5.** Certains polymères sous l'effet du feu.

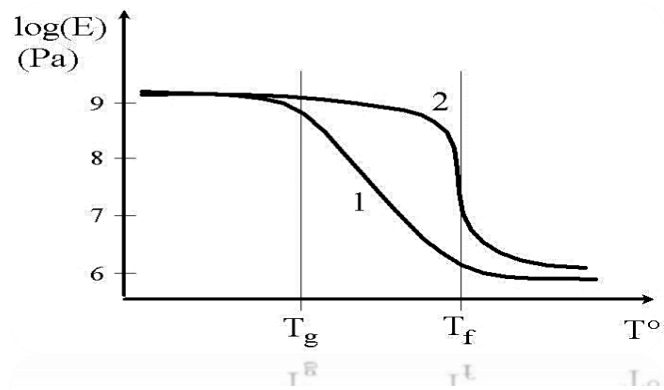
| <b>Polymère</b>          | <b>inflammabilité</b>               |
|--------------------------|-------------------------------------|
| PE – toutes densités     | combustion très lente               |
| PP                       | combustion lente                    |
| PVC                      | combustion lente à auto-extinguible |
| PS                       | combustion lente                    |
| PMMA                     | combustion lente à incombustible    |
| Nylon 66                 | auto-extinguible                    |
| Acétate de cellulose     | combustion lente à auto-extinguible |
| Epoxydes                 | auto-extinguible                    |
| Polyesters               | inflammable                         |
| Résines phénoliques      | combustion très lente               |
| Mélatamine formaldéhydes | combustion lente à incombustible    |

### I-5-4-Propriétés mécaniques des polymères

Les polymères thermoplastiques, à température ambiante, sont proches de leur température de ramollissement ( $T_g$ ,  $T_f$ ) (Figure I.6) et leur comportement mécanique (tableau 6) est sensiblement affecté par la vitesse de sollicitation et la température. Ceci est lié à la thermo-activation et à la coopérativité des mouvements moléculaires. Tous les polymères thermoplastiques se rigidifient à basses température et retrouvent un comportement fragile. Une relativement basse température correspond à une sollicitation rapide, une relativement haute température correspond à une vitesse de sollicitation lente, il s'agit de l'équivalence temps-température.[1]



**Figure I.5.** Courbes contrainte-déformation typiques de polymères en traction: 1- polymère fragile ( $T < T_g$ )-2- polymère ductile ( $T < T_g$ )-3- élastomère ou caoutchouc ( $T > T_g$ ). [1]



**Figure I.6.** Evolutions typiques du module d'Young en fonction de la température pour les polymères thermoplastiques: 2- un polymère amorphe – 1- un polymère semi-cristallin.  $T_g$  désigne la température de transition vitreuse et  $T_f$  la température de fusion. [1]

- Les polymères thermodurcissables ont un comportement mécanique semblable aux polymères thermoplastiques en dessous de leur température de ramollissement. Cependant, à moins de n'être que très faiblement réticulés, ils ne subissent pas de fort ramollissement lorsque la température augmente. Les propriétés mécaniques ne seront significativement affectées aux hautes températures que par la dégradation chimique du réseau macromoléculaire.
- Pour la construction, on préfère en général utiliser des polymères thermodurcissables armés de fibres pour leur moindre fluage et les raisons suivantes :
  - **Résistance à la Traction :** La résistance à la traction varie entre 10 et 80 MPa pour un plastique à l'état compacte entre 200 et 800 MPa pour un plastique renforcé courant.
  - **Résistance à la Compression :** On atteint des valeurs de 50 à 100% plus élevées que la résistance à la traction.
  - **Elasticité :** La résistance élastique des plastiques est voisine de 3000 MPa. Ce qui situe ces matériaux entre les bois et les caoutchoucs. Certaines charges peuvent amener quelques thermoplastiques à 160 GPa.
  - **Allongement :** Voisin de 150% en général, il peut atteindre 400 à 800% avant la rupture pour certains produits, comme les fils ou les fibres synthétique.
  - **Amortissement :** Les mousses souples ou semi-rigides et les matériaux renforcés constituent d'assez bons amortisseurs .de chocs.
  - **Dilatation :** Elle peut - être dix(10) fois supérieure à celle des métaux (cas des thermoplastiques).

Le (Tableau I.6) ci-dessous résume les caractéristique mécanique de certains polymères.

**Tableau I.6.** Propriétés mécaniques de certains polymères [1].

| Matériau                         | E(GPa)    | N        | Re (MPa) | Rm (MPa) | A (%)    | KIC (MPa-m <sup>1/2</sup> ) |
|----------------------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|-----------------------------|
| Mousses polymères                | 0.001-2   | 0.2<br>5 | 0.2-10   | 0.2-10   | 10-100   | <b>0.001-2</b>              |
| Polyamide 6-6 PA                 | 2-4       | 0.3<br>5 | 50-80    | 60-110   | 15-80    | <b>0.5-3</b>                |
| Polycarbonate de bisphénol PC    | 2.6       | 0.4<br>0 | 50       | 60       | 15-70    | <b>1-2.5</b>                |
| Polyéthylène basse densité PEBD  | 0.15-0.24 | 0.4<br>4 | 6-20     | 7-20     | 100-1000 | <b>1-5</b>                  |
| Polyéthylène haute densité PEHD  | 0.55-1    | 0.4<br>2 | 20-30    | 20-37    | 170-1400 | <b>2-5</b>                  |
| Polyméthacrylate de méthyle PMMA | 3.4       | 0.3<br>9 | 60-110   | 60-110   | 2-10     | <b>1-1.6</b>                |
| Polypropylène PP                 | 0.9-1.7   | 0.4<br>1 | 20-35    | 35-70    | 60-100   | <b>3-3.5</b>                |
| Polystyrène PS                   | 3-3.4     | 0.3<br>9 | 35-70    | 40-70    | 1-4      | <b>2</b>                    |
| Polytétrafluoretylène PTFE       | 0.3-0.8   | 0.4<br>5 | 10-15    | 17-40    | 200-400  | <b>3</b>                    |
| Polychlorure de vinyle PVC       | 2.4-3     | 0.3<br>9 | 40-50    | 40-60    | 12-80    | <b>2-8</b>                  |

## I-6-Structure et transformations structurales [1]

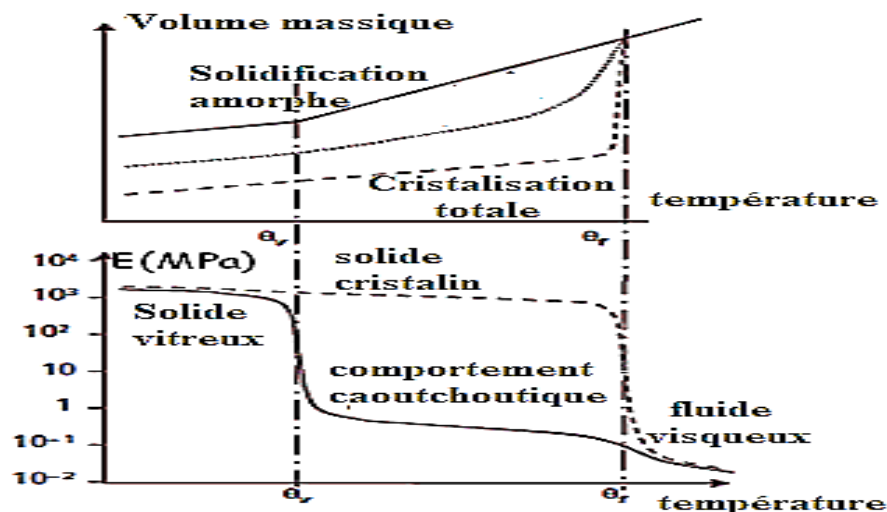
À l'état solide, la structure de la plupart des polymères est amorphe, car la grande taille, les circonvolutions et l'enchevêtrement des macromolécules rendent difficile leur diffusion et leur mise en ordre cristallin lors d'un refroidissement. Certains facteurs favorables (chaînes courtes, rectilignes, non ramifiées...) rendent cependant possible une cristallisation partielle (rarement supérieure à 80 %). Les macromolécules s'organisent en plaquettes cristallines, elles-mêmes regroupées sous forme de sphérolites, enrobées de la fraction amorphe du polymère; cette structure est détectable par observation microscopique en lumière polarisée.

La cristallisation s'accompagne d'une densification sensible du matériau au passage de la température de fusion  $\theta_f$ . Dans le cas où le polymère demeure à l'état amorphe, le

refroidissement s'accompagne d'une densification progressive assez rapide, grâce au mouvement relatif des chaînes qui facilite le raccourcissement des distances d'équilibre

Ceci est possible jusqu'à la température de transition vitreuse  $\theta_v$  (parfois notée  $T_g$  = glass transition temperature), en dessous de laquelle les liaisons faibles sont assez intenses pour empêcher toute mobilité des chaînes : la densification se fait alors au même rythme que pour le matériau cristallin correspondant [1].

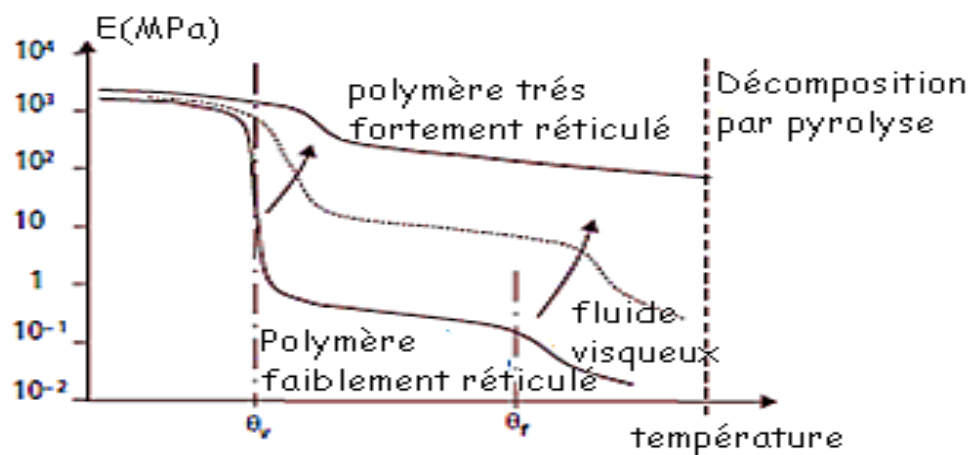
La (figure I.7) au-dessous met en regard les conséquences très sensibles de cette évolution sur le comportement mécanique du polymère, qui passe de l'état de fluide visqueux à l'état solide, en passant éventuellement par un état pâteux dit caoutchoutique entre  $\theta_f$  et  $\theta_v$ . Comme cette transition peut se faire sur un intervalle réduit de température (de l'ordre de quelques dizaines de degrés Celsius) souvent situé au voisinage de l'ambiante, ces particularités de comportement doivent impérativement être prises en compte pour l'utilisation des polymères [1].



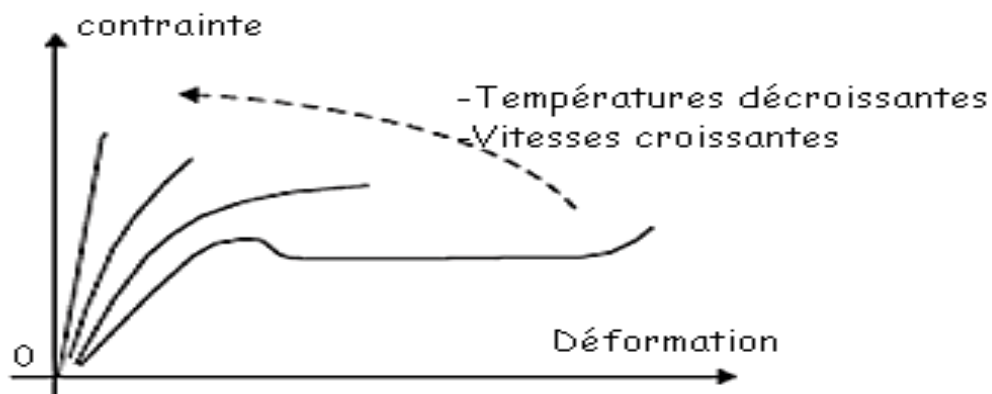
**Figure I.7.** Évolutions schématiques du volume massique  $V_m$  et du module de Young  $E$  d'un polymère en fonction de la température [1].

L'architecture des macromolécules joue évidemment un rôle dans ces transformations: les polymères à DP (degré de polymérisation) élevé, à chaînes ramifiées ou à radicaux complexes à fort encombrement (comportant par exemple des cycles aromatiques) ont une température de transition vitreuse plus élevée que ceux dont les chaînes sont linéaires ou courtes. Lorsque les chaînes sont réticulées entre elles par des liaisons covalentes transversales, la densité de ces réticulations conditionne la longueur des segments de chaînes libres de bouger: un fort taux de réticulation impose donc en permanence une structure amorphe figée, et élève donc ou fait même disparaître complètement à la fois la transition vitreuse et la fusion [1].

Dans la mesure où des mouvements relatifs des macromolécules sont possibles, le comportement visqueux qui en résulte a pour conséquence que des caractéristiques mécaniques comme le module de Young (Figure I.8 I.9) d'un polymère sont sensibles à la durée et à la vitesse d'application de la charge: une durée d'application plus longue conduit à une déformation plus grande, donc à un module plus faible (on précise couramment le temps d'application de la charge pour les modules des polymères: E10s, E100s, etc.), et abaisse la valeur apparente de  $\theta_v$  sur un graphe comme celui de la figure au-dessus. Un fluage visqueux, partiellement réversible (viscoélasticité) est couramment observé pour la plupart des polymères sous charge, même à la température ambiante. Le comportement en traction monotone au voisinage de  $\theta_v$  dépend de la vitesse de déformation imposée [1].



**Figure I.8.** Évolution schématique du module de Young  $E$  d'un polymère en fonction de la température, pour divers taux de réticulation [1].



**Figure I.9.** Évolution schématique du comportement en traction d'un polymère en fonction de la température ou de la vitesse de traction [1].

## I-7-Les mousses de polymères et les polymères expansés

Différentes méthodes (chimique, physique ou mécanique) sont utilisées pour incorporer un gaz au polymère dans le but de constituer des alvéoles au sein du matériau. Si ces alvéoles communiquent entre elles on parle de mousse à porosité ouverte, voire d'éponge, sinon on parle de mousse à porosité fermée. Selon que la température de transition vitreuse du polymère employé est au-dessus ou en dessous de la température ambiante, on obtiendra respectivement des mousses souples ou rigides. Les propriétés chimiques – inflammabilité, résistance aux solvants...- sont évidemment les mêmes que le celles du polymère qui les constitue avec une sensibilité plus grande car la surface réactive offerte est grande. Ainsi, du fait de la grande surface offerte à la combustion, les mousses de polymères sont plus inflammables que le polymère massif correspondant.

Les mousses de polymères et les polymères expansés sont utilisés pour les propriétés d'isolation thermique et parfois phonique. Comparés aux autres matériaux à masse égale, leurs propriétés mécaniques sont très bonnes. [4]

### I-7-1-Mousses obtenues à partir de résines thermoplastiques

Elles sont mise en œuvre en usine et ensuite éventuellement découpées à la scie ou au fil.

#### ➤ Exemples

- **Polystyrène expansé** : 25 à 80 kg/m<sup>3</sup> (extrudé), 16 à 80 kg/m<sup>3</sup> (moulé), sensible aux solvants organiques (il est possible d'améliorer cette propriété chimique), fragile aux intempéries, jaunit aux U.V., dilatation thermique  $6 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ , module d'Young de 5 à 20 MPa, ramollissement au-delà de 70°C, bonne résistance chimique et adhésion au ciment portland. Nécessite l'utilisation de pare-vapeur, pare- flamme et une protection contre les agressions mécaniques. [3]

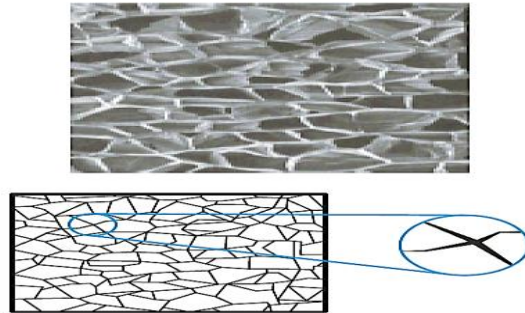
### I-7-2-Mousse de PVC

Faible inflammabilité et bonne isolation thermique et bonne propriétés mécaniques mais coût élevé. [3]

### I-7-3-Mousses obtenues à partir de résines thermodurcissables

Les propriétés chimiques, physiques et mécaniques sont très variables et les usages peuvent être très spécifiques. Elles autorisent une mise en œuvre sur site contrairement aux produits à base de résines thermoplastiques. [3]

**I-7-4-Mousse de polyuréthane** : 25 à 50 kg/m<sup>3</sup>, dilatation thermique  $1.3 \cdot 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ , module d'Young de 1 à 10 MPa, bonne stabilité thermique, faible absorption d'eau et faible perméabilité à la vapeur. [3]



**Figure I.10.** Structure d'une mousse. [6]

Le marché global des mousses est pour une moitié constitué de mousses de polyuréthane PUR. La deuxième moitié est dominée par les mousses PS (25 %) et les mousses PE (12,5 %) ; viennent ensuite les mousses PP, puis PVC, le reste étant constitué de mousses d'autres polymères tels que PMMA, PET, PLA, ABS, PC, PTFE...etc. Plusieurs critères peuvent être appliqués pour différencier les mousses :

– leur légèreté, caractérisée par la densité relative

$$D = \rho \text{ mousse} / \rho \text{ polymère}$$

Avec  $\rho$  masse volumique ;

Une mousse basse densité BD a une densité relative comprise entre 0,10 et 0,20 ; pour une mousse haute densité HD, la densité relative est comprise entre 0,70 et 0,90 ; entre les deux, c'est le domaine des mousses de moyenne densité MD ;

– leur nature, caractérisée par le comportement en compression :

- une mousse souple se déforme de façon réversible,
- une mousse qui se déforme de façon irréversible est dite semi-rigide ou rigide selon que sa déformation rémanente en compression est inférieure ou supérieure à 10 % ;

– les taille et distribution des cellules : mousse normale, fine ou micro-cellulaire ;

– leur structure : cellules ouvertes, cellules fermées, dont les pourcentages respectifs sont déterminés par un test d'étanchéité consistant en une mesure d'absorption d'eau. Les mousses BD représentent 90 % du marché. Les mousses HD représentent la majeure partie des 10 % restants, les mousses MD.

### **I-8-Tuyauteries en polymères [15]**

Les résines thermodurcissables qui sont utilisées en tuyauterie sont la plupart du temps armées. Ce sont principalement des résines époxydes ou polyesters. Elles permettent le transport sous relativement de forte pression de produits très corrosifs dans les techniques industrielles. L'assemblage se fait joint mécanique ou par collage. Leur coût est élevé.

Les tuyaux en résines thermodurcissables connaissent de nombreux usages domestiques et industriels. Les plus courants sont les polyoléfines (PE, PP) et le PVC. Le collage est courant pour le PVC mais difficile pour les polyoléfines pour lesquelles on préfère l'assemblage par fusion ou le filetage. Comme le montre le tableau récapitulatif des propriétés ci-avant, le PE résiste mieux que le PP aux basses températures mais moins bien aux hautes températures domestiques.

- ✓ PVC: évacuation, ventilation, adduction d'eau potable, transport de certains produits chimiques, protection électriques.
- ✓ PE: adduction d'eau potable, du gaz de ville, protection électrique.
- ✓ PP: évacuation, transport de certains produits chimiques, gaz, pétrole, chauffage.

### **I-9-Avantages et inconvénients des Polymères [10]**

#### **Avantages**

- Les matières plastiques sont des matériaux peu coûteux.
- Elles sont résistantes à la corrosion.
- Elles sont chimiquement inertes.
- La mise en place des matières plastiques passe par le moulage, ce qui permet d'obtenir des formes plus complexes.

#### **Inconvénients**

- Non résistance à la chaleur.
- Toxicité des gaz de combustion.
- Non résistance aux produits chimiques.
- Lorsque les matières plastiques sont abandonnées dans la nature, il leur faut plusieurs décennies pour se décomposer.

### **I-10-Les principaux procédés de transformation des matières plastiques [10]**

Pour les thermoplastiques (polyéthylène haute densité (PEHD), polyéthylène basse densité (PEBD), polypropylène (PP), polystyrène (PS), polyéthylène téréphtalate (PET), polychlorure de vinyle (PVC)), on part de poudres, de granulés ou de produits semi-finis sous forme de plaques ou de films. En chauffant la matière on la fait passer d'un état solide à un état plastique. Elle peut alors être mise en forme dans un moule ou par un autre procédé.

Pour les thermodurcissables (mélamine-formaldéhyde (MF), urée-formaldéhyde (UF), phénol-formaldéhyde (PF), exemples : colles époxydes, polyester insaturés (UP), polyuréthane (PUR)), les produits de base sont livrés à l'état de polymérisation partielle. Cette dernière va s'achever dans le moule sous l'action de catalyseurs, d'accélérateurs voire de chaleur. Le démoulage arrive quand la polymérisation est déjà assez avancée pour que l'objet conserve les propriétés souhaitées.

- ✓ **Le thermoformage.**
- ✓ **L'injection.**
- ✓ **L'injection soufflage.**
- ✓ **L'extrusion.**
- ✓ **L'extrusion gonflage.**
- ✓ **L'extrusion soufflage.**
- ✓ **L'expansion moulage.**
- **Le thermoformage**

C'est un procédé de seconde transformation. La matière arrive sous forme de plaques, feuilles, tubes ou profilés, puis est ramollie par chauffage avant d'être mise en forme par application sur un moule géométrique simple. Cette technique est utilisée pour produire toutes sortes d'objets aux formes creuses, comme les pots de yaourts ou le nez du TGV !

Comment ça marche :

La plaque de plastique est chauffée.



Une plaque en plastique est placée dans un cadre qui la maintient au-dessus du moule.



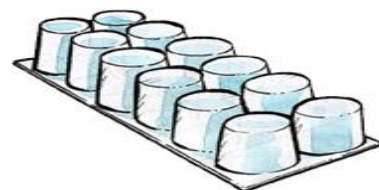
Le moule s'approche de la plaque plastique qui s'est ramollie.



On fait le vide entre le moule et la plaque pour que la plaque de plastique colle parfaitement au moule.



Après refroidissement du moule, la plaque ainsi formée est démoulée.



La partie de plastique qui reste dans le cadre est découpée. Une nouvelle plaque.



- **L'injection**

La presse à injecter est utilisée pour produire très rapidement des objets en très grandes quantités. Cette technique permet d'obtenir en une seule opération des pièces finies, de formes complexes, dans une gamme de poids allant de quelques grammes à plusieurs kilogrammes. On utilise des presses à injecter dans de très nombreux domaines : l'automobile, les jouets, l'électronique...etc.

C'est un procédé très répandu, car il permet de fabriquer des objets moulés de qualité, même quand ils ont des formes compliquées.

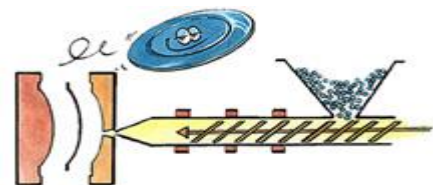
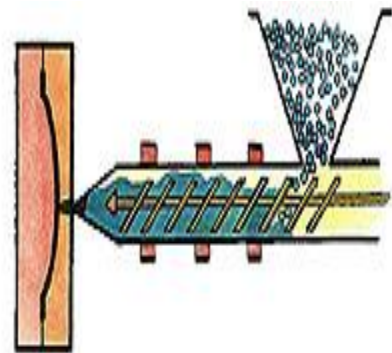
Comment ça marche :

La matière plastique arrive sous forme de granulés. Elle est versée dans la trémie pour alimenter la vis de plastification, qui est dans un fourreau (tube) chauffé. La matière plastique est ramollie, mélangée et poussée par la vis piston dans un moule refroidi complètement fermé.

Quand la matière plastique arrive au contact du moule froid, elle prend la forme du moule et se solidifie.

Le moule s'ouvre ensuite pour faire sortir la pièce.

Pour changer la forme de la pièce, il suffit de changer de moule.



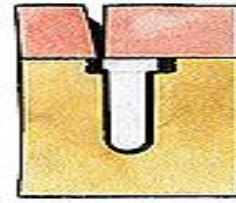
- **L'injection soufflage**

C'est avec cette méthode que l'on produit la plupart des bouteilles, flacons, biberons, fioles...

C'est un procédé discontinu

Comment ça marche :

Dans une première étape, on fabrique une préforme par injection, c'est ainsi que le goulot de la bouteille est déjà formé.



Dans une deuxième étape, on chauffe le corps de la préforme.

Avec une tige, on étire la préforme jusqu'au fond du moule.

On envoie dans cette préforme un jet d'air très puissant qui va plaquer le corps de la préforme contre les parois d'un moule. La préforme va donc parfaitement prendre la forme du moule.



Le moule est refroidi puis s'ouvre pour faire sortir la bouteille.

Comme pour l'injection, pour changer la forme de la bouteille, il suffit de changer de moule.

On reconnaît au fond de la bouteille le point d'injection de la préforme.

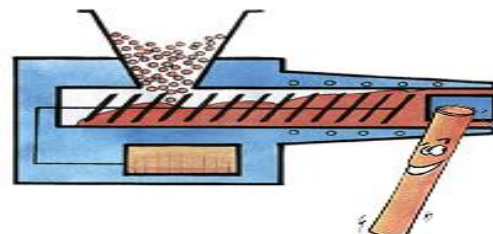


- **L'extrusion**

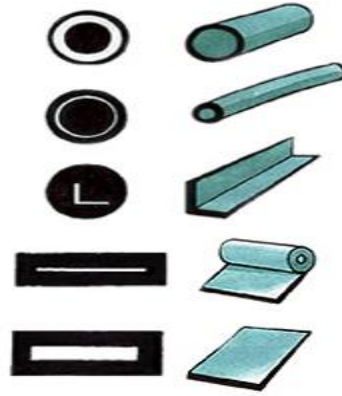
C'est un procédé continu qui sert à fabriquer des pièces de grande longueur comme des tubes, des tuyaux, ou des produits semi-finis comme des profilés (pour les fenêtres par exemple), des baguettes, des fibres optiques, des plaques ou des feuilles...

Comment ça marche :

La matière plastique arrive à l'entrée de l'extrudeuse sous forme de granulés et est versée dans la trémie pour alimenter la vis de l'extrudeuse.



Dans l'extrudeuse, elle est chauffée et ramollie, grâce à une vis sans fin qui se trouve dans un fourreau (tube) chauffé pour rendre le plastique malléable. La vis entraîne le plastique vers la sortie. La tête de sortie de l'extrudeuse donne sa forme à ce qui en sort. Le tube, ou le profilé sort en continu, il est refroidi pour être ensuite coupé à la longueur voulue.



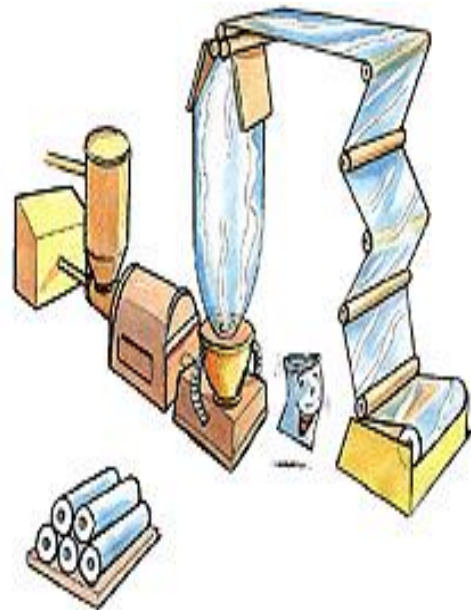
- **L'extrusion gonflage**

C'est une variante de l'extrusion qui permet de fabriquer des films plastiques et des sacs poubelle par exemple.

Comment ça marche :

La matière plastique arrive à l'entrée de l'extrudeuse sous forme de granulés et est versée dans la trémie pour alimenter la vis de l'extrudeuse.

Dans l'extrudeuse, elle est chauffée et ramollie, grâce à une vis sans fin qui se trouve dans un fourreau (tube) chauffé pour rendre le plastique malléable. La vis entraîne le plastique vers la sortie. En sortie de la tête verticale de l'extrudeuse, on insuffle de l'air comprimé dans la matière fondue qui se gonfle et s'élève verticalement en une longue bulle de film. Après refroidissement, des rouleaux aplatissent le film en une gaine plane qui s'enroule sur des bobines.

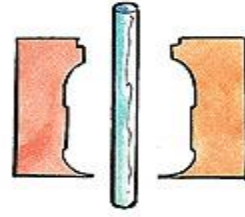


- **L'extrusion soufflage :**

C'est une variante de l'extrusion qui permet de fabriquer des corps creux comme les bouteilles, les flacons et même les réservoirs d'essence.

Comment ça marche :

Cela commence par l'extrusion d'un tube.



Encore chaud, il est coupé et on l'enferme dans un moule froid.



On injecte de l'air dans le moule pour que le tube se plaque contre les parois où il est très rapidement refroidi.



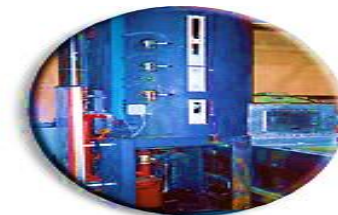
La bouteille ou le flacon est ensuite démoulé. Ce système permet d'obtenir des formes très diverses.

- **L'expansion moulage**

Cette technique est surtout utilisée pour fabriquer toutes sortes d'emballages en polystyrène expansé : caisses à poissons, barquettes...

Comment ça marche :

Avant d'être expansé, le polystyrène se présente sous forme de petites billes qui renferment des micro-inclusions de gaz (à l'état liquide).



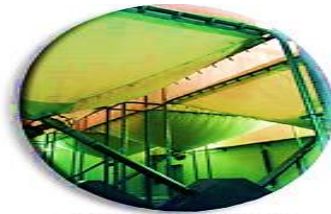
Préexpandeur

Au contact de la vapeur d'eau, la matière plastique se ramollit et le gaz qu'elle contient se dilate. Les petites billes gonflent, comme le pop-corn gonfle grâce à l'air qu'il contient, en gardant une forme plus régulière.



Chaudières

Cette première expansion est réalisée en usine dans de grandes cuves en inox et permet d'obtenir jusqu'à 30 fois le volume initial des petites billes de polystyrène.



Silos de maturation

Après séchage des billes préexpansées dans un silo, cette matière est introduite dans un moule fermé et est soumise à une nouvelle injection de vapeur d'eau.



Presses à mouler

Les billes reprennent leur expansion, occupent tout l'espace du moule et se soudent entre elles pour obtenir la forme désirée de l'emballage.



Presses à mouler en action

## I-11-Conclusion

Dans ce chapitre, on a conclu que les matières plastiques sont des matériaux très utilisés dans divers domaines, et cela, à cause de leurs propriétés (physique, chimiques et mécaniques) qui dépendent aux différentes exigences, telles que leurs poids très légers, leurs états de surface et leurs coûts de revient. De plus, il nous a permis de distinguer les différents types de matières plastiques et leurs différents procédés de mise en forme.

# *Chapitre II*

## *Le Polystyrène*

**II-1-Introduction**

Le polystyrène est une matière très largement utilisée dans le monde, pour différentes applications et dans différents secteurs. De ce fait, de grands volumes de polystyrène sont produits.

Le polystyrène est un produit de grande diffusion. Chaque année les Etats-Unis en produisent environ 3,5 millions de tonnes qui sont utilisés comme plastiques et près d'un million de tonne employée comme élastomères. Tous les produits élastomères à base de styrène sont des copolymères ou des mélanges de polymères. Seul un tiers du polystyrène, sous forme plastique, est constitué d'homopolystyrène. Il trouve son application dans plusieurs domaines, en particulier dans l'industrie des emballages, des plastifiants, des résines, des récipients, les vitres, les diffuseurs de lumière et les équipements électriques...etc.

Le polystyrène (PS) peut être moulé par injection pour donner un grand nombre de produits (gobelets, ustensiles de cuisine, poignée de peigne, jouets...etc.). Ou peut être aussi utilisé dans la fabrication des carcasses de bobines, les transformateurs de fréquences de radio et dans l'emballage.

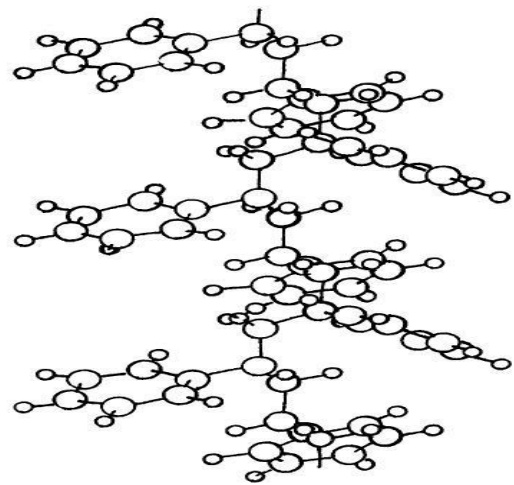
Cependant, il existe plusieurs qualités de polystyrène, qui sont fabriqués pour des usages spécifiques et divers, nous avons les polystyrènes à usage générale, les polystyrènes résistants à la chaleur, les polystyrènes durcis et enfin les polystyrènes expansés qui sont très répandus.

**Mise en contexte:**

Ce chapitre présente d'abord le polystyrène (PS) en tant que matière, les formes de PS, leurs procédés de fabrication et les différentes propriétés du PS.

**II-2-Le polystyrène [2]**

Le polystyrène (PS en abrégé) est le polymère-(CH<sub>2</sub>-CH(Ph))<sub>n</sub>, obtenu par la polymérisation des monomères de styrène CH<sub>2</sub>=CH-Ph, le polystyrène est solide à 20°C et pâteux à 120°C, la fusion s'opérant entre 150°C et 170°C. Le polystyrène est généralement inflammable et combustible, la dégradation commençant dès 350°C et l'auto-inflammation vers 490°C. D'une densité réelle de 1,03 à 1,05, le polystyrène est soluble dans les hydrocarbures chlorés et aromatiques.



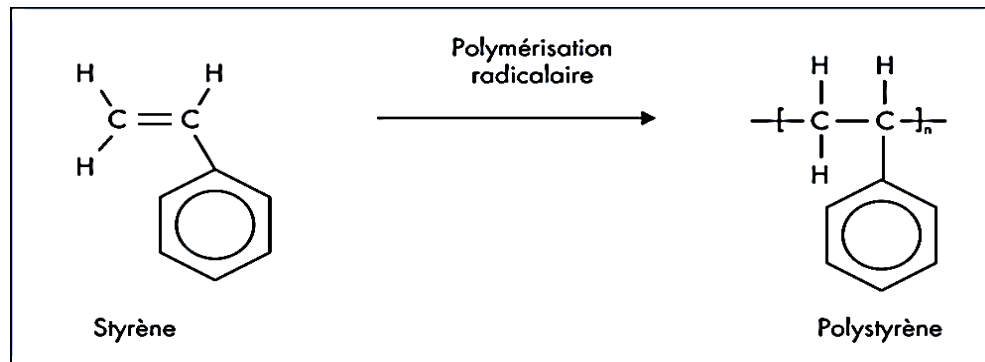
**Figure II.1.** Polystyrène sous sa forme commerciale. **Figure II.2.** Modèle pelote bâtonnet de Polystyrène.

**II-3-Aperçu historique [2]**

La découverte du polystyrène remonte à 1839, mais son exploitation industrielle date de 1933, en Allemagne et aux USA. Le premier procédé utilisé (suspension aqueuse) fonctionnait en discontinu. Dès les années 1940, apparaissent des procédés de polymérisation dite « en masse » continu et en discontinu. Le procédé « masse en continu » triomphe dans les années 1960, grâce aux progrès technologiques permettant d'évacuer la chaleur produite par la polymérisation (710 kJ/kg). Le polystyrène expansé a été inventé en 1944 par Ray Mc Intire (1919-1996) alors qu'il travaillait pour la Dow Chemical. Découvert par hasard, ce polystyrène fut commercialisé sous le nom de « Styrofoam ». Matériau rigide, de faible densité, il a d'abord été utilisé comme isolant thermique dans le bâtiment.

## II-4-Origine [2]

Le PS est obtenu par la polymérisation du styrène (Figure II.3), un matériau issu de la pétrochimie. Plus de 90 % de la production de styrène provient de la déshydrogénation de l'éthylbenzène fabriqué à partir du benzène et de l'éthylène. Sa formule chimique est  $(C_8H_8)_n$ . Il ne contient que du carbone et de l'hydrogène comme éléments chimiques.



**Figure II.3.** Polymérisation du monomère de styrène en polystyrène [2].

Les produits commerciaux fabriqués à partir du PS atactique, caractérisé par un arrangement irrégulier des atomes; il est amorphe et ne peut cristalliser. Deux procédés de polymérisation sont actuellement utilisés pour la fabrication du PS:

La polymérisation radicalaire en suspension et la polymérisation radicalaire en masse. Pour empêcher la polymérisation à basse température, lors du stockage et du transport du styrène liquide, le monomère est stabilisé avec des inhibiteurs tels que le tert-butylcatéchol.

### II-4-1-Monomères constitutifs [2]

#### ➤ Styrène

Le styrène,  $C_6H_5CH=CH_2$ , est le monomère principal des polymères styréniques. Il est préparé à partir de l'éthylène et du benzène qui se combinent en éthylbenzène, lequel est déshydrogéné ou soumis à un cracking pour obtenir le styrène. La polymérisation radicalaire du styrène seul donne un homopolymère, le polystyrène standard cristal, produit amorphe, atactique, transparent et cassant. La polymérisation à catalyse métallocène conduit à un polystyrène syndiotactique, produit opaque à structure cristalline, ayant de hautes performances techniques mais beaucoup plus cher que le PS standard. Du fait de la compatibilité du styrène avec de nombreux monomères et polymères, on peut le modifier par copolymérisation pour apporter des propriétés particulières, comme la résistance aux chocs, une meilleure tenue thermique...etc.

### II-4-2-Butadiène

La polymérisation du styrène avec un élastomère donne un copolymère, le polystyrène choc, produit opaque et résistant aux chocs. L'élastomère employé est le polybutadiène. Pour améliorer la résistance à l'oxydation et au vieillissement ultraviolet, des copolymères avec l'EPDM [poly (éthylène / propylène / diène monomère)] ont été aussi développés.

➤ **Autres comonomères**

D'autres comonomères, comme l' $\alpha$ -méthylstyrène, l'anhydridemaléique, l'acrylonitrile sont utilisés pour apporter des propriétés particulières au PS.

### II-5- Formes de polystyrène [2]

Les plastiques recyclables utilisés pour fabriquer des contenants alimentaires possèdent un code d'identification placé au centre d'un ruban Moebius pour symboliser le recyclage. Celui du PS EST le numéro 6 (Figure II.4). L'utilisation de ce système de codification développé par la Society of the Plastic Industry (SPI) pour différencier les diverses résines de plastique n'est pas obligatoire, mais volontaire.



**Figure II.4.** Code d'identification du polystyrène [2].

Il peut se présenter sous différentes formes (Cristal, Choc, Expansé etc.).Le polystyrène de base, appelé PS cristal, est une matière dure et cassante, pouvant être transparente ou colorée. Ses propriétés mécaniques et thermiques peuvent être modifiées par l'ajout de plastifiants ou de butadiène (caoutchouc) pour en faire un polystyrène dit choc. C'est un matériau très facile à transformer, par injection ou extrusion par exemple [2].

➤ **Polystyrène standard (Cristal)**

Ce PS est également appelé le polystyrène d'utilisation général (General Purpose Polystyrène (GPPS)) ou bien le polystyrène rigide (PSR). C'est un polymère amorphe, transparent, brillant, rigide, cassant et pouvant être coloré. Il est souvent appelé PS cristal à cause de son aspect transparent. C'est le premier PS obtenu suite à la

polymérisation. Toutes les autres formes du PS sont obtenues par modification de celui-ci. Le PS cristal peut également être façonné par injection et des pièces moulées, comme des gobelets transparents ou des boîtiers de Digital Versatile Disc (DVD), sont obtenues. Dans ce cas, il porte le nom de PS injecté [2].

➤ **Polystyrène choc**

Ce matériau résulte de la polymérisation du styrène en présence d'un élastomère renforçant. Généralement, le polybutadiène  $\gamma$  est inséré à cette fin. Le PS choc est également un polymère amorphe constitué de deux phases distinctes: l'une continue, composée de PS, appelée matrice et l'autre discontinue comprenant des nodules de polybutadiène dispersés dans la matrice. La couleur [2].

➤ **Polystyrène expansé**

**Terminologie :** on utilisera les abréviations :

- **PSE :** (polystyrène expansé) pour les mousses de polystyrène en général.
- **PSE-M :** (polystyrène expansé moulé) pour celles obtenues par le procédé d'expansion-moulage à partir de perles de polystyrène expansible.
- **PSE-E :** (polystyrène expansé extrudé) pour celles.



**Figure II.5.** Polystyrène expansé (PSE).

Le polystyrène expansé (PSE) (Figure II.5), est un matériau alvéolaire rigide, peu dense, dont les principales utilisations sont l'isolation thermique des bâtiments et l'emballage des produits industriels ou alimentaires. Il existe deux types de polystyrène expansé :

- ✓ Le polystyrène expansé moulé (PSE-M) ((Figure II.6).
- ✓ Le polystyrène expansé extrudé (PSE-E) ou XPS (Extruded polystyrene foam) (FigureII.7).

❖ **Le PSE-M** : est obtenu à partir d'un polystyrène cristal auquel on a ajouté en cours de polymérisation, un agent d'expansion (le pentane,  $C_5H_{12}$ ).

❖ **Le PSE-E** : est quant à lui obtenu lors de l'extrusion par injection sous pression d'un gaz d'expansion (le pentane) dans le polymère cristal fondu. Les propriétés les plus remarquables du polystyrène expansé sont :

- Sa faible masse volumique ;
- Son pouvoir isolant thermique ;
- Ses excellentes propriétés mécaniques (résistance en compression, capacité d'amortissement des chocs) ;
- Son insensibilité à l'eau ;
- Sa facilité de mise en forme (moulage, découpage) ;
- Sa recyclabilité.

Enfin, la production de styrène à grande échelle et la facilité de polymérisation de ce monomère conduisent à un compromis propriétés/prix particulièrement intéressant pour les deux marchés principaux du polystyrène expansé.



**Figure II.6.** Polystyrène expansé moulé (PSE-M).



**Figure II.7.** Polystyrène expansé extrudé (PSE-X).

## II-6-Principe des procédés de polymérisation [16]

Le polystyrène est fabriqué à l'échelle industrielle depuis les années 1930 aux États-Unis et en Allemagne. Trois procédés sont actuellement utilisés:

### II-6-1-Polymérisation radicalaire en suspension

La polymérisation a lieu en suspension dans l'eau. C'est un procédé discontinu qui impose la manipulation et le traitement d'importantes quantités d'eau. Il n'est utilisé que pour le polystyrène expansé, l'ABS et certains polystyrènes spéciaux (à très haute masse moléculaire, ou bien polystyrène choc utilisant du caoutchouc EPDM).

### II-6-2-Polymérisation anionique en solution

La polymérisation a lieu en solution dans un solvant hydrocarbure; la réaction est initiée par des composés organiques du lithium. C'est le procédé de fabrication des copolymères à bloc styrène / butadiène de type « CLIPS » (Clear Impact Polystyrène). La réaction est menée de façon discontinue dans des réacteurs agités (polymérisation du butadiène, du styrène, couplages éventuels des chaînes). La réaction des monomères est quasi complète et les initiateurs doivent être désactivés par des composés polaires avant que le solvant soit séparé du produit fini par une étape de dégazage. Le polymère est alors extrudé et granulé.

### II-6-3-Polymérisation en masse (radicalaire)

C'est le procédé de fabrication du PS cristal et du PS choc [ou HIPS (High Impact Polystyrène)]. Il a été développé dès les années 1940 par les compagnies BASF et Dow; d'autres procédés ou familles de procédés ont vu le jour depuis et sont actuellement exploités commercialement (citons, par exemple, les procédés des sociétés Monsanto repris par Nova, ou bien Cosden/Fina devenu Atofina).

Tous les procédés de fabrication du polystyrène en masse sont basés sur le même principe; ils diffèrent principalement par le nombre et la technologie des équipements (spécifiques à chaque détenteur de procédé).

Le procédé « masse » permet des capacités, des coûts d'exploitation et d'investissements bien plus faibles que le procédé.

«Suspension », avec des rejets liquides ou gazeux très faibles dans l'environnement. Ce procédé a remplacé presque partout le procédé suspension pour la fabrication du polystyrène.

### II-6-4-Procédé en masse continu [16]

- **Étapes du procédé**
  - **Préparation** : de l'alimentation (pour le PS choc, dissolution de polybutadiène broke dans le styrène).
  - **Préchauffage** : de la solution d'alimentation entre 60 et 110 °C suivant le procédé.
  - **Réaction** : dans un ou plusieurs réacteurs agités continus ou réacteurs pistons. La réaction est menée entre 90 et 175 °C suivant le procédé.

L'enthalpie de réaction (170 kcal/kg de PS formé soit 710 kJ/kg de PS formé) est évacuée soit par ébullition du mélange réactionnel et condensation des vapeurs, soit par échange thermique dans les serpentins via un fluide caloporteur. Le taux de solide à la sortie du dernier réacteur est compris entre 65 et 75 % en masse typiquement ; le temps de séjour en réaction est typiquement de 5 à 9 h. Les conditions opératoires (températures, vitesses d'agitation, temps de séjour, composition de l'alimentation) sont ajustées afin d'obtenir les caractéristiques désirées du produit fini.

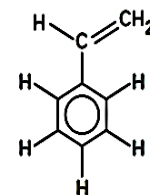
- **Dévolatilisation** : par réchauffage rapide de la solution entre 230 et 260 °C typiquement, puis évaporation du diluant et du monomère non réagi. La dévolatilisation peut se faire en une ou plusieurs étapes afin d'abaisser le taux de monomère résiduel dans le produit fini. Le monomère et les solvants évaporés sont condensés, puis recyclés à l'alimentation ou dans le premier réacteur.
- **Granulation** : le polymère fondu est pompé du dernier dévolatiliseur et granulé sous forme de petits cylindres ou de petites sphères de 3 mm de diamètre.  
Stockage/expéditions : les granulés sont séchés, triés, puis mis en silos pour être ensachés ou vendus en vrac.

Une des caractéristiques du procédé est la viscosité du mélange dans les réacteurs et du polystyrène fondu (de 5 Pa.s au début de la réaction jusqu'à 3000 Pa.s dans les devolatiliseurs pour les grades à masse moléculaire élevée). Ainsi est-il nécessaire d'utiliser des pompes à engrenages pour transférer le mélange d'un réacteur à l'autre ou d'un devolatiliseur à l'autre. Les unités de polystyrène choc peuvent en général produire du polystyrène cristal (il suffit de ne plus introduire de polybutadiène dans le procédé). Les unités de polystyrène cristal ne peuvent en général pas produire de polystyrène choc, en l'absence d'équipements permettant de dissoudre le polybutadiène. La (Figure II.9) présente un exemple de procédé de fabrication de polystyrène choc qui peut être également utilisé pour produire du polystyrène cristal. Du PS choc va de translucide à opaque, car les deux phases n'ont pas le même indice de réfraction. Sa résistance au choc est aussi une conséquence de cette structure à deux phases. Les PS chocs supportent des impacts plus importants que le PS normal.

## II-7-Fabrication du polystyrène expansible

### II-7-1 Polymérisation

Le procédé de polymérisation en suspension dans l'eau est employé pour la polymérisation du PSE. Le styrène monomère (C<sub>8</sub>H<sub>8</sub>) (Figure II.8) est dispersé en fines gouttelettes dans l'eau. Les initiateurs radicalaires de polymérisation sont essentiellement des peroxydes organiques (peroxyde de benzoyle) qui doivent être solubles dans le styrène monomère et insolubles dans l'eau. La taille des gouttelettes peut être ajustée par de nombreux paramètres comme l'addition d'un agent protecteur qui permet de stabiliser la suspension, comme les conditions de mélange, la forme du réacteur, etc. On peut éventuellement incorporer un système ignifugeant.



**Figure II.8.** Styrène monomère (C<sub>8</sub>H<sub>8</sub>).

La réaction s'opère selon un procédé discontinu dans un réacteur muni d'un agitateur et équipé d'une double enveloppe permettant par chauffage ou par refroidissement, de réguler la température interne du réacteur. L'ensemble de la réaction est représenté sur la (Figure II.9).

La réaction exothermique se développe suivant un programme de température défini et, lorsqu'un certain taux de conversion est atteint, l'agent d'expansion est introduit sous pression, généralement du pentane (C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>). Des mélanges de butane sont utilisés au Japon. La durée de ces opérations est d'environ 10 h. Ces opérations terminées, le mélange obtenu, constitué de billes sphériques de polystyrène expansible et d'eau, est refroidi et envoyé dans des cuves de stockage intermédiaire. Le diamètre de ces perles varie entre 0,2 mm et 3 mm. La formule du motif du PSE est donnée sur la (Figure II.10). [16]

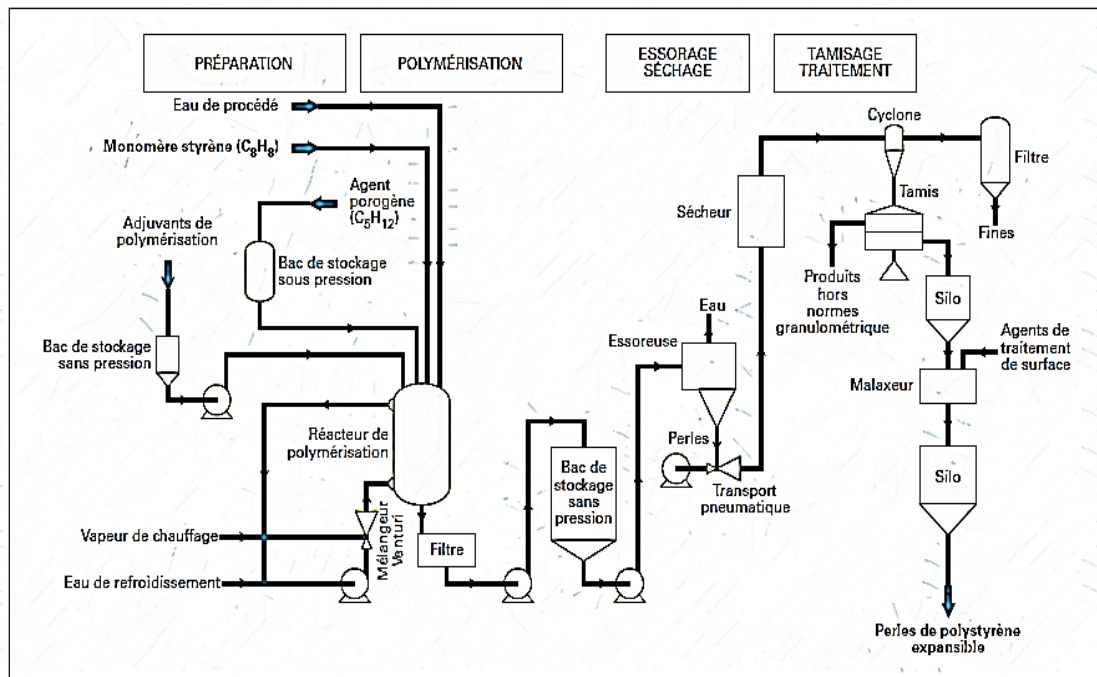


Figure II.9. Unité de fabrication du polystyrène expansible PSE.

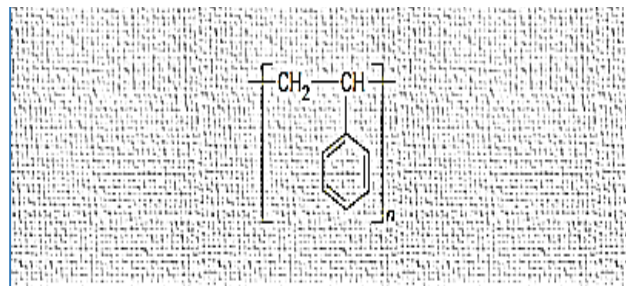


Figure II.10. Motif du polystyrène expansé PSE.

### II-7-2-Traitement de finition [16]

Le mélange précédent est ensuite essoré pour séparer l'eau des perles et un séchage est alors réalisé. Il existe une certaine dispersion dans le diamètre des perles obtenues. Un tamisage permet d'obtenir différentes coupes granulométriques destinées à différentes applications. Ces différentes coupes granulométriques reçoivent un traitement de surface destiné à optimiser leur mise en œuvre. C'est un enrobage par divers stéarates (organiques ou métalliques). Après un stockage intermédiaire en silos, les produits sont conditionnés en conteneur carton d'une tonne ou bien en fûts métalliques. Le produit doit être conservé à une température modérée; La durée de conservation est limitée :

- à 1 mois pour le stockage en conteneur carton ;
- à 6 mois pour le stockage en fûts métalliques.

En effet, le pentane se diffuse lentement à l'extérieur des emballages et les performances d'expansibilité du produit se dégradent dans le temps.

## II-8-Principaux polymères styréniques [6]

La compatibilité du styrène avec de nombreux monomères et polymères a permis le développement d'une famille variée de polymères styréniques avec des propriétés différentes allant du transparent à l'opaque, du cassant au résistant aux chocs, du rigide à l'élastomérique. Le (Tableau II.1) récapitule les principaux polymères styréniques, leurs monomères constitutifs ainsi que leurs propriétés principales :

**Tableau II.1.** Principaux polymères styréniques. [6]

| Comonomères utilisés avec le styrène (1)           | Procédé de polymérisation                 | Polymère                         |                                                                                   |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
|                                                    |                                           | Symbole                          | Caractéristique principale                                                        |
| Styrène                                            | radicalaire en masse, en suspension, etc. | PS standard ou PS <i>cristal</i> | Thermoplastique transparent et cassant                                            |
|                                                    | par catalyse métallocène                  | PS syndiotactique                | Thermoplastique opaque utilisé pour plastiques techniques                         |
| $\alpha$ -Méthylstyrène                            | en masse et en suspension                 | S. $\alpha$ MS                   | Thermoplastique transparent, cassant et de tenue thermique élevée                 |
| Polybutadiène                                      | en masse et en suspension                 | PS choc                          | Thermoplastique opaque, résistant aux chocs                                       |
| Acrylonitrile (10 à 28 %)                          | en masse et en émulsion                   | SAN                              | Thermoplastique transparent, cassant et de tenue thermique très élevée            |
| Acrylonitrile (10 à 28 %) et butadiène (10 à 35 %) | en masse et en émulsion                   | ABS                              | Thermoplastique opaque, très résistant aux chocs                                  |
| Acrylonitrile et ester acrylique                   | en masse et en émulsion                   | ASA                              | Thermoplastique opaque, très résistant aux chocs et résistant au vieillissement   |
| Butadiène (15 à 30 %)                              | anionique                                 | SB                               | Thermoplastique transparent très résistant aux chocs et de tenue thermique faible |
| Butadiène ou isoprène (40 à 75 %)                  |                                           | SBS ou SIS                       | Élastomère thermoplastique opaque, de tenue thermique faible                      |

(1) Les pourcentages indiqués sont des teneurs massiques.

## II-9-Production du polystyrène expansé PSE-M à partir du polystyrène expansible [16]

Le polystyrène expansé est obtenu à partir du polystyrène expansible après trois étapes de fabrication :

Les différentes billes de polystyrène expansible, matière première nécessaire à la fabrication du PSE-M sont livrées en container dans des cartons de grande capacité pesant environ une tonne (Figure II.11). Élaborées par des fournisseurs selon un cahier des charges très précis



Figure II.11. La matière première dans des cartons de grande capacité.

- **La pré-expansion ou pré-moussage** : C'est à ce stade que la masse volumique finale est déterminée ;
- **La maturation et le stockage** : C'est à ce stade que les perles reposent pendant plusieurs heures pour permettre leur stabilisation ;
- **Le moulage** : C'est à ce stade que les perles sont soudées entre elles. Les opérations de pré-expansion, de maturation et de stockage ont trois buts principaux :
  - permettre au pentane en surface de se disperser afin de réduire pendant le moulage la thermosensibilité des perles préexpansées;
  - éliminer l'excédent d'eau contenu dans les perles afin d'obtenir des perles sèches ;
  - laisser à l'air le temps de pénétrer dans les alvéoles pour combler le vide créé pendant la pré-expansion. La (Figure II.12) représente l'ensemble du procédé de fabrication. [16]

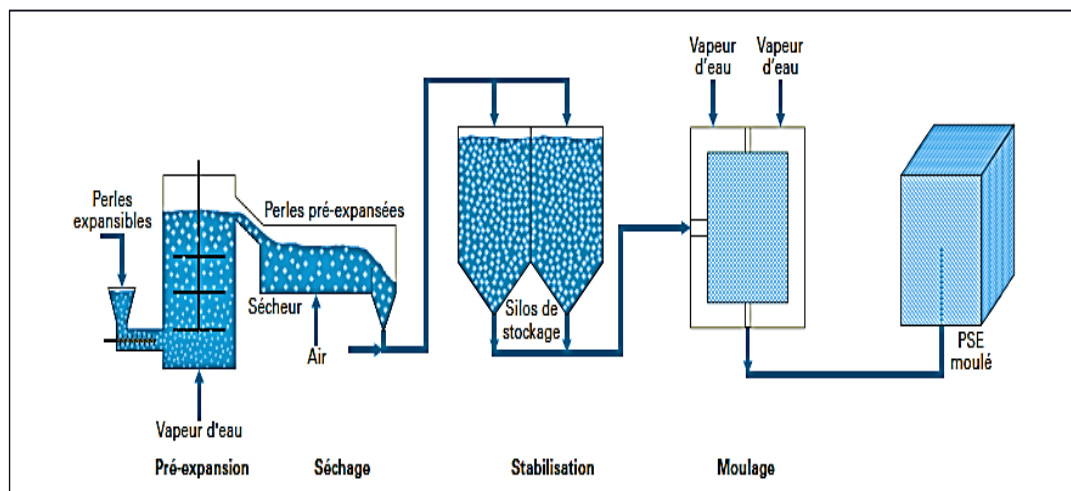
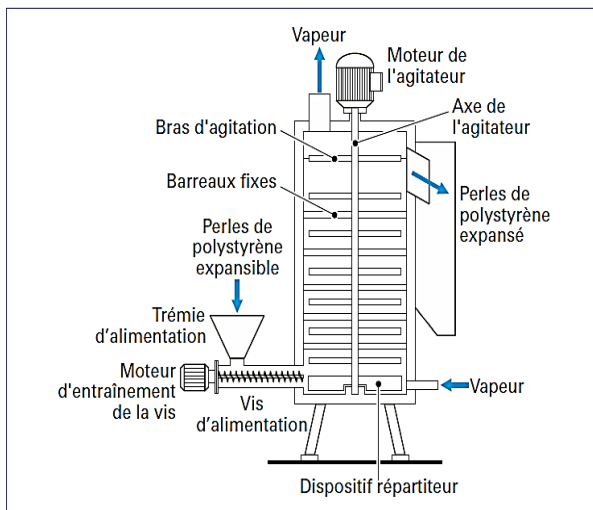


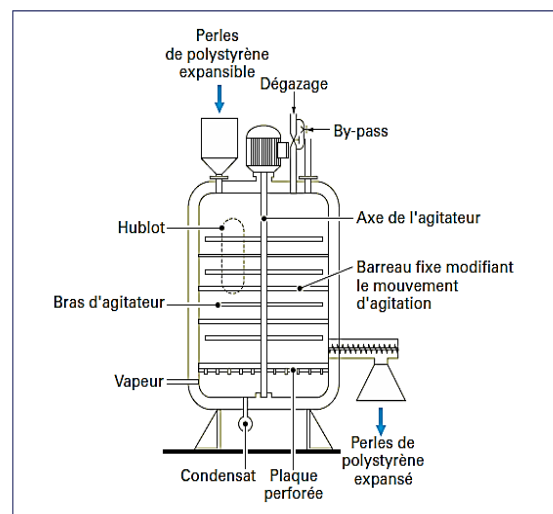
Figure II.12. Unité de fabrication du polystyrène expansé moulé.

### II-9-1-Préexpansion des perles en polystyrène expansible

Le polystyrène expansible est introduit dans une cuve en inox. L'opération consiste à chauffer les perles par de la vapeur d'eau. Il se produit un ramollissement de la matrice polystyrène vers 90 °C et une augmentation de la pression de l'agent d'expansion (appelé encore agent porogène) qui se trouve au-dessus de sa température normale d'ébullition (pour le pentane technique, 35 °C). Ces deux phénomènes simultanés provoquent l'expansion des perles. La (Figure II.15) représente l'évolution de la masse volumique apparente des perles en fonction du temps de séjour dans le préexpandeur. La masse volumique minimale atteinte est variable selon les produits. Elle dépend des facteurs comme [16] : La taille initiale des perles ; La teneur en agent d'expansion ; La présence de certains adjuvants.



**Figure II.13.1.** Préexpandeur a fonctionnement continu. [16]



**Figure II.14.** Préexpandeur a fonctionnement discontinu. [16]

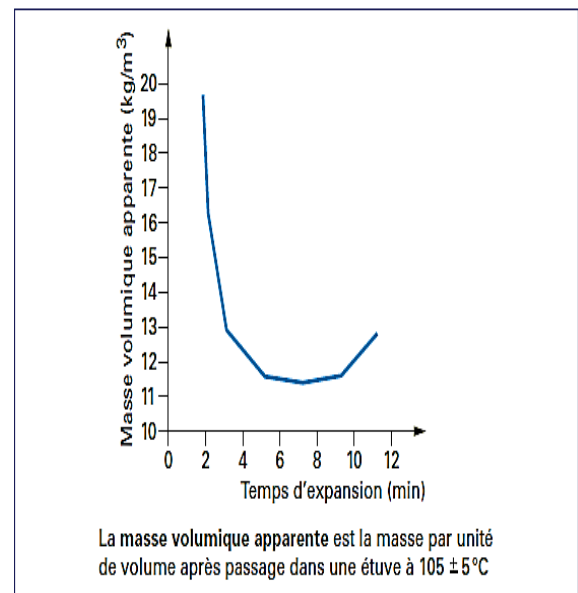


**Figure II.13.2.** . Préexpandeur à fonctionnement continue utilisé à l'ENIEM.

Les Figures (II.13.1, 2) représente un préexpanseur à fonctionnement continu et la (Figure II.14) représente un préexpanseur à fonctionnement discontinu. Un temps de séjour prolongé dans l'expanseur ou une température de vapeur trop élevée peuvent conduire à une reprise en masse volumique due à l'affaissement des perles. Cet affaissement est dû à une chute de la pression interne dans la perle, conséquence d'une diffusion trop importante de l'agent d'expansion à l'extérieur de la perle. Les appareils utilisés sont en acier inoxydable et à fonctionnement continu (Figure II.13.1, 2) ou discontinu (Figure II.14). Dans le fonctionnement continu, les perles expansibles sont introduites en continu par une vis sans fin en bas du préexpanseur et les perles expansées se déversent par le haut. Les préexpanseurs continus sont utilisés quand de grands volumes d'une même masse volumique sont requis. [16]

Dans le fonctionnement en discontinu, les perles sont introduites sous la forme d'une charge. Le réglage de la masse volumique s'effectue en agissant sur le temps de séjour des perles dans l'expanseur et (ou) la pression de vapeur d'alimentation. Les préexpanseurs discontinus permettent d'obtenir des masses volumiques très faibles (Figure II.15), car ils peuvent fonctionner sous pression, donc à des températures élevées (pression de vapeur jusqu'à 0,6 bar ou 60 kPa). Avec ces appareils, les changements de matière première et (ou) de masse volumique de perles expansées sont rapides. Les débits de production des expanseurs varient suivant :

- leur taille ;
- la masse volumique souhaitée pour le produit final;
- la matière utilisée. Les plus gros débits peuvent assurer une production de 1,5 t/h à 15 kg/m<sup>3</sup> et d'environ 3,5 t/h à 25 kg/m<sup>3</sup>. Si on souhaite de très faibles masses volumiques, il est nécessaire d'effectuer 2 à 3 expansions successives, en prenant bien soin de laisser le produit se stabiliser entre chacune des passes. Les perles, à leur sortie de l'expanseur, peuvent contenir jusqu'à 10 % d'eau en masse. Cette humidité ne facilite pas le convoyage. Aussi sont-elles, généralement, séchées par un passage dans un lit fluidisé par de l'air. [16]



**Figure II.15.** Courbes d'expansion de PSE.

## II-9- 2-la maturation et le stockage/expéditions

En sortie de préexpanseur, les perles sont ramenées à la température ambiante. Cela provoque à l'intérieur des perles la condensation de l'agent porogène résiduel et de la vapeur d'eau qui y a pénétré, et crée ainsi une dépression. Un certain temps de stabilisation en silos

(Figure II.16) est donc nécessaire pour permettre une diffusion d'air à l'intérieur des perles et rétablir ainsi un équilibre de pression avec l'extérieur, indispensable au bon déroulement de l'étape ultérieure de moulage. Cette étape de maturation permet aussi d'éliminer l'excédent d'eau contenu dans les perles et nuisible au moulage. Enfin, pour les masses volumiques élevées, il est nécessaire d'éliminer une partie de l'agent porogène, pour ne pas atteindre au moment du moulage des pressions trop élevées dans les moules. Les temps de stabilisation nécessaires sont généralement compris entre 4 et 24 h. Ils dépendent de la masse volumique et de la taille des perles. Les silos utilisés sont en toile perméable à l'air. Leur taille varie de 10 à 150 m<sup>3</sup>. [16]



**Figure II.16.** Le stockage du polystyrène dans les silos à l'ENIEM.

### II-9- 3-Moulage de blocs

Les moules à blocs (Figure II.17.a) ont généralement les dimensions suivantes : 1,0 à 1,25 m de hauteur, 0,5 à 1 m de largeur, 6 à 8 m de longueur. Ils sont construits en métaux inoxydables (acier ou alliage d'aluminium). Les six parois, en contact avec les perles expansées à mouler, comportent de nombreux orifices (trous fins, buses ou fentes de moins de 1 mm de largeur), qui vont permettre à l'air de s'échapper et à la vapeur de pénétrer dans le moule. Derrière chaque paroi se trouve une chambre dite chambre à vapeur, qui comporte une arrivée de vapeur et une sortie de condensats (à la partie inférieure). La plupart des moules à blocs sont équipés d'une installation de vide (réservoir + pompe) (Figure II.17.b). Après fermeture et remplissage du moule, le cycle de moulage I → II → III (Figure II.19) peut commencer. [16]

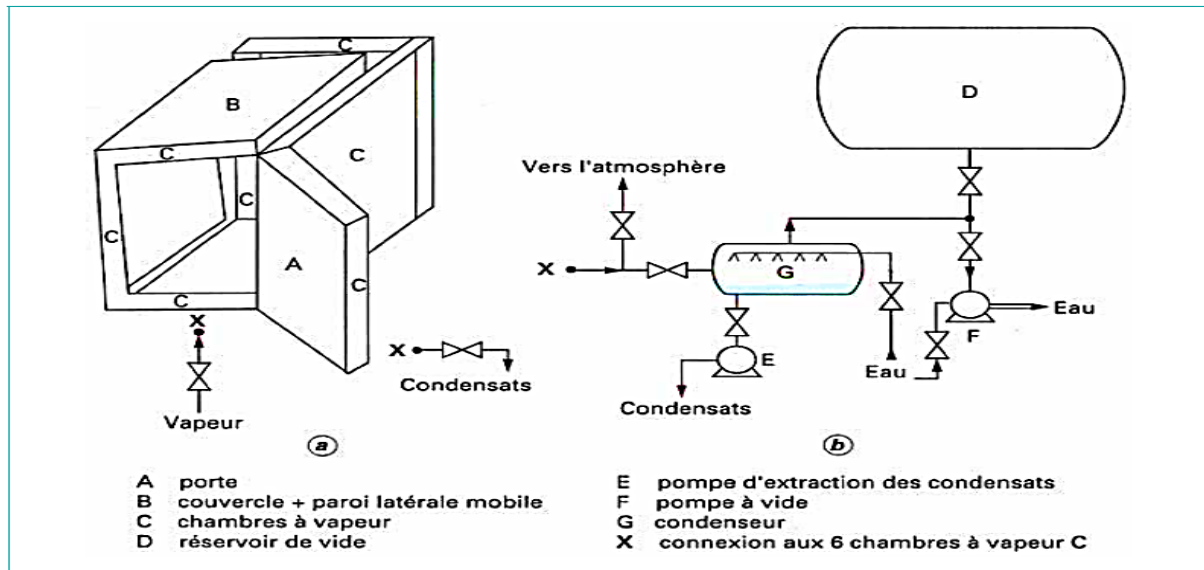


Figure II.17. Moule à bloc de PES et installation de vide.

### I) Vide préalable

Le cycle commence par une mise en dépression des chambres à vapeur et donc de l'intérieur du moule. La connexion du réservoir de vide permet une chute rapide de la pression (période 1), puis la pompe à vide seule permet d'accentuer encore un peu plus le niveau de vide (période 2). Cette phase de vide préalable permet d'éliminer l'air et l'eau présents dans le moule, afin de favoriser par la suite le soudage des perles. [16]

### II) Vaporisation

Elle commence alors que le moule est encore en dépression (période 3), vannes de sortie des condensats fermées. Puis, lorsque l'équilibre avec la pression atmosphérique est atteint, les vannes de sortie des condensats sont ouvertes (période 4). Ces deux étapes sont appelées phases de rinçage ou désaération. La (période 5) est celle de montée en pression, dite de choc vapeur. La vapeur est uniquement envoyée dans les deux chambres à vapeur latérales et on laisse ouvertes les vannes de sortie des condensats sur les quatre autres chambres. La vapeur traverse l'intérieur du moule. Sous l'effet de la chaleur, les perles préexpansées se dilatent à nouveau et commencent à se souder.

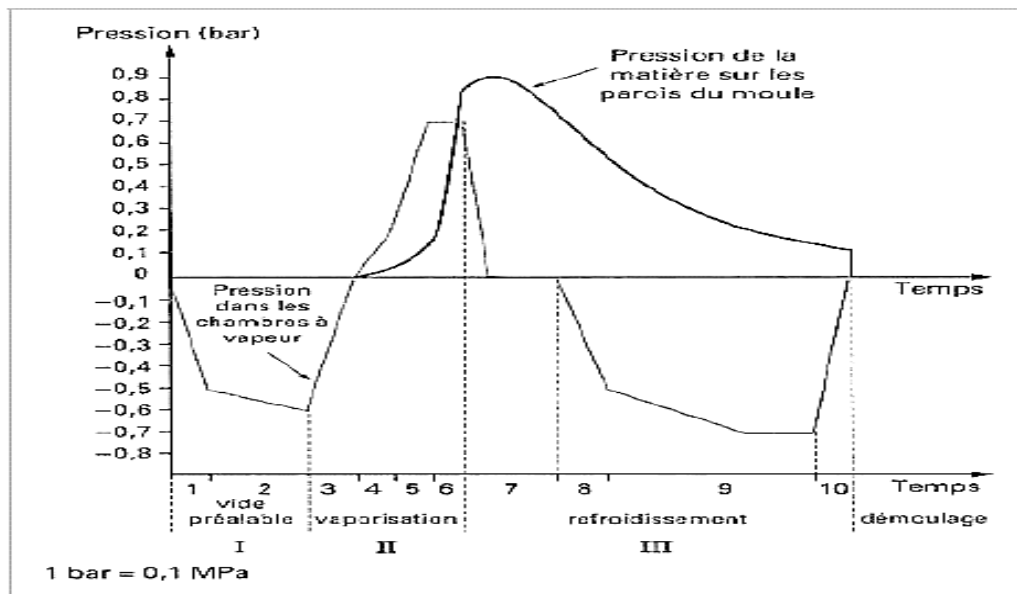
La (période 6) est celle de stabilisation dite d'autoclave. Toutes les vannes de sortie de condensats sont fermées et l'on maintient la pression de vapeur dans les chambres pendant un court instant (3 à 10 s). On obtient ainsi le soudage définitif du bloc. [16]

### III) Refroidissement

Le bloc doit ensuite être refroidi avant son démoulage, de façon que la pression exercée par la matière sur les parois du moule diminue. Après la détente de la surpression de vapeur avec l'ouverture des vannes de sortie des condensats (période 7), celles-ci sont fermées à nouveau et l'on refait le vide (périodes 8 et 9). Le condensat chaud présent à l'intérieur du bloc s'évapore et il est évacué. Simultanément, le bloc perd l'énergie de vaporisation correspondante et se refroidit. Lorsque la pression de la matière sur les parois du moule atteint une valeur voisine de 0,1 bar, le vide est arrêté (période 10).

Une fois, la pression rééquilibrée avec l'atmosphère, le moule peut être ouvert. Habituellement, la porte est ouverte, puis une paroi latérale et le dessus du moule pivotent ensemble (Figure II.17.a). Le bloc est expulsé grâce à un éjecteur.

L'ensemble du cycle dure généralement entre 3 et 15 min (selon le type de moule à blocs, la densité des perles préexpansées et le type de matière première utilisés). Il est à noter qu'au moment de la sortie du bloc l'intérieur de la matière est encore à 90-95 °C et que la pression interne résultante est supportée par les parois du bloc. Il est donc nécessaire, avant le découpage en plaques, de laisser le bloc poursuivre son refroidissement pendant environ 24h. L'obtention directe de plaques de PSE-M peut aussi être réalisée avec des machines de moulage continu en bande. Dans ce cas, les perles préexpansées placées entre deux bandes horizontales mobiles passent dans des zones de vaporisation et de refroidissement et sortent sous la forme d'un panneau moulé sans fin. Les plaques sont ensuite découpées dans ce panneau aux dimensions voulues. Ces installations ont perdu de leur intérêt à l'apparition des grands moules à blocs modernes équipés de vide, souvent plus rentables et, en tout cas, de fonctionnement plus souple. [16]



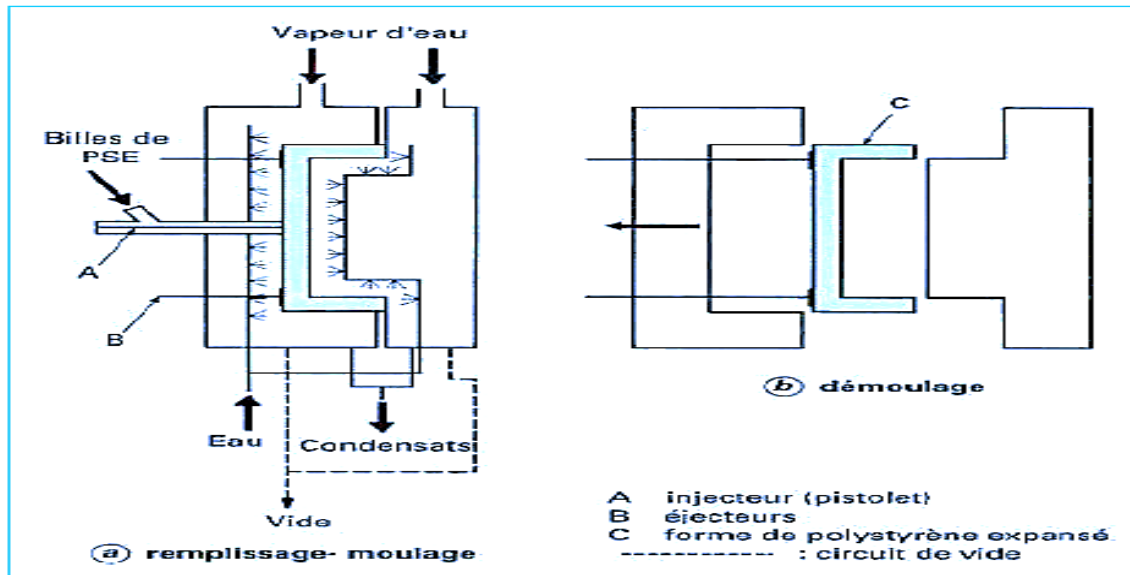


Figure II.19. Moulage en forme du polystyrène expansé (PSE). [16]

## II-9- 4-Moulage en forme [16]

### II-9-4-1-Principe

Les machines automatiques pour le moulage en forme permettent de fabriquer en moyenne et grande séries des objets de formes variées. Elles fonctionnent sur le même principe que les moules à blocs. Les moules (Figure II.19) sont en deux parties dont l'une se déplace, en général grâce à un système de vérins. Les temps de moulage sont de l'ordre de 1 min. [16]

### II-9-4-2-Machines équipées de vide

Les perles de polystyrène expansé sont introduites dans le moule fermé par un ou plusieurs injecteurs (ou pistolets). Le cycle de vaporisation se déroule suivant des phases similaires à celles d'un moule à blocs (préchauffage des chambres à vapeur, balayage transversal, montée en pression, maintien en pression). Le refroidissement de la pièce moulée est réalisé tout d'abord par une projection d'eau sur les parois arrières des moules, puis par une création de vide dans les chambres à vapeur (par l'intermédiaire d'une pompe à vide). Le moule peut alors être ouvert et la pièce est expulsée par des éjecteurs ou par pression d'air comprimé. [16]

**II-9-4-3-Machines « transfert »**

Elles fonctionnent avec deux moules. Le premier, dit moule chaud, sert au moulage des perles. La pièce moulée n'est pas refroidie dans ce moule par les techniques décrites précédemment, mais elle est transférée encore chaude dans le deuxième moule qui, lui, est froid. Après stabilisation, la pièce est expulsée du moule froid et une nouvelle pièce en provenance du moule chaud vient s'y placer.

Le bilan énergétique de ce type de machine est plus intéressant que celui des machines à vide, mais elles demandent un investissement de départ plus important. [16]

**II-9-4-4- Machines de complexage**

Elles permettent de réaliser des complexes objets moulés en PSE/film de plastique rigide, monofaces ou bifaces. Deux procédés existent : on peut réaliser d'abord le moulage de l'objet en PSE (par procédé classique « à vide » ou par « transfert ») puis surmouler sur celui-ci le film de plastique, ou bien thermoformer en premier, sur une empreinte chauffée, le film de plastique et mouler ensuite l'objet en PSE sur la face interne du film. Le film est généralement en polystyrène, de façon à faciliter l'éventuel recyclage ultérieur de la pièce. Un tel complexage permet d'améliorer le comportement mécanique de l'objet en PSE-M par rigidification. On peut aussi réaliser des impressions d'excellente qualité sur le film. [16]

**II-9-4-5-Le séchage du polystyrène expansé [5]**

Lorsqu'il s'agit d'une pièce à intégrer dans un produit quelque conque, la pièce peut provoquer la rouille des autres pièces à cause de l'eau résiduelle dans les pièces en PS expansé, pour la pièce devant être coupée en tranche, l'eau contenue dans la pièce peut exercer une mauvaise influence sur les opérations de coupe. Afin d'éviter ces inconvénients, le produit en polystyrène expansé doit être séché et suffisamment après le formage et ça après les avoir misent dans la chambre de séchage avec des chariots ou on indique l'heure et la date de stockage. Les périodes de séchage sont dans le (Tableau II.2) suivant :

**Tableau II.2.** Période de séchage pour le polystyrène expansé moulé.

| pièce                                                        | Temps de séchage |
|--------------------------------------------------------------|------------------|
| Pièce formée                                                 | Trois heures     |
| Pièce formé devant être coupée en tranche<br>ou matière bloc | Six heures       |

- La température dans la chambre de séchage sera  $50\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ .

Pour assurer cette température, l'entreprise a un équipement qui est composé des pièces suivantes. [5]

1. Chauffe-ventilateur.
  - Radiation : 30000 kcal/h.
  - Pression de vapeur : 1 kg/cm<sup>3</sup>.
  - Température à l'entrée : 25°C.
  - Débit d'air : 47m<sup>3</sup>
  - Moteur : 200w.
  - Les dimensions extérieures de la chauffe-ventilateur : 570 \* 650 \* 600 mm.
2. Tableau de commande de la température.
3. Électrovanne à vapeur.
4. Chariot à produits.

Après avoir laissé sécher les pièces le temps spécifié ci-dessus, sortir les pièces avec les chariots. Pour les pièces formées en bloc celle-là sont dirigées pour une découpe en tranche selon le produit voulu ou en différentes positions d'isolation ou d'emballage. L'outil de base le plus simple pour découper le polystyrène est un archet sur lequel on tend un fil d'acier résistif (Figure II.20).

#### II-9-4-6-Traitements complémentaires [16]

##### ❖ Découpage

La production de blocs de PSE-M est presque toujours suivie d'un découpage en plaques. Les installations modernes fonctionnent avec des fils oscillants chauffés entre 200 à 400 °C. Pour les objets moulés, le découpage n'est que très peu utilisé, la forme finale désirée étant réalisée dès l'opération de moulage. [16]

##### ❖ Doublage

Il consiste à associer une plaque de PSE-M à une plaque d'un autre matériau tel que plâtre, carton, métal ou fibres agglomérées. On opère par collage à froid.

##### ❖ « Élastification »

Le PSE-M a une bonne résistance à la compression mais il est peu élastique. Le procédé principalement utilisé pour élastifier le PSE-M consiste à comprimer un bloc, généralement de masse volumique apparente voisine de 10 kg/m<sup>3</sup>, perpendiculairement au plan de découpage ultérieur et jusqu'à un écrasement des deux tiers de l'épaisseur initiale. Puis on laisse le bloc opérer sa reprise élastique. Les plaques obtenues après découpage ont une faible rigidité dynamique et une résistance à la compression suffisante pour pouvoir être utilisées comme isolant acoustique contre les bruits d'impact sur les planchers. [16]

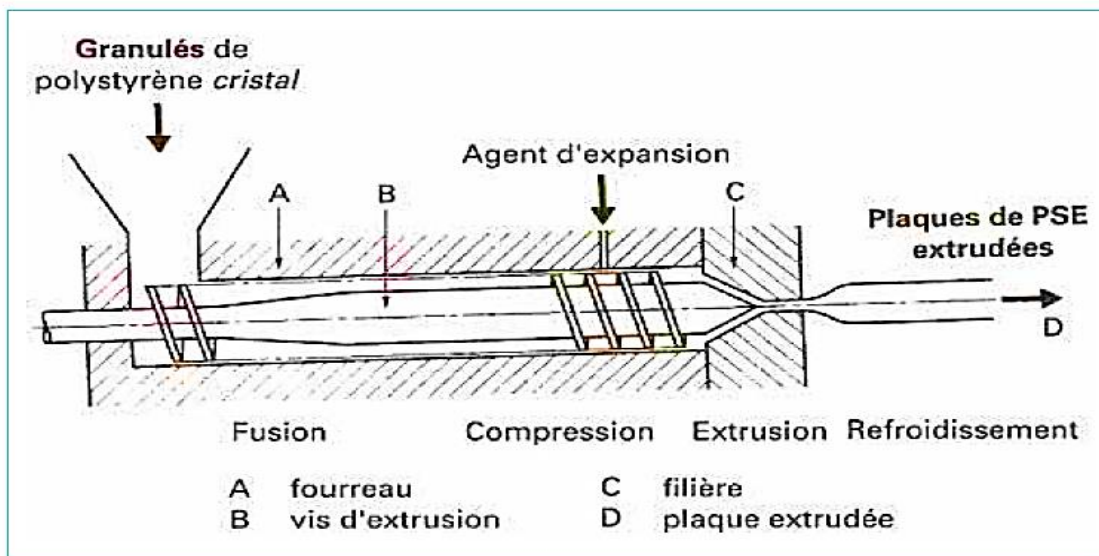


**Figure II.20.** Résistance industriel pour la découpe du PSE-M utilisée par l'ENIEM.

## II-10-Production de polystyrène expansé extrudé PSE-X (XPS) [16]

Le procédé d'extrusion (Figure II.21), le plus répandu est connu sous le nom de direct gazing. Il permet d'obtenir des plaques (jusqu'à 200 mm d'épaisseur) et des feuilles (à partir de 0,5 mm d'épaisseur) en polystyrène expansé extrudé.

Il consiste à fondre sous pression dans une extrudeuse des granulés de polystyrène cristal, puis à mélanger au polymère fondu un (ou des) agent(s) de nucléation et le (ou les) agent(s) d'expansion liquide(s). Le mélange est maintenu sous pression et poussé à travers une filière. À la sortie de celle-ci, l'agent d'expansion passe à l'état gazeux et crée des cellules dans le matériau qui s'expande. La plaque ou la feuille expansée obtenue est ensuite refroidie. Pour la réalisation de plaques expansées, on utilise des filières plates ou à sections rectangulaires.



**Figure II.21.** Extrusion de plaques de polystyrène expansé (PSE). [6]

Pour la réalisation de feuilles expansées, on utilise des filières annulaires produisant une gaine soufflée qui, après sectionnement, sera couchée en feuilles. Celles-ci peuvent ensuite être thermoformées sous vide pour la réalisation de barquettes, emballages de restauration rapide, etc. Le produit ainsi fabriqué est différent du PSE-moulé car :

- sa structure ne comporte pas de soudure entre les billes.
- sa masse volumique est en général plus élevée.
- la présence d'une peau de surface rappelle le passage dans la filière.

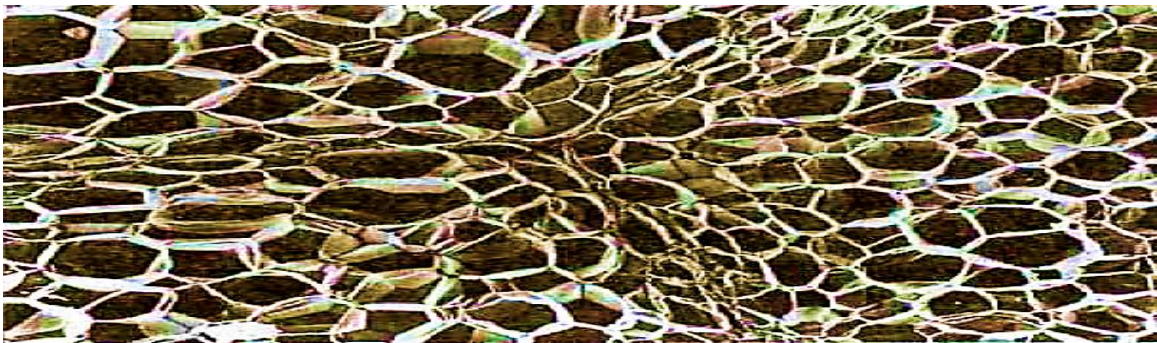
Le polystyrène cristal généralement utilisé d'une masse moléculaire moyenne à une masse moléculaire élevée, sa température de mise en œuvre est voisine de 200 °C. Le contrôle de la structure cellulaire (nombre et taille des cellules) se fait à l'aide d'agents de nucléation tels que silicate de calcium, bicarbonate de sodium, acide citrique, talc. Les agents d'expansion les plus couramment utilisés sont aujourd'hui les hydrochlorofluorocarbures (HCFC) 142b ou 22, et le pentane. [16]

## II-11-Propriétés du polystyrène expansé PSE [16]

### II-11-1-Généralités

Les mousses de PSE se caractérisent par une structure rigide à cellules fermées. Pour le PSE-M, la taille des cellules se situe habituellement entre 60 et 200  $\mu\text{m}$  (figure III.23), pour le PSE-E entre 150 et 500  $\mu\text{m}$ . La structure du PSE-M comprend des soudures *interperles*, ce qui n'est pas le cas du PSE-E. L'épaisseur des parois dépend de la densité et de la taille des cellules.

Par exemple, pour une masse volumique de 15  $\text{kg}/\text{m}^3$  et des cellules de 100  $\mu\text{m}$ , elle sera de 0,4  $\mu\text{m}$ . La fraction volumique de solide dans la matière expansée dépend de la masse volumique apparente. À 30  $\text{kg}/\text{m}^3$ , elle est proche de 3 %, à 20  $\text{kg}/\text{m}^3$  de 2 % et à 10  $\text{kg}/\text{m}^3$  de 1 %. D'où la valeur généralement retenue : le PSE est composé à 98 % d'air (en volume, à 20  $\text{kg}/\text{m}^3$ ). La masse volumique apparente du PSE-M se situe généralement, suivant les applications, entre 10 et 30  $\text{kg}/\text{m}^3$  (des masses volumiques plus élevées sont parfois utilisées pour quelques applications spécifiques). Pour le PSE-E, 33  $\text{kg}/\text{m}^3$  est une valeur classique (de 25 à 45  $\text{kg}/\text{m}^3$ ). [16]



**Figure II.22.** Structure alvéolaire du polystyrène expansé moulé (grossissement de 50 fois la taille initial).

## II-11-2-Propriétés mécaniques [6]

- **PSE-M :**

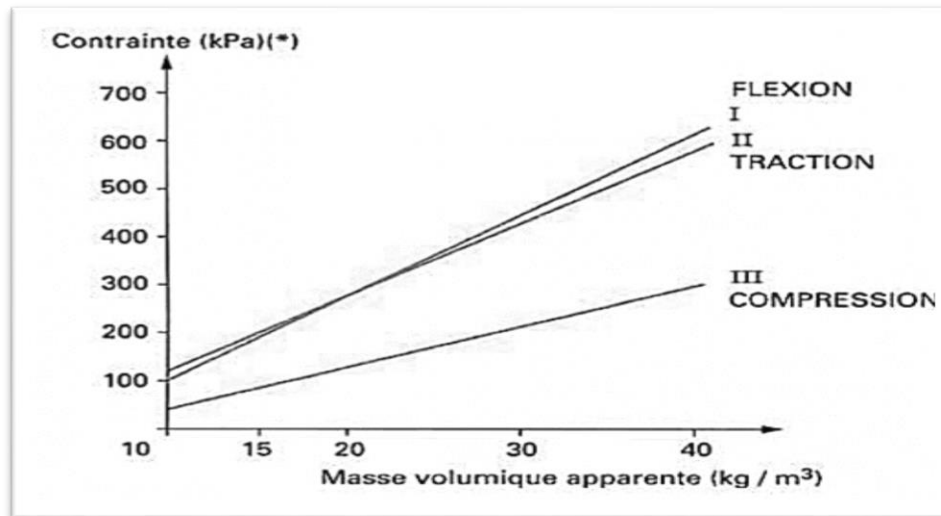
Elles dépendent essentiellement de la masse volumique apparente du matériau et évoluent de façon linéaire avec celle-ci. Les résistances en compression, flexion et traction sont données dans le (Tableau II.3) et sur la (Figure II.23). Ces valeurs ont été mesurées sur des petites éprouvettes normalisées (les références des normes d'essais utilisées sont indiquées dans la liste des normes). Si l'on cherche à obtenir une résistance définie pour une pièce moulée donnée, il sera toujours nécessaire d'essayer cette dernière dans les conditions de service. Si sa résistance est insuffisante, une modification de forme sera souvent plus efficace et plus économique qu'une augmentation de la masse volumique. [16]

- **PSE-E :**

Ses propriétés de résistance en compression sont plus élevées. Pour 10 % de déformation, les valeurs s'élèvent à 150-200 kPa à 25 kg/m<sup>3</sup> à environ 300 kPa à 33 kg/m<sup>3</sup> et à 700 kPa à 45 kg/m<sup>3</sup>. [16]

**Tableau II.3.** Résistances mécaniques pour différentes masses volumiques apparentes du PSE-M. [16]

| DENSIT2 VOLUMQIUE<br>(Kg/cm <sup>3</sup> )                            | 15 Kg/cm <sup>3</sup> | 20 Kg/cm <sup>3</sup> | 30 Kg/cm <sup>3</sup> | 40 Kg/cm <sup>3</sup> |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Résistance en compression<br>pour une déformation de<br>10%.....(Kpa) | 60 à 110              | 100 à 160             | 180 à 250             | 260 à 350             |
| Contrainte à la rupture en<br>flexion.....(Kpa)                       | 160 à 220             | 210 à 330             | 380 à 520             | 570 à 680             |
| Contrainte à la rupture en<br>traction.....(Kpa)                      | 160 à 240             | 215 à 330             | 350 à 520             | 520 à 660             |



**Figure II.23.** Influence de la masse volumique apparente du PSE-M sur ces propriétés mécaniques. [16]

### II-11-3-Propriétés thermiques [16]

- La capacité thermique massique du PSE est de  $1\,210\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .
- Le coefficient de dilatation linéique est d'environ  $7 \times 10^{-5}\text{ K}^{-1}$ .
- La conductivité thermique  $\lambda$  est fonction de la masse volumique apparente et de la température.

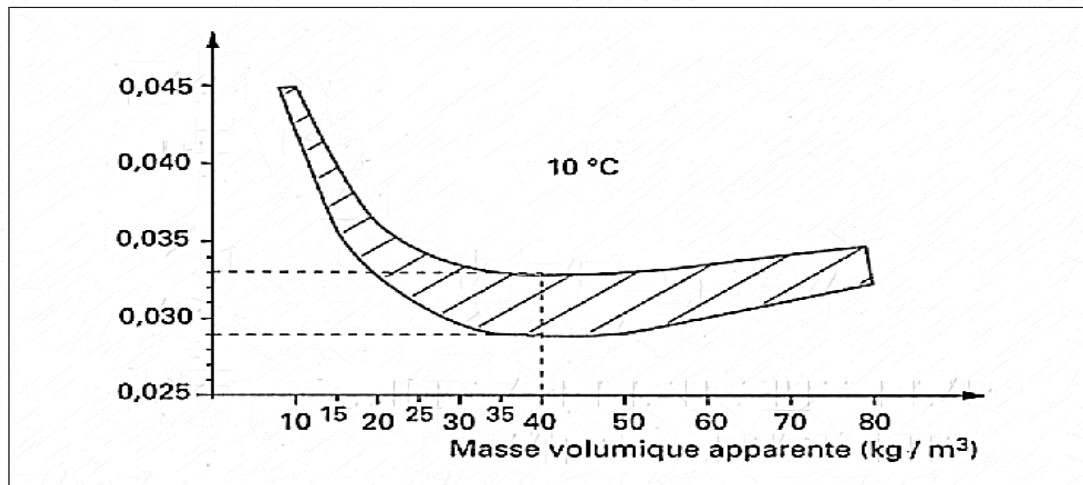
On constate sur la (Figure II.24) relative à du PSE-M à  $10\text{ }^\circ\text{C}$  que, pour une masse volumique donnée  $\rho$  peut varier dans une certaine plage entre deux valeurs limites définies par les courbes inférieure et supérieure. En effet, des paramètres tels que la structure cellulaire du produit ont également une influence sur la conductivité thermique.  $\lambda$  augmente avec la température et la correction à appliquer varie en fonction de la masse volumique  $\rho$ . On peut retenir les valeurs approximatives suivantes du (Tableau II.4) de  $\Delta\lambda$  (valables entre  $0$  et  $40\text{ }^\circ\text{C}$ ).

**Tableau II.4.**  $\Delta\lambda$  en fonction de la variation de la masse volumique  $\rho$ . [16]

| $\rho$ (en $\text{kg}/\text{m}^3$ ) | $\Delta\lambda$ (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 10                                  | $+ 2,00 \times 10^{-4}$                                                  |
| 15                                  | $+ 1,40 \times 10^{-4}$                                                  |
| 20                                  | $+ 1,15 \times 10^{-4}$                                                  |
| 25                                  | $+ 1,05 \times 10^{-4}$                                                  |
| 30                                  | $+ 1,00 \times 10^{-4}$                                                  |

Ainsi si  $\lambda$  mesuré à  $10\text{ }^\circ\text{C}$  est de  $32,5\text{ mW} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  pour une masse volumique de  $20\text{ kg}/\text{m}^3$ , il sera à  $40\text{ }^\circ\text{C}$  de :

$$32,5 + (30 * 0,115) = 32,5 + 3,45 = 36\text{ mW} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$



**Figure II.24.** La variation de la conductivité thermique du PSE-M à 10 °C en fonction de la masse volumique. [16]

Pour le PSE-E, dans la plage des masses volumiques habituelles ( $\rho = 25$  à  $45$  kg/m<sup>3</sup>),  $\lambda$  est généralement compris entre 0,028 et 0,036 W · m<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup> et dépend de l'agent d'expansion utilisé (valeurs disponibles courant 1994 suite aux changements d'agents d'expansion réalisés dans le cadre de la réglementation sur les CFC, à confirmer par la profession). La température maximale d'emploi est de 85 °C quand aucune contrainte mécanique n'est appliquée à la mousse de polystyrène. [16]

#### II-11-4-Propriétés diverses [16]

##### II-11-4-1-Comportement à l'eau

Il est primordial dans de nombreuses applications, notamment celles concernant l'isolation thermique des bâtiments et la flottabilité. [16]

- La perméabilité à la vapeur d'eau (Tableau II.5) du PSE-M, mesurée sur des éprouvettes de 25 mm d'épaisseur, à 38 °C, pour des humidités relatives de 88,5 % et 0 % (imposées à l'une et l'autre face des éprouvettes), dépend de la masse volumique.

**Tableau II.5.** Perméabilité à la vapeur d'eau du PSE-M.

| P (en mg · m <sup>-1</sup> · h <sup>-1</sup> · torr <sup>-1</sup> ) | $\rho$ (en kg/m <sup>3</sup> ) |
|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| 3.0                                                                 | 15                             |
| 2.5                                                                 | 20                             |
| 1.5                                                                 | 30                             |

L'absorption d'eau par immersion pendant 28 jours à 22 °C ± 2 °C est limitée à 3,0 % maximum en volume pour le PSE-M. Pour le PSE-E, elle est inférieure à 0,2 %.

**II-11-4-2-Résistance chimique [16]**

Le polystyrène expansé ne présente aucune réaction chimique au contact des matériaux de construction traditionnels tels que le ciment, la chaux, le plâtre, ou au contact des mélanges issus de ces liants. Par contre, il est sensible à certains solvants et, par conséquent, aux produits qui en contiennent. Il faut veiller, entre autres, à utiliser des colles ne renfermant aucun solvant aromatique. Certains produits décoffrants contiennent des substances qui peuvent attaquer le polystyrène expansé. Le (Tableau II.6) résume la résistance chimique du PSE à divers milieux. [16]

**II-11-4-3-Propriétés biologiques et stabilité dans le temps [16]**

Le polystyrène expansé est biologiquement stable et imputrescible : il ne constitue en aucun cas un milieu nutritif pour les microorganismes. Il peut, s'il est fortement sali, présenter des moisissures mais, dans ce cas, il sert uniquement de support inerte et ne participe pas au processus biologique. En cas d'exposition prolongée au rayonnement ultraviolet, la surface de la mousse jaunit et se fragilise. En dehors de cela, le PSE résiste très bien au vieillissement.

**II-11-4-4-Alimentarité [16]**

Il existe des formulations de polystyrène expansible et cristal qui répondent aux exigences portant sur les objets destinés au contact alimentaire et qui sont largement employées. Il incombe au Transformateur et à l'Utilisateur final d'en faire la demande au Producteur et de s'assurer que les conditions de transformation du produit sont appropriées.

**Tableau II.6.** Résistance chimique du polystyrène expansé [16].

| Agents                                                          | Stable | Stabilité limitée (1) | Instable (2) |
|-----------------------------------------------------------------|--------|-----------------------|--------------|
| <b>Ciment, chaud, plâtre</b>                                    | X      |                       |              |
| <b>Bitume, mastics, bitumineux avec solvants, goudrons</b>      | X      |                       |              |
| <b>Eau de mer, solutions salines</b>                            |        |                       | X            |
| <b>Gazole, huile de table, paraffine, vaseline</b>              | X      |                       |              |
| <b>carburants</b>                                               |        | X                     |              |
| <b>Acétone, éther, benzène, styrène, xylène, trichlorethene</b> |        |                       | X            |
| <b>Cyclohexane, white spirit, térébenthine</b>                  |        |                       | X            |
| <b>Silicones, savons, agents mouillants</b>                     | X      |                       | X            |
| <b>Alcools, soude, potasse, ammoniacale</b>                     | X      |                       |              |
| <b>Engrais, salpêtre, terreau, purin</b>                        | X      |                       |              |
| <b>Acides dilués ou acides faibles</b>                          | X      |                       |              |
| (1) Attaque superficielle. (2) Attaque ou dissolution.          |        |                       |              |

**II-11-4-5-Comportement au feu [16]**

**Classement au feu** : réglementation française bâtiment. Le polystyrène expansé moulé et le polystyrène expansé extrudé peuvent être classés M1 lorsqu'ils contiennent un système ignifugeant. Sans ce dernier, leur classement est M4. [N1]

- ✓ Le pouvoir calorifique du PSE est de 40 MJ/kg.
- ✓ Caractéristiques de combustion : Soumis à une flamme, les grades standards vont s'enflammer rapidement.

Les flammes se propageront jusqu'à combustion complète du PSE. La présence d'un système ignifugeant améliore considérablement le comportement au feu du produit. Il y a interruption de la propagation de flamme dès l'allumage du produit. Soumis à une flamme, le produit ignifugé va donc se contenter de fondre. Dès retrait de la source d'allumage, la combustion s'arrête. En brûlant, le PSE génère une quantité importante de fumée noire, proportionnelle à la masse consommée. [16]

**II-11-5-Comparaison entre le polystyrène expansé moulé (PSE-M) et le polystyrène expansé extrudé (PSE-X ou XPS) [7]**

Le polystyrène extrudé (XPS) se différencie tout d'abord du polystyrène expansé (PSE) par le fait que les cellules expansées du XPS sont plus petites que les cellules expansées du PSE et ensuite par le fait qu'il n'y a plus de soudures entre ces cellules dans le cas du XPS. On remarquera donc que le XPS est beaucoup plus homogène et que sa masse volumique est généralement plus élevée que le PSE. Enfin le passage dans la filière lors de la fabrication du XPS crée une petite "peau de surface" qui a l'avantage de le rendre plus imperméable que le PSE. Quels autres avantages apportent toutes ces modifications ?

- Meilleure performance en termes d'isolation thermique que le polystyrène expansé car moins perméable à l'air et à la perte de chaleur,
- les panneaux de XPS sont plus résistants à la compression,
- les panneaux sont plus résistants à l'humidité grâce à la "peau de surface" et à la plus grande homogénéité du XPS,
- plus facile à travailler car matériau plus homogène par rapport au PSE qui s'effrite par exemple quand on le coupe.

Bien que le polystyrène extrudé (XPS) offre de nouveaux avantages, il présente aussi des désavantages :

Il est plus cher que le PSE car procédé de fabrication plus compliqué, procédé de fabrication plus polluant que pour le polystyrène expansé (PSE), plus de gaz toxiques dégagés en cas d'incendie.

En ce qui concerne les désavantages du XPS, tout comme le PSE, il ne permet pas une bonne isolation phonique. Le (Tableau II.7) ci-dessous est un tableau comparatif et

récapitulatif des avantages et des inconvénients du PSE et du XPS :

**Tableau II.7.** Comparaison des avantages et des inconvénients du PES et du XPS. [7]

| comparaison             | PSE-M (EPS-M) | XPS (PSE-E) |
|-------------------------|---------------|-------------|
| Isolation thermique     | +             | ++          |
| Isolation phonique      | --            | --          |
| Résistance à l'humidité | -             | ++          |
| Résistance mécanique    | +             | ++          |
| Homogénéité             | -             | +           |
| Facilité d'utilisation  | --            | +           |
| Facilité d'utilisation  | +             | ++          |
| Fabrication             | +             | -           |
| Ecologie                | +             | --          |
| Prix                    | ++            | -           |

### II-11-6-Avantages et inconvénients du polystyrène expansé [7]

Le polystyrène expansé est un produit de très grande diffusion, offrant un vaste champ d'application, outre son utilité dans le secteur de l'emballage, il est utilisé depuis plusieurs décennies dans le milieu du bâtiment comme coffrage mais aussi et surtout pour les panneaux d'isolation. En effet le polystyrène expansé offre de nombreux et inconvénients :

#### ➤ Leurs avantages sont

- une bonne réflexion thermique grâce à leur couleur blanche naturelle,
- une faible conductivité thermique, ils tolèrent une large gamme de températures,
- une bonne résistance à la compression. Ils absorbent assez bien les vibrations.
- un faible coefficient de dilatation.
- une bonne résistance au vieillissement, en effet ils ne pourrissent pas et ne subissent pas de prolifération bactérienne,
- un faible coût de production et un poids plume.
- ils sont recyclables car le polystyrène est un matériau facilement transformable.

#### ➤ Leurs Inconvénients sont

Même si ce matériaux est recyclable, il ne peut quand même pas être considéré comme un matériau vert car le polystyrène étant à la base un plastique, il dérive du pétrole et émet du CO<sub>2</sub> lors de sa fabrication. De plus:

- les panneaux de PSE sont parfois insuffisants et doivent donc être accompagnés d'autres matériaux d'isolation,
- les billes expansées qui les composent ont tendance à se décoller quand il y a présence d'eau en trop grande quantité,
- et ils ne permettent pas une bonne isolation phonique.

**❖ Comme conclusion**

En conclusion bien que les mousses de polystyrène extrudé soient plus performantes en termes d'isolation, elles présentent aussi des désavantages. C'est pourquoi à l'heure actuelle ces deux types de mousses sont toujours utilisés en parallèles. En effet on privilégiera par exemple le polystyrène extrudé pour toutes les isolations susceptibles d'être exposées à de l'humidité et à des contraintes ou encore pour réaliser des isolations plus importantes où on ne peut se permettre de perdre trop de chaleur (exemple pièce réfrigérée). Alors que l'on utilisera le polystyrène expansé pour des isolations un peu moins poussé même si ce type de mousse reste efficace. Il revient à l'ingénieur de faire les bons choix dans les matériaux à utiliser.

**II-12-Applications du polystyrène expansé [16]**

Le PSE-M est utilisé dans toutes les applications décrites ci-après. Le PSE-E, dans le domaine de l'isolation, peut aussi techniquement être utilisé dans toutes les applications décrites. Cependant, pour recherche d'excellentes propriétés de résistance en compression ou d'imperméabilité à l'eau. En emballage, les applications du PSE-E sont limitées aux objets de faible épaisseur pouvant être obtenus par thermoformage (par exemple : barquettes, emballages de restauration rapide, boîtes à œufs). [16]

**II-12-1- Isolation thermique des bâtiments**

Le choix des isolants en polystyrène expansé, ou extrudé est fait, dans de nombreux cas, non seulement en raison de leurs performances thermiques mais aussi parce qu'ils apportent des avantages supplémentaires tels que leur insensibilité à l'humidité ou encore leur résistance mécanique. [16]

**II-12-1-1- Isolation des murs**

- ❖ **Isolation par l'intérieur** : Le PSE peut s'utiliser entre un mur et une contre-cloison, ou bien recevoir un enduit plâtre traditionnel. Les panneaux de doublage constitués de panneaux de PSE-M et de plaques de plâtre cartonées sont très largement utilisés en France.
- ❖ **Isolation par l'extérieur** : Les panneaux de PSE sont, dans ce cas, protégés par un second mur plus léger, un bardage ou une couche d'enduit. Dans le cas d'un double mur, on peut aussi utiliser des perles simplement expansées.
- ❖ **Isolation intégrée** : Dans ce cas, le PSE peut constituer l'âme de blocs en béton ou, au contraire, servir de coffrage à des murs coulés sur chantier.

### II-12-1-2-Isolation des planchers

En isolation intégrée, des entrevous en PSE peuvent être utilisés et servir au coffrage de la dalle. Il existe aussi des rehausses en PSE et des éléments remplissant à la fois les fonctions des poutrelles et des hourdis.

Pour l'isolation rapportée, divers systèmes existent, permettant d'isoler les planchers par le dessus ou le dessous d'une dalle existante.

### II-12-1-3-Isolation des toitures

Dans les toitures inclinées, le PSE peut être utilisé sous forme de caisson porteur de couverture, ou être rapporté par l'intérieur sur les rampants des combles au moyen de panneaux composites à fixer sur les bois de charpente.

Pour les toitures, les terrasses, les panneaux d'isolant sont utilisés comme support de la couche d'étanchéité ou, au contraire, sont placés au-dessus de celle-ci (toiture dite inversée) et supportent la protection meuble (gravillons) ou dure (dalle en béton). Le polystyrène expansé extrudé est particulièrement bien adapté à cette dernière application en raison de ses bonnes propriétés de résistance à la compression et de comportement à l'eau. [16]

### II-12-2-Autres usages dans le domaine du bâtiment et des travaux publics [16]

#### ➤ **Panneaux de drainage pour terrasses – jardins**

Le drainage est réalisé par des plaques de PSE perforées et comportant des plots, disposées entre la couche d'étanchéité et la terre végétale.

#### ➤ **Protection des murs dans les pièces à hygrométrie élevée**

Dans ces pièces telles que les salles d'eau ou les cuisines, une feuille de PSE de quelques millimètres, collée sur les murs, supprime la condensation et protège le revêtement décoratif.

#### ➤ **Béton de polystyrène**

Des perles de PSE, enrobées d'un adjuvant spécialement mis au point pour cet usage, sont mélangées avec le ciment pour constituer un béton isolant, léger et résistant.

#### ➤ **Remblais routiers légers**

Des blocs de PSE moulés sont disposés sur plusieurs couches et constituent le remblai. Une dalle en béton armé puis le revêtement bitumeux de la chaussée, sont ensuite coulés par-dessus. Cette technique permet de limiter les charges appliquées au sol de fondation et d'améliorer la stabilité de l'ouvrage tout en diminuant les déformations du sol.

**II-12-3-Emballages industriels [9]**

Pour les grosses pièces peu fragiles qu'il s'agit de protéger des traces de chocs, on utilise de préférence des calages qui les enveloppent plus ou moins. Ces calages, en polystyrène expansé moulé, sont utilisés par les industriels du gros électroménager, de l'audiovidéo, de l'informatique, de l'automobile, de l'appareillage électrique, de la mécanique, du motocycle, de la quincaillerie, etc.

Pour les pièces plus petites ou fragiles, on moule des emballages qui les enveloppent complètement. Sont utilisatrices de ces emballages les industries de l'électronique, du petit électroménager, de la photographie, de l'optique, de l'instrumentation, de l'outillage, etc. Pour le calage d'objets fabriqués en petite série, des particules de polystyrène expansé de taille et de forme diverses, obtenues à partir de granulés expansibles et disposées en vrac autour des objets à protéger, sont parfois utilisées.

**II-12-4-Emballages alimentaires [9]**

Deux types d'emballage en polystyrène expansé sont utilisés dans ce secteur : les caisses (et caissettes) et les barquettes. Les caisses en polystyrène expansé moulé sont essentiellement utilisées pour le transport et la conservation des produits de la mer, des viandes et volailles, des légumes.

Les barquettes en polystyrène expansé-moulé ou expansé extrudé sont essentiellement utilisées pour l'emballage de la viande en petite quantité pour la vente au détail en libre-service.

**II-12-5-Applications diverses**

Le polystyrène expansé est utilisé dans de nombreuses autres applications. On peut citer:

- l'isolation des locaux d'élevage et d'agriculture, l'isolation de chambres froides, les dalles de plafond ;
- le drainage des sols, les bacs de germination et supports de pots dans l'horticulture ;
- les planches à voile et divers éléments de flottabilité ;
- les casques protecteurs pour motos et vélos ;
- les modèles de fonderie pour le procédé à *modèle perdu* ;
- les gobelets ;
- les décors de cinéma et de théâtre.

**II-13-Gestion des déchets de PSE [16]**

Préserver les ressources naturelles et réduire l'impact sur l'environnement de l'élimination de nos déchets sont de nouvelles priorités pour notre société. Pour aller dans ce sens, quatre axes sont développés (par ordre de priorité) : la réduction à la source, la

réutilisation, le recyclage et la récupération de l'énergie par incinération.

La mise en décharge est un ultime recours pour l'élimination des déchets.

Les technologies et les applications plus particulièrement adaptées au PSE obtenu par moulage sont passées en revue ci-après.

### **II-13-1-Réduction à la source [6]**

Cela correspond à une réduction de la quantité de PSE utilisée pour remplir une fonction donnée. Beaucoup d'efforts ont déjà été faits par l'industrie du PSE depuis le démarrage de l'utilisation de ce produit dans les années 60. Les performances du matériau expansible se sont considérablement améliorées et la conception des produits finis a fait beaucoup de progrès. Les efforts entrepris se poursuivent actuellement, d'autant plus qu'à l'impératif économique vient s'ajouter l'impératif écologique.

### **II-13-2-Réutilisation [7]**

Les possibilités de réutilisation concernent les emballages en PSE, plutôt que les isolants thermiques dont la durée de la première utilisation, est supposée supérieure à 50 années. C'est dans le domaine de l'emballage industriel que les possibilités existent et sont techniquement et économiquement viables, par exemple dans les industries automobiles et électriques ou électroniques, pour le transport de pièces de sous-traitance sur de courtes distances ou à l'intérieur des entreprises.

### **II-13-3-Recyclage [7]**

Nous n'abordons ici que les techniques propres au recyclage du polystyrène expansé. Il est évident que les techniques communes à tous les thermoplastiques s'appliquent aussi au PSE (fusion, pyrolyse, hydrogénation, ...etc.).

#### **II-13-3-1-Simple broyage [16]**

Les objets moulés propres peuvent être broyés. La taille des particules obtenues peut aller jusqu'à 1 mm et leur forme peut être très proche de celle des perles expansées. Ces particules broyées peuvent être moulées à nouveau en mousse de PSE après mélange avec de la matière vierge. Cette technique est utilisée depuis toujours par les fabricants de mousse pour recycler leurs propres déchets de fabrication, essentiellement dans le moulage de blocs mais aussi dans des emballages non destinés aux marchés alimentaires.

On peut aussi mélanger les particules de PSE à d'autres matériaux pour obtenir du béton allégé, du plâtre isolant, des briques cellulaires. Dans le domaine de l'agriculture et de l'horticulture, les applications sont nombreuses. Le PSE broyé est utilisé comme :

- produit d'allègement des sols ;
- auxiliaire de compostage ;
- matériau filtrant pour le drainage.

**II-13-3-2-Extrusion [16]**

Une grande partie des déchets propres de PSE est aujourd'hui extrudée, après compactage, en granulés de polystyrène compact de type cristal. Ces granulés peuvent être utilisés directement pour la fabrication d'articles injectés tels que les porte-manteaux, les boîtes de cassette vidéo, etc. Ils peuvent aussi être regazés dans des extrudeuses spécialement équipées. Le gaz normalement utilisé est du pentane. Les granulés expansibles obtenus sont transformés en mousse suivant les mêmes techniques que pour le polystyrène expansible en perles. Ces granulés peuvent être de formes variées, par exemple :

- cylindriques pour le moulage de blocs ou d'emballages ;
- en forme d'étoile ou de 8 destinés, une fois expansés, aux applications de calage. On peut aussi réaliser des plaques ou feuilles de polystyrène expansé extrudé.

**II-13-4-Récupération d'énergie [16]**

Une fois que l'objet moulé en PSE rentre dans le cycle de traitement des déchets solides municipaux, le coût global des opérations de séparation, nettoyage et transformation augmente considérablement et requiert une utilisation de ressource disproportionnée par rapport au bénéfice sur l'environnement que l'on retirerait du recyclage. C'est pourquoi la solution la plus appropriée dans ce cas, sur les plans environnemental et économique, est l'incinération avec récupération d'énergie. 1 kg de PSE a approximativement le même pouvoir calorifique que 1,3 L de fuel. Quand il brûle, l'énergie libérée peut ainsi permettre la combustion des autres déchets ménagers et conduire à une réduction des consommations en fuel de l'incinérateur, ou/et être récupérée pour produire de la chaleur ou de l'électricité. L'incinération des déchets de PSE, en présence d'une quantité d'oxygène suffisante, ne pose pas de problème particulier. Les produits de dégradation sont l'eau, le dioxyde de carbone et une quantité très faible de résidu non toxique.

**II-13-5-Mise en décharge [16]**

Elle ne doit être réalisée qu'en dernier recours. Lorsqu'elle ne peut être évitée, la mise en décharge du PSE ne pose cependant aucun problème. Inerte, non toxique, le PSE ne se dégrade pas dans le temps et ne conduit donc à la formation d'aucun produit nuisible à l'environnement. Il peut même contribuer à une meilleure aération de la décharge et favoriser ainsi une dégradation plus rapide des déchets organiques.

**II-14-Consommations de matière et d'énergie [6]**

Les valeurs typiques de consommation de matière et d'énergie sont résumées dans le (Tableau II.8), pour la fabrication d'une tonne de polystyrène.

**Tableau II.8.** Consommation de matière et d'énergie pour la production d'une tonne de polystyrène.

| Consommations                                   | PS cristal | PS choc |
|-------------------------------------------------|------------|---------|
| <b>Matières premières</b>                       |            |         |
| Styrène..... (Kg)                               | 990        | 925     |
| Polybutadiène..... (Kg)                         | 0          | 60      |
| Huile minérale alimentaire.... (Kg)             | 20         | 25      |
| Purge de diluant (recyclée)... (Kg)             | 10         | 10      |
| <b>Utilités</b>                                 |            |         |
| Electricité..... (KWh)                          | 100        | 120     |
| Chaleur (combustion gaz ou fioul)<br>..... (Mj) | 600        | 600     |
| Eau..... (m <sup>3</sup> )                      | 3          | 3       |

D'autres additifs sont parfois ajoutés dans le procédé pour modifier les propriétés du produit fini ou améliorer le fonctionnement de la ligne : initiateurs (peroxydes), agents de transfert limitateurs de chaîne, lubrifiant d'aide au démoulage, azurant optique, antioxydant pour protéger le polybutadiène.

## II-15-Quelques propriétés du polystyrène [2]

### II-15-1-Propriétés électriques et thermiques

Les polymères styréniques possèdent de bonnes propriétés d'isolation électrique. Ils peuvent recevoir des additifs pour devenir antistatiques ou conducteurs. Ils conduisent faiblement la chaleur.

### II-15-2-Comportement au feu [2]

Les polymères styréniques sont facilement combustibles et dégagent une odeur sucrée. Lors d'une combustion, ils se décomposent vers 300 °C en formant du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et de la vapeur d'eau, mais les combustions incomplètes ajoutent de l'oxyde de carbone (CO). Puisque toutes les combustions ouvertes utilisent l'air contenant 78 % d'azote en plus de l'oxygène, des oxydes d'azote sont toujours présents. Pour améliorer leur tenue au feu, des additifs ignifugeants sont ajoutés pour certaines applications (Heim et autres, 2002).

### II-15-3-Vieillessement [2]

Une exposition prolongée à l'extérieur provoque l'oxydation des polymères styréniques. La couche superficielle des objets devient jaunâtre et s'effrite. L'incorporation d'agents protecteurs ou la coloration permet d'améliorer la résistance au vieillissement. Des produits de décomposition complémentaires résulteront de la combustion.

## II-15-4- Résistance aux produits chimiques – Corrosion [6]

Les PS sont facilement attaqués par de nombreux solvants organiques. Leur résistance aux produits inorganiques (comme des solutions aqueuses) et aux produits alimentaires est bonne. Ils ont une bonne résistance aux acides, bases, aux agents oxydants et réducteurs. Les PS gonflent ou se dissolvent au contact des acides concentrés et des hydrocarbures. Leur stabilité dimensionnelle (capacité à maintenir ses dimensions face aux variations de température, d'humidité et à certaines charges physiques) est excellente.

Le PS possède un pouvoir calorifique élevé compris entre 31 700 et 41 200 kJ/kg. Il est imperméable et a une très faible absorption d'eau. Comme tous les polymères basés sur une chaîne d'hydrocarbure, le PS est classé comme non biodégradable dans un horizon séculaire. Le (Tableau II.9) montre les caractéristiques polymères stériques.

Tableau II.9. Caractéristiques polymères stériques. [6]

| Propriétés                                                         | Polymère             |                      |                                | Normes        |       |       |
|--------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|--------------------------------|---------------|-------|-------|
|                                                                    | PS cristal           | PS choc              | Copolymère choc transparent SB | ISO           | ASTM  | JIS   |
| <b>Rhéologiques</b>                                                |                      |                      |                                |               |       |       |
| Indice de fluidité (200 °C-5 kg).....(g/10min)                     | 1,5 à 30             | 2 à 25               | 7,5                            | 1133          | D1238 | K7210 |
| <b>Thermiques</b>                                                  |                      |                      |                                |               |       |       |
| Température Vicat (50N) (montée en température = 50 °C/h).....(°C) | 85 à 102             | 78 à 95              |                                | 306           | D1525 | K7206 |
| Température de fléchissement sous charge (1,8 MPa recuit).....(°C) | 85 à 76              | 76 à 94              |                                | 75-2          | D648  | -     |
| Coefficient de dilatation linéaire .....(mm/°C)                    | 7 x 10 <sup>-5</sup> | 9 x 10 <sup>-5</sup> |                                | -             | D696  | -     |
| Conductivité thermique .....(W/m.K)                                | 0,17                 | 0,17                 | 0,17                           | norme interne | -     | -     |
| Capacité thermique massique à 23 °C.....(J/kg.°C)                  | Environ 1 200        | Environ 1 300        | Environ 1 500                  | norme interne | -     | -     |
| <b>Mécaniques</b>                                                  |                      |                      |                                |               |       |       |
| Choc Charpy entaillé.....(kJ/m <sup>2</sup> )                      |                      | 4 à 15               |                                | 179-1         | D256  | K7111 |
| Choc Izod barreau entaillé.....(kJ/m <sup>2</sup> )                |                      | 4 à 15               | 20 à 26                        | 180           | -     | K7110 |
| Résistance au seuil d'écoulement.....(MPa)                         |                      | 18 à 32              | 20                             | 527-2         | D638  | K7113 |
| Contrainte à la rupture (en traction) .....(MPa)                   | 35 à 48              | 16 à 36              | 18                             | 527-2         | D638  | K7113 |
| Allongement à la rupture.....(%)                                   | 2 à 3                | 20 à 60              | > 200                          | 527-2         | D638  | K7113 |
| Module d'élasticité en traction.....(MPa)                          | 3 100 à 3 200        | 1 600 à 2 300        | 1 000 à 1 200                  | 527-2         | D638  | K7113 |
| Module d'élasticité en flexion .....(MPa)                          | 2 900                | 1 600 à 2 500        | 1 000 à 1 200                  | 178           | D790  | -     |
| <b>Électriques</b>                                                 |                      |                      |                                |               |       |       |
| Rigidité diélectrique .....(kV/mm)                                 | 135                  | 150                  |                                | -             | D149  | -     |
| Résistivité superficielle .....(W)                                 | > 10 <sup>14</sup>   | > 10 <sup>13</sup>   | > 10 <sup>13</sup>             | IEC 60093     | D257  | -     |
| <b>Diverses</b>                                                    |                      |                      |                                |               |       |       |
| Masse volumique .....(g/cm <sup>3</sup> )                          | 1,05                 | 1,04                 | 1,01                           | 1183          | D1505 | K7112 |
| Retrait au moulage.....(%)                                         | 0,4 à 0,7            | 0,4 à 0,7            | 0,4 à 0,7                      | -             | -     | -     |
| Absorption d'eau.....(%)                                           | < 0,1                | < 0,1                | < 0,1                          | 62            | D570  | K7209 |
| Propriétés optiques.....                                           | Transparent          | Opaque               | Transparent                    |               |       |       |

## II-16-Utilisation du polystyrène [2]

Les propriétés du PS et son faible coût d'achat permettent son utilisation dans de nombreuses applications et dans différents secteurs. Le PSE présente certaines caractéristiques qui favorisent son utilisation dans diverses applications : il est léger, composé de 98 % d'air et de 2 % de matière solide, ce qui limite d'autant l'impact sur le poids. Il est moins dispendieux que d'autres types d'emballages et confère une protection aux produits fragiles sur emballés. Ses propriétés d'isolant thermique permettent de garder les aliments au chaud ou au froid. Le PSE est abondamment utilisé et très prisé pour des emballages alimentaires, des contenants, des plateaux, etc. Il est également utilisé pour la fabrication de vaisselles à usage unique.

Sa constitution d'alvéoles remplies d'air procure au PSE d'exceptionnelles propriétés d'amortissement aux chocs. De ce fait, il est utilisé dans les emballages protecteurs pour l'expédition de matériel électronique et autres articles fragiles, pour l'emballage d'équipements électroniques comme les téléviseurs, les ordinateurs et les équipements stéréo.

Les propriétés de stabilité, de durabilité et d'insensibilité à l'action de l'humidité du PSE favorisent sa large utilisation dans l'isolation thermique, dans le secteur du bâtiment, de la construction et du froid (camions frigorifiques, glaciers et chambres frigorifiques). Il est également utilisé en milieu agricole (contenants de semis et bacs à fleurs) pour le peu de développement des bactéries et moisissures qu'il permet. Le PS standard est utilisé pour des applications où la transparence et la rigidité sont nécessaires. Il est utilisé dans des produits tels que des couverts, des tasses, des récipients de yogourt, de boulangerie et de fruits et légumes. Les boîtes de Pétri et autres contenants de laboratoire tels que tubes à essai et microplaques sont également faits à base de PS.

Le PS est très utilisé dans les jouets, les équipements récréatifs et les articles ménagers. Il est utilisé dans le domaine de l'audiovidéo : boîtiers de Compact Disc (CD) et de DVD, parties de téléviseurs, parties de chaîne stéréo. Le polystyrène expansé utilisé comme matériau d'emballage. L'application la plus connue du grand public est le polystyrène expansé ou PSE (parfois appelé "frigolite"), mousse blanche compacte qui sert à emballer les appareils sensibles aux chocs (électroménager, chaîne Hi-fi..). Les propriétés de ces plastiques industriels sont utilisées dans de nombreux domaines. [6]

Articles de décoration ou matériel de bureau en PS cristal injecté : double-décimètres, équerres et rapporteurs d'écolier. Ceci est un résumé de ce qui a été déjà mentionné :

- ❖ **Logistique** : Calages en PSE : transport de produits fragiles (électroménager ; lave-linge, ordinateur, sèche-linge, réfrigérateur, four etc.).

- ❖ **Maquettisme (maquette)** : Pièces moulées de PSE à peindre, 'carte plastique' en PS choc.
- ❖ **Maison de disques** : PS cristal : Boîtiers CD.
- ❖ **Isolant thermique** :
  - Bâtiment/constructions - Panneaux et blocs en PSE : cloisons isolantes - plancher (isolation sous dalle, isolation sous chape, entrevous) - toitures - coffrages (ils permettent d'ériger des murs en béton armé isolés en une seule opération). -Froid - Parois en PSE : camions frigorifiques, glacières chambres frigorifiques.
- ❖ **Résistance à la compression** : Emballage en PSE : barquettes alimentaires de produits frais, caisses marées et cales. Travaux publics et génie civil - Blocs en PSE : Remblayage de routes et autoroutes - Talus - Murs -anti-bruit - Culées de ponts - Protection de conduits enterrés - Pontons.
- ❖ **Alimentaire** : Emballage (pots de yaourt, crème fraîche...) et vaisselle à usage unique (gobelets, couverts) en PS choc blanc thermoformé - Vaisselle à usage unique en PS cristal injecté (gobelets, verrines...).
- ❖ **Hématologie** : Matériel en PS cristal (Plaque de laboratoire, flacon)
- ❖ **Densité** : Très faible absorption de l'eau : Ouvrages flottants sur blocs en PSE : Pontons - Jardins - Maisons (Pays-Bas)
- ❖ **Nautisme** : Flotteurs en PSE (balises, ligne d'eau).
- ❖ **Logistique** : Réduire le poids des emballages (Feuille allégée en XPS). De 16 à 1060 kg/m<sup>3</sup>, écart dû à l'addition de divers matériaux comme le béton armé
- ❖ **Médecine** : Traitement des hyperkaliémies par résine échangeuse de cations en polystyrène de sodium ou Kayexalate.
- ❖ **Utilisations militaires** : Le polystyrène est un des composants du napalm moderne (« napalm-B »), où il sert de gélifiant. Il entre également dans la constitution de la bombe à hydrogène : il maintient en suspension les éléments de la bombe avant son utilisation, et se transforme en plasma au moment de la mise à feu. La (Figure II.25.), illustre différents produits selon le type de PS utilisé [2].



Figure II.25. Différents produits selon le type de PS utilisé.

Le PS choc est utilisé lorsqu'une résistance élevée aux chocs est recherchée. Les téléviseurs, dans les modèles les plus récents, sont constitués d'environ 20 % en poids de plastique et de 90 % de PS choc non ignifugé. On le retrouve également dans les électroménagers [2].

## II-17-Collecte et recyclage du polystyrène [8]

Le recyclage est un procédé pour traiter les déchets qui permet de les refabriquer sous une autre forme. Le recyclage et le réemploi permettent d'économiser une grande quantité d'énergie primaire, notamment du pétrole, qui est la principale matière première de la plupart des matières plastiques y compris le polystyrène.

On estime aujourd'hui que 4 % du gisement retrouvera une seconde utilisation en tant qu'emballage. Lorsque la taille des gisements de polystyrène expansé usagé est trop faible ou lorsque les déchets de polystyrène expansé sont souillés, il ne semble pas y avoir de filière

de valorisation viable économiquement.

À l'échelle individuelle du consommateur ce déchet fait environ 300 g/an par habitant. Pour ces déchets ménagers :

En France, ce déchet entre peu dans la liste des matériaux collectés lors du tri sélectif en raison de son caractère diffus, son élimination est assez souvent réalisée par incinération. Son pouvoir calorifique intéresse les centrales thermiques. Concernant les déchets industriels :

Des fabricants d'emballages de PSE français se sont regroupés au sein d'ECO-PSE en 1993 afin, notamment, d'organiser et de développer des filières de recyclage d'emballages professionnels.

En 2010, en France, plus de 12 000 tonnes d'emballages de PSE ont été recyclées, pour une consommation nationale évaluée à 40 200 tonnes, soit un taux de recyclage proche de 30 %. 85 % du PSE collecté est recyclé, après compactage et extrusion, en granulés de polystyrène qui serviront à la fabrication de produits manufacturés en PS (cintres, boîtiers de CD, etc.). Les 15 % restants permettent de recycler le PSE sous sa forme expansée (emballages, blocs et plaques PSE, allègement de sols et de bétons).

Chez les transformateurs de PSE, toutes les chutes de polystyrène expansé sont récupérées et réintroduites, telles quelles, dans le cycle de fabrication du polystyrène expansé. Par ailleurs, propres, dépoussiérés et broyés, les déchets issus des filières de récupération sont mélangés, à hauteur maximum de 30 %, avec des billes neuves de PSE et permettent d'obtenir de nouveaux produits destinés au bâtiment ou à l'emballage (hors alimentaire).

## **II-18-Le polystyrène et l'environnement [8]**

A l'échelle individuelle des consommateurs, ce déchet n'entre pas dans la liste des matériaux collectables lors du tri sélectif en raison de son caractère diffus et son élimination est réalisée par incinération. Les déchets de PSE permettent de diminuer la quantité de combustible nécessaire à la combustion des ordures ménagères et peut également servir de combustible dans les centrales thermiques.

En revanche, des fabricants d'emballages PSE se sont regroupés au sein d'ECO-PSE depuis plus de 15 ans afin, notamment, d'organiser et de développer des filières pérennes de valorisation et de recyclage des emballages professionnels. En 2010, en France, plus de 12 000 tonnes d'emballages PSE ont été recyclées, pour une consommation nationale évaluée à 40 200 tonnes, soit un taux de recyclage proche de 30%. 85% du PSE collecté est recyclé, après compactage et extrusion, en granules de polystyrène qui servira à la fabrication de produits manufacturés en PS (cintres, boîtiers CD...). Les 15 % restant permettent de recycler le PSE sous sa forme expansée (emballages, blocs et plaques PSE, allègement PSE sols et bétons). A noter que 4 % du gisement retrouvera une seconde utilisation en tant qu'emballage.

Chez les transformateurs de PSE, toutes les chutes de polystyrène expansé sont récupérées et réintroduites, telles quelles, dans le cycle de fabrication du polystyrène expansé. Par ailleurs, propres, dépoussiérés et broyés, les déchets issus des filières de récupération sont mélangés à hauteur de 5 à 30% avec des billes neuves de polystyrène expansé et permettent d'obtenir de nouveaux produits destinés au bâtiment ou à l'emballage (hors alimentaire).

Lorsque la taille des gisements de polystyrène expansé usagé est faible ou lorsque les déchets de polystyrène expansé sont souillés, il n'y a pas de filière de valorisation viable économiquement. Le polystyrène expansé, classé déchet non dangereux, est déposé en centre d'enfouissement technique de classe 2. Cette alternative offre l'avantage d'aérer et de stabiliser le sol de ces installations.

Le principal problème de la dissémination de polystyrène expansé dans l'environnement est qu'il a été mis en cause dans la mort d'animaux marins (tortue, oiseau, ...) en ayant ingéré par méprise avec des proies. Il n'est pas directement chimiquement toxique mais il obstrue leur tube digestif et provoque leur mort. L'ensemble des impacts environnementaux des isolants en polystyrène expansé, utilisés dans la construction, se trouve dans les Fiches de Déclarations Environnementales et Sanitaires (FDES), disponibles sur la base INIES. Il faut alors veiller à considérer l'ensemble des composants du système (ossatures, colles...), tout en sachant que la résistance thermique constitue la caractéristique primordiale d'un isolant.

#### **II-18-1-Effet sur la couche d'ozone [8]**

Le polystyrène expansé (PSE) dégage du pentane contribuant à l'effet de serre (formation d'ozone photochimique) : 0,000519 kg.

#### **II-18-2-Risque sur la santé [7]**

- Dégagement de styrène à la chaleur. D'après l'Agence internationale de recherche sur le cancer, le styrène pourrait être cancérigène pour l'homme. Plusieurs études effectuées sur une population de salariés exposés au styrène ont mis en évidence un risque de leucémie. Des études sur des animaux ont montré que le styrène est faiblement cancérigène par inhalation ou ingestion.
- Champs électrostatiques.

#### **II-19-Inconvénients du polystyrène [6]**

Les principaux inconvénients des plastiques à base de polystyrène sont :

La fragilité, basse température de fléchissement et faible résistance aux solvants

organiques y compris les produits de nettoyage à sec. En outre, de par leur nature, les résines de polystyrène offrent une faible résistance aux intempéries; lorsqu'elles sont exposées à l'extérieur, elles jaunissent et se fendillent. Cependant, plusieurs des défauts mentionnés précédemment peuvent être surmontés par une formulation adéquate, par copolymérisation du styrène avec des monomères de vinyle ou en utilisant un mélange de polystyrène avec d'autres polymères.

## **II-20-Conclusion**

Grace à ces différentes propriétés et qualités qui se distinguent, et son vaste utilisation dans la vie quotidienne, et son faible cout d'achat, nous pouvons maintenant dire que le polystyrène a pris une grande importance dans nos vies. Nous l'avons complètement adopté.

*Chapitre III*  
*Conception et Etude*

### III-1-Introduction

Les principes de développement durable représentent un enjeu important pour les entreprises quel que soit leur secteur d'activité. Par exemple, le choix d'un type de matière pour la fabrication de certaines composantes de produits.

En se substituant aux matériaux traditionnels tels que les métaux, le bois, le verre ou le textile, la production des plastiques est sans cesse croissante depuis pratiquement un siècle.

Les principaux domaines d'application sont l'emballage.

Afin de répondre aux exigences du marché qui requiert sans cesse de nouvelles ou de meilleures propriétés, l'ENIEM doit prendre des décisions et faire des choix, afin de réduire la quantité des produits abîmés qu'elle pourrait générer, et par conséquent les dommages et coûts considérables qu'elle pourrait imposer à son économie. Tout en étant parfaitement adaptés à ces produits, les emballages, qui sont fabriqués en polystyrène expansé et mousses plastiques réutilisables et recyclables sont la solution adéquate.

Notre étude porte sur la conception d'un moule pour un type d'emballage pour l'entreprise ENIEM, qui est la fabrication d'une palette pour le réfrigérateur 350S.

Dans ce chapitre nous allons présenter la palette en polystyrène expansé aussi une maquette 3d du produit placé sur la maquette. Nous présenterons aussi le moule et ces différentes composantes, et nous finirons par un calcul de résistance et de vérification et une simulation par calcul d'élément fini pour la palette.

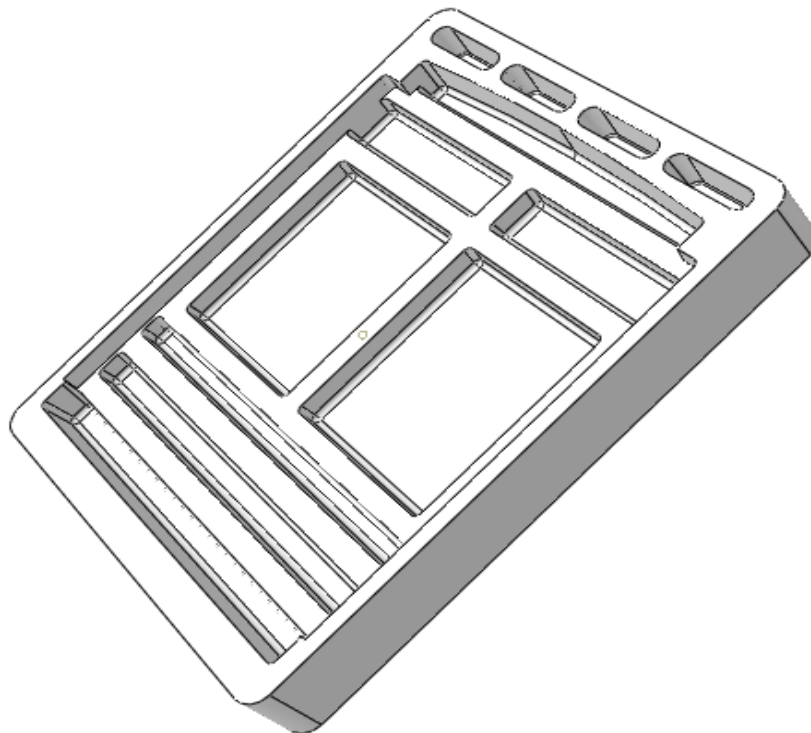
### III-2-Palette ENIEM 790x640x95mm en Polystyrène Expandé (EPS-FRI-350S)

En effet, l'ENIEM utilise plusieurs types de palettes (bois...etc.) afin d'emballer, transporter et de stocker ces produits. Vu que ces palettes sont couteuses et très difficiles à fabriquer, une étude de nouvelle palette en matières plastique fut retenue.

La fabrication des palettes en polystyrène expansé, avec un poids inférieur à 2 kg, sont légères et donc idéales pour réduire les coûts de fabrication et de transports, entièrement recyclables et imputrescibles. A laquelle on attribuera le nom EPS-FRI-350S.

#### III-2-1-Présentation de la palette PSE-FRI-350S

La palette EPS-FRI-350S (Figure III.1), conçu pour répondre à un nombre important de conditions; comme la résistance au poids du produit (le réfrigérateur 350S), la résistance aux déplacements. Cette palette remplacera le surplus d'emballage pour l'entreprise. Auparavant pour emballer et déplacer ce produit, il fallait fabriquer des pièces en polystyrène expansé séparément pour chaque appui du réfrigérateur et aussi utiliser des palettes en bois, ce qui a un impact direct sur l'économie de l'entreprise et d'une manière indirect sur la fabrication et son processus.



**Figure III.1.** La conception 3D de la palette avec le logiciel SOLIDWORKS.

**III-2-2-Données techniques et caractéristiques de la palette EPS-FRI-350S**

Palette légère et économique fabriquée avec mousse rigide en Polystyrène Expandé (PSE),

- **Données techniques**

La palette constitue une unité de chargement. Elle supporte la marchandise et assure en toute sécurité les opérations de manutention de la chaîne de distribution. Le (Tableau III.1) ci-dessous représente la charge que peut supporter les palettes en polystyrène expansé-moulé, sachant leurs densités volumiques selon une étude européenne.

**Tableau III.1.** La charge en fonction de la masse volumique pour le PSE-M. [6] [N1]

| Densité du PSE-M    | Charge dynamique | Tare moyenne |
|---------------------|------------------|--------------|
| Densité PES 30 gr/l | 300 kg           | 1,3 kg       |
| Densité PES 60 gr/l | 600 kg           | 2,6 kg       |

- ❖ Nom de la matière utilisée : polystyrene expansé PSE.
- ❖ Volume de la palette :  $0.02614211 \text{ m}^3 = 26\ 142\ 110.61 \text{ mm}^3$ .
- ❖ Dimension de la palette : 790x640x95 mm.
- ❖ Poids de la palette : 390g.

- ❖ **Caractéristique du matériau (polystyrène expansé PSE)**

- ❖ Température : Le polystyrène est solide à 20°C et pâteux à 120°C.
- ❖ Température de fusion : La fusion s'opérant entre 150°C et 170°C.
- ❖ La capacité thermique massique du PSE : est de  $1\ 210 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .
- ❖ Le coefficient de dilatation linéique est d'environ  $7 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ .
- ❖ Conductivité thermique : 0.038 W/mk.
- ❖ Module d'élasticité : 2,8 à 3,4 MPa.
- ❖ Densité volumique : 15 Kg/m<sup>3</sup>.

- **Ces diverses propriétés laissent à dire que les palettes en PSE sont [N1]**

- ❖ Légère, économique, résistance mécanique et chimique.
- ❖ Hygiénique et inoffensive.
- ❖ 100% recyclable.
- ❖ De facile manipulation.
- ❖ Possibilité de recouvrir avec film de polyéthylène (PE) pour augmenter la durée.

### III-2-3-Présentation du produit à emballer [5]

L'ENIEM est une entreprise nationale spécialisée dans la fabrication de plusieurs gammes de produits électro-ménagers, parmi ces gammes de produits, on trouve le réfrigérateur 350S, qui procède les caractéristiques suivantes :

Nom du produit : réfrigérateur 350S. (Figure III.2)

Dimensions du produit : 1650 x590x748 mm.

Poids net d produit : 65kg



Figure III.2. Le réfrigérateur ENIEM série 350S.

### III-2-4-Présentation de la palette montée sur le produit (maquette 3D)

La maquette (Figure III.3) ci-dessous, représente le produit (réfrigérateur 350S) placé sur la palette EPS-FRI350S.

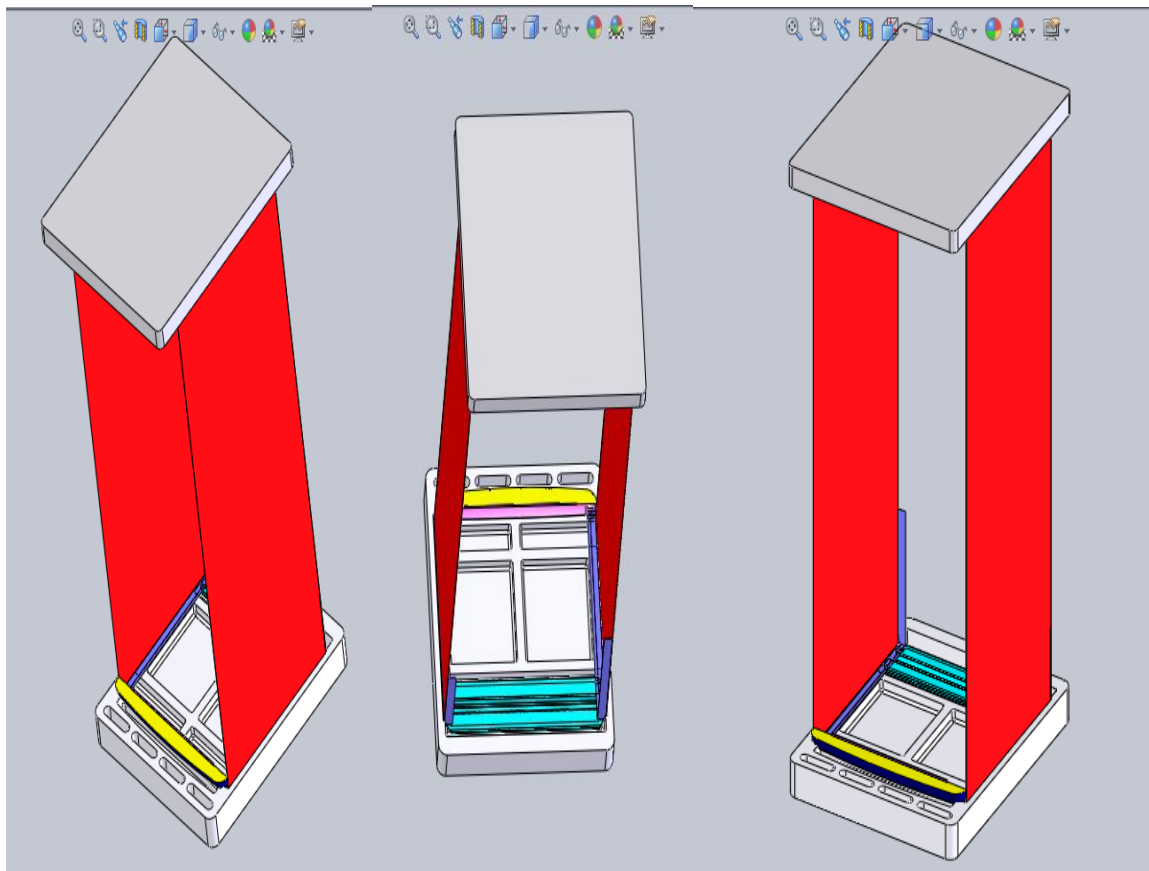


Figure III.3. Le produit (réfrigérateur 350S) placé sur la palette EPS-FRI350S.

**III-3-Les caractéristiques des machines de polystyrène expansé moulé**

Plusieurs machines sont utilisées pour fabriquer le polystyrène expansé moulé. Elles se différencient par leurs caractéristiques.

**❖ Caractéristiques principales**

1. Le cycle du processus est automatique, commençant par l'ouverture du moule, matériel d'alimentation à la vapeur, température de préservation, refroidissement, la fermeture du moule libérant le produit final de la machine.
2. La machine peut sélectionner différents processus d'alimentations tels que régularisation de l'alimentation, gonfler et vider l'alimentation, en veillant à une haute vitesse d'alimentation et d'uniformité à l'intérieur du moule.
3. Système hydraulique avancé, les cylindres principaux et auxiliaires seront respectivement fonctionnels pour verrouiller le moule ; avec le dispositif différentiel rapide, qui peut améliorer la vitesse de déplacement du voyage du moule pour un maximum d'environ (200mm/seconde), économies de consommation d'énergie plus de 40 %.
4. La machine contrôle la distance de transport couverte lors de l'ouverture et la fermeture du moule, pour s'assurer que l'étanchéité reste identique pendant chaque déplacement et à faire en sorte que la densité de l'alimentation est uniforme.
5. La machine utilise la valve d'équilibre pour s'assurer que la température de la pression de la vapeur à l'intérieur du moule est uniforme.
6. Système d'aspiration de la machine se compose principalement de réservoir à vide, réservoir de refroidissement sous vide et pompe à vide de l'eau circulante hautement efficace pour assurer un moulage rapide du produit, de raccourcir le temps de refroidissement, collage uniforme et faible teneur en humidité.
7. Cette machine applique une transmission de pression hydraulique. Contrôler la vitesse pour le moule d'ouverture et de fermeture. Pour assurer les performances fiables de la machine, longue durée de vie et un coût d'entretien faible.

Le (Tableau III.2) ci-dessous représente quelques caractéristiques de certaines machines actuellement utilisées sur le marché pour le moulage du polystyrène expansé.

**Tableau III.2.** Fiche technique de certaines machines à expansion du polystyrène expansé.

| N ° | Éléments                    | Unité/type        | EPS-ZC-1200           | EPS-ZC-1400          | EPS-ZC-1700         | EPS-ZC-1800        | EPS-ZC-2200         |         |
|-----|-----------------------------|-------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------|
| 1   | Dimension du moule          | mm                | 1200*1000             | 1400*1200            | 1700*1500           | 1800*1600          | 2250*2150           |         |
| 2   | Dimension de produit Max    | mm                | 1120 *<br>840 x 330   | 1240 *<br>1080 * 330 | 1560*<br>1260*330   | 1640 *<br>1420*330 | 2080*<br>1980*330   |         |
| 3   | Taille de la fenêtre        | mm                | 1140 x 860            | 1260 x<br>1100       | 1580 x<br>1280      | 1660 x<br>1440     | 2100 x<br>2000      |         |
| 4   | Max. Intervalle de          | mm                | 1200                  | 140                  | 140                 | 140                | 140                 |         |
| 5   | Intervalle de min.          | mm                | 150                   | 210                  | 210                 | 210                | 210                 |         |
| 6   | Vitesse de Procession       | mm/s              | 160                   | 160                  | 120                 | 120                | 120                 |         |
| 7   | Vapeur                      | Pression          | MPa                   | 0.3-0.7              | 0.3-0.7             | 0.3-0.7            | 0.3-0.7             | 0.3-0.7 |
|     |                             | Inlet             | mm                    | DN65                 | DN80                | DN100              | DN100               | DN100   |
|     |                             | Consommation      | kg/cycle              | 6                    | 8                   | 9                  | 10                  | 13      |
|     |                             | Pression          | MPa                   | 0.5-0.7              | 0.5-0.7             | 0.5-0.7            | 0.5-0.7             | 0.5-0.7 |
| 8   | Air comprimé                | Inlet             | mm                    | DN5                  | DN5                 | DN5                | DN5                 | DN5     |
|     |                             | Consommation      | m <sup>3</sup> /cycle | 1.5                  | 1.8                 | 2.2                | 2.3                 | 2.5     |
|     |                             | Pression          | MPa                   | 0.3-0.6              | 0.3-0.6             | 0.3-0.6            | 0.3-0.6             | 0.3-0.6 |
| 9   | Eau de refroidissement      | Inlet             | mm                    | DN65                 | DN80                | DN100              | DN100               | DN100   |
|     |                             | Consommation      | kg/cycle              | 40-140               | 50-150              | 60-180             | 70-200              | 100-220 |
| 10  | Capacité de la pompe à vide | m <sup>3</sup> /h | 230                   | 230                  | 280                 | 280                | 280                 |         |
| 11  | Charge connectée            | kW                | 11                    | 12.5                 | 16.5                | 16.5               | 20.5                |         |
| 12  | Tension                     | v                 | 380                   | 380                  | 380                 | 380                | 380                 |         |
| 13  | Temps de cycle              | s                 | 60-100                | 60-150               | 80-180              | 80-180             | 100-200             |         |
| 14  | Dimension hors-tout         | mm                | 5200 *<br>1940*3000   | 5200*<br>2140*3200   | 5200 *<br>2450*3500 | 5200*<br>2550*3650 | 5800 *<br>3000*5000 |         |
| 15  | Poids                       | kg                | 4000                  | 5500                 | 6500                | 7000               | 9000                |         |

### III-4-Les machines utilisées à l'ENIEM

L'ENIEM utilise deux sortes d'expandeurs petit et grand model, nommés respectivement ACE 25AR et ACE 7AR. Vu les dimensions de notre moule (1m35 \*1m15) nous allons travailler sur le grand expandeur (Figure III.4).

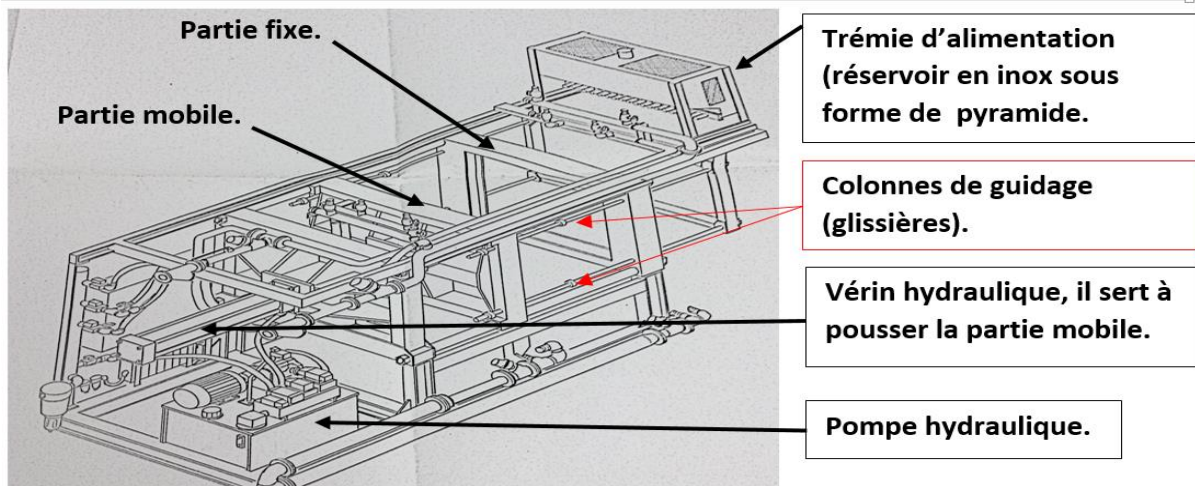


Figure III.4. Vue générale de l'expandeur ACE 25 AR.

#### III-4-1-Préparation de mise en marche

1) Ouverture complète des robinets de vapeur, d'eau de refroidissement et d'air, en s'assurant que les manomètres de chaque utilité indiquent la pression prévue en haut du tableau de commande comme le montre le (Tableau III.3) ci-dessous :

- Vapeur : 6 à 8 kg/cm<sup>2</sup>.
- Eau de refroidissement 3 à 8 kg/ cm<sup>2</sup>.
- Air : 4 à 10 kg /cm<sup>2</sup>.

Tableau III.3. Conditions de mise en marche de la machine ACE 25AR.

| Désignation de l'équipement  | Nature des vérifications                                   | Critères d'appréciation                                 |
|------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Expandeur ACE25AR et ACE 7AR | 1. Pression de vapeur à la vanne principale                | 6 à 8 kgf/cm <sup>2</sup>                               |
|                              | 2. Pression d'eau de refroidissement à la vanne principale | 3 à 8 kgf/cm <sup>2</sup>                               |
|                              | 3. Pression d'air à la vanne principale                    | 4 à 10 kgf/cm <sup>2</sup>                              |
|                              | 4. Fonctionnement de la porte de sécurité                  | La machine doit s'arrêter quand on ouvre la porte       |
|                              | 5. Pression de la pompe hydraulique                        | 120 à 140 kgf/cm <sup>2</sup> (à la fermeture du moule) |

### III-4-2-Mode de commande

Par le réglage du sélecteur de mode de commande (sw-3), l'expandeur peut s'opérer en trois modes différents

#### Commande manuelle

- Un bouton de mise en marche pour que la pompe hydraulique se mette à tourner
- Un bouton pour ouvrir et fermer le moule (la matrice)
- Sur la commande de commutateur à ressort sur le tableau de commande, l'électrovanne du chargeur se met en marche

#### Commande semi-automatique

- Bouton marche. La machine procède au formage automatique d'un seul cycle et s'arrête
- bouton préchauffage la machine procède au préchauffage et s'arrête

#### Commande automatique

La machine répète le formage automatique jusqu'à ce qu'on appuis sur le bouton arrêt ou que le système de sécurité tel que (la porte de sécurité) fonctionne, même chose pour le préchauffage.

Ces machines possèdent le tableau de commande suivant (Figure III.5) :



Figure III.5. Tableau de commande de la machine ACE 25 AR de l'ENIEM.

**III-4-3- Le tableau de commande est comme suit**

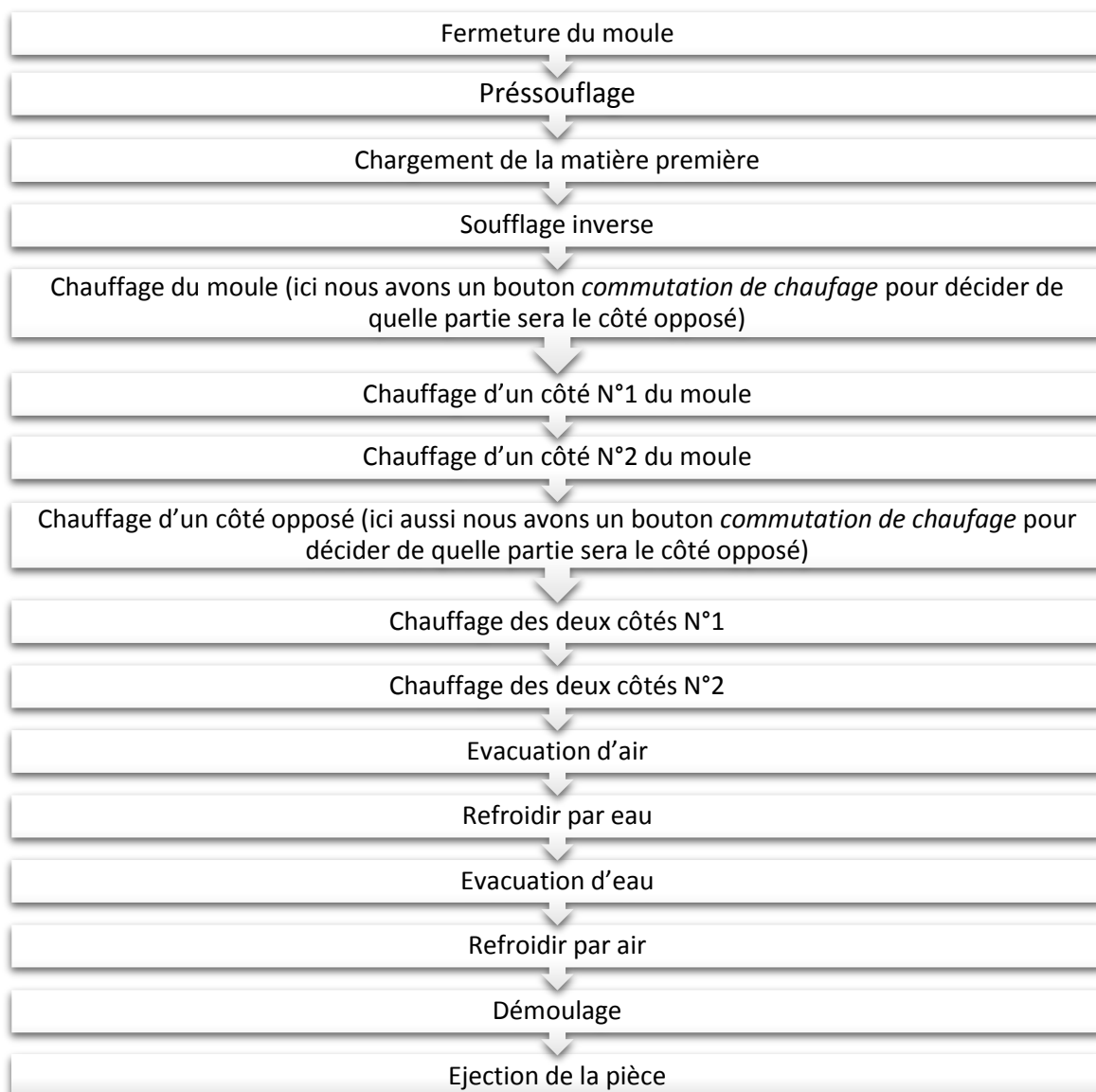
- 1) Lampe témoin d'alimentation : Elle s'allume sur l'alimentation électrique de la machine.
- 2) Lampe témoin d'opération : En commande automatique, elle indique l'opération que la machine poursuit actuellement.
- 3) Ampèremètre : il indique l'ampérage du moteur hydraulique.
- 4) Minuterie : elle sert à la commande de diverses opérations de gauche à droite  
Chargement de la matière première, chauffage des matrices, chauffage unilatéral contraire, chauffage bilatéral, refroidissement à eau, refroidissement par radiation
- 5) Bouton de mise en marche : le bouton poussoir de mise en marche de la machine. La machine mise en marche, la lampe s'allume ; le moteur hydraulique commence à tourner en mode manuel mais ne tourne pas en mode automatique
- 6) Bouton d'arrêt d'urgence : ce bouton pressé, la machine s'arrête. En commande automatique, la machine retient l'opération en cours à moins d'une remise à zéro.
- 7) Lampe témoin du moteur de l'unité hydraulique : elle témoigne de la marche du moteur de l'unité hydraulique
- 8) Secteurs de mode : sert à la sélection de mode manuel, semi-automatique ou automatique
- 9) Bouton commande automatique : met la machine sous commande automatique, s'allume quand la machine est mise sous commande automatique.
- 10) Bouton préchauffage : met la machine sous préchauffage, s'allume quand la machine est mise sous préchauffage
- 11) Bouton de mise à zéro : sert à initialisation le mode automatique. Ce bouton pressé, la machine revient au départ de l'opération en cours. Le bouton est valable seulement en mode automatique.
- 12) Bouton fermeture de la matrice (moule) : s'allume pendant la fermeture du moule. En mode manuel, la matrice se ferme tant que le bouton est pressé.
- 13) Bouton ouverture de la matrice (moule) : s'allume pendant l'ouverture de la matrice. en mode manuel, la matrice s'ouvre tant que ce bouton est pressé
- 14) Compteur : en mode automatique, compte le nombre de cycles, comptant un par cycle. En mode semi-automatique aussi, il compte un cycle, à moins que la machine soit arrêtée en cours d'opération. Il ne compte pas en préchauffage.
- 15) Sélecteur de vitesse : choisit la vitesse d'ouverture ou de fermeture du moule, valable en mode manuel ou automatique. Choisir rapide sous commande automatique.
- 16) Sélecteur de chauffage unilatéral : choisit le sens de chauffage unilatéral. on choisira soit F-M, soit M-F selon la condition de formage. choisir d'habitude en sens F-M.
- 17) Commutateur à ressort : en mode manuel, ce commutateur réglée sur manuel, l'électrovanne affichée ...etc. se met en service. La lampe s'allume pendant la marche de l'électrovanne  
En commande automatique ne pas oublier de régler ce sélecteur sur automatique s'il est réglé manuel, l'électrovanne ne fonctionne pas et empêche un bon formage.

La machine doit effectuer les différentes manœuvres suivantes (Figure III. 6 et 7) :



**Figure III.6.** Ensemble d'étapes de la machine ACE AR25 ENIEM.

Le voyant orange ci-dessus ou lampe témoin, détermine l'étape d'arrivée de l'opération, l'ensemble des étapes de la machine sont résumées dans la (Figure III.5) ci-dessous :



**Figure III.7.**Liste des étapes de moulage pour PSE.

Cette machine est munie de réglages par rapport au temps de chaque étape (Figure III.8 et 9), temps du chargement de la matière première, chauffage du moule, chauffage d'un côté opposé, chauffage des deux côtés, refroidissement par eau, refroidissement par air.

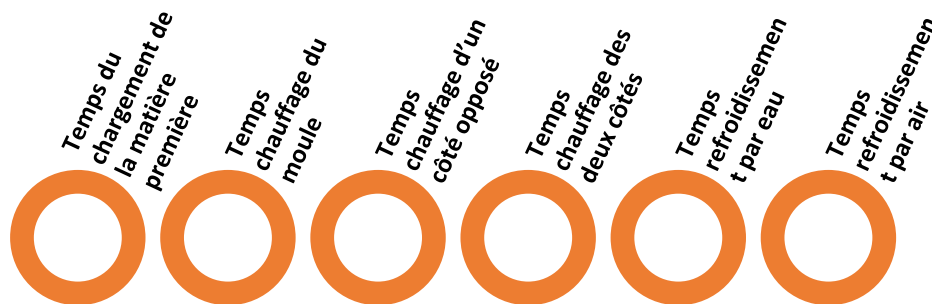


Figure III.8. Les réglages de temps pour chaque étape du procédé.

Ces temps sont calculés différemment pour chaque pièces selon sa forme, ces dimensions et son volume, sa densité, sa température.... etc.



Figure III.9. Le tableau de commandes des temps des étapes du procédé.

#### ❖ Commande manuelle

Mettre la machine sous tension, et la mettre en marche en appuyant sur le bouton de mise en marche.

Les boutons sur le tableau de commande permettent d'ouvrir ou de fermer le moule ou la mise en service des électrovannes

#### ❖ Commande automatique

- 1) La machine procède au formage automatique sous commande du séquenceur
- 2) La désignation et le rôle de chaque opération est commandé comme suit
  1. Fermeture de la matrice : ferme la matrice complètement, a 2 à 3 mm prêts.
  2. Pré-soufflage : l'alimentateur souffle la matrice pour enlever les gouttes d'eau qui y restent. La minuterie intérieure du séquenceur commande l'opération.
  3. Chargement des matières premières : ouvrir l'obturateur de la trémie. La minuterie commande l'opération.

4. Purge en retour : pour éviter le séjour des matières premières dans le chargeur, renvoyer les matières premières à la trémie. L'opération est commandée par une minuterie intérieure du séquenceur.
  5. Chauffage de matrice : injecter la vapeur dans la matrice pour préchauffer celle-ci et évacuer l'air restant
  6. Chauffage unilatéral 1 : faire traverser la vapeur de la cavité au noyau(ou du noyau à la cavité) pour la fusion intérieure du produit formé.
  7. Chauffage unilatéral 2 : Le manomètre à contact commande la même opération déjà citée en haut.
  8. Chauffage unilatéral contraire : pour équilibrer l'adhésion entre le côté cavité et coté noyau, effectuer une opération contraire à l'opération précédente. L'opération est commandée par la minuterie.
  9. Chauffage bilatéral 1 : envoyer de la vapeur comprimé aux deux faces pour réaliser l'adhésion complète. L'opération est commandée par le manomètre de contact.
  10. Chauffage bilatéral 2 : la même opération que la précédente, est commandée par la minuterie.
  11. Evacuation d'air : décharger la pression intérieur en ouvrant le robinet de drainage l'opération est commandée par la minuterie.
  12. Refroidissement à l'eau : l'eau jaillit des buses intérieures de la matrice pour refroidir le produit. L'opération est commandée par la minuterie.
  13. Evacuation d'eau : par l'injection d'air d'évacuation, enlever l'eau restante dans la matrice
  14. Refroidissement par radiation : laisser le produit tel quel jusqu'à ce que sa pression d'expansion baisse permettant l'enlèvement du produit.
  15. Démoulage 1 : laisser le produit formé dans la cavité, injecter l'air à travers le noyau pour faciliter la séparation du produit par rapport au noyau. L'opération est commandée par le manomètre de contact.
  16. Démoulage 2 : ouvrant le moule, injecter l'air de séparation.
  17. Ouverture du moule : procédé à l'ouverture du moule
  18. Ejection : pour faciliter la séparation de la cavité et le produit, injecter l'air d'éjection en ouvrant le moule
  19. Attente de fermeture du moule : mettre en attente jusqu' ce que le produit tombe complètement
- Sous commande automatique, la machine, à la fin de la 19<sup>eme</sup> opération, revient à la 1<sup>ere</sup> opération pour reprendre l'ensemble du cycle
  - Sous commande semi-automatique, a machine, à la fin de la 19<sup>eme</sup> opération, arrête son travail. Si on appuie de nouveau sur le bouton de mise en marche, la machine reprend son travail dès la première opération

### III-4-4-Inter-verrouillage de pression pneumatique

Les vannes et soupapes de pression de la machine de formage sont commandées par l'air comprimé. Elles ne fonctionnent pas si l'air n'est pas sous pression correcte. Si la pression d'air baisse au cours de la commande automatique de la machine, cela provoque la production de plusieurs produits défectueux. Pour éviter une telle situation, la commande automatique s'arrête si la pression d'air baisse au-dessus de  $4\text{kg/cm}^2$ . Sur le rétablissement de la pression d'air, la machine se remet en marche automatiquement en reprenant l'opération interrompue. Ces machines sont commandées par les pressions, de vapeur, d'air et de refroidissement (Figure III.10). Ces pressions doivent être précises et bien calculées pour chaque type de pièce au risque de détériorer l'élément final, ce que montre la (Figure III.11)

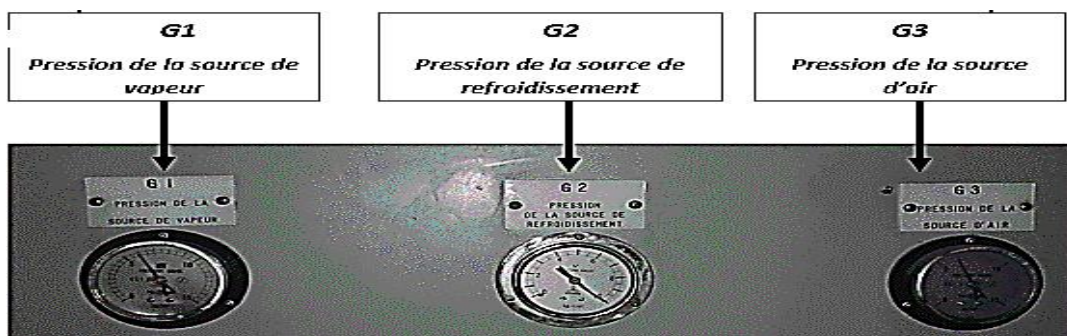


Figure III.10. Les pressions nécessaires au fonctionnement de la machine ACE AR25.

La (Figure III.11) ci-dessous est un exemple réel de pièces (a) parfaitement moulé, (b) moulé défectueuse, ceci à cause des nombreux réglages non respectés, des temps de chaque étape et des pressions d'air de vapeur et de refroidissement.

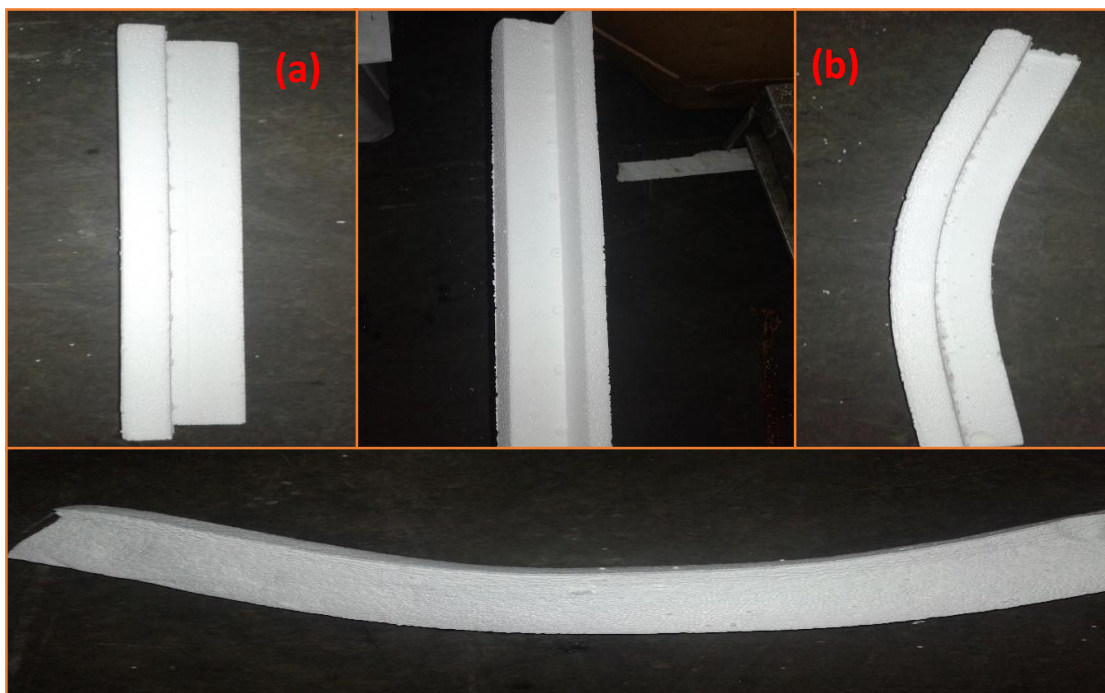
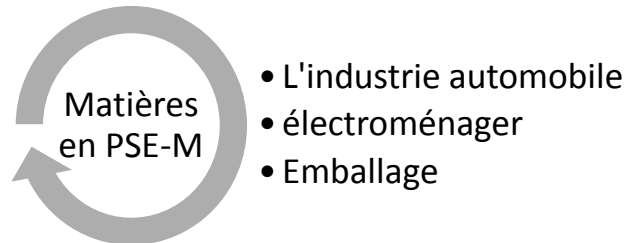


Figure III.11. Exemple d'une pièce moulé dans les normes et moulé défectueuse.

### III-5-Etude du moule pour PSE

Le moulage par expansion est un procédé largement utilisé dans la mise en forme des matières plastiques en polystyrène expansé.

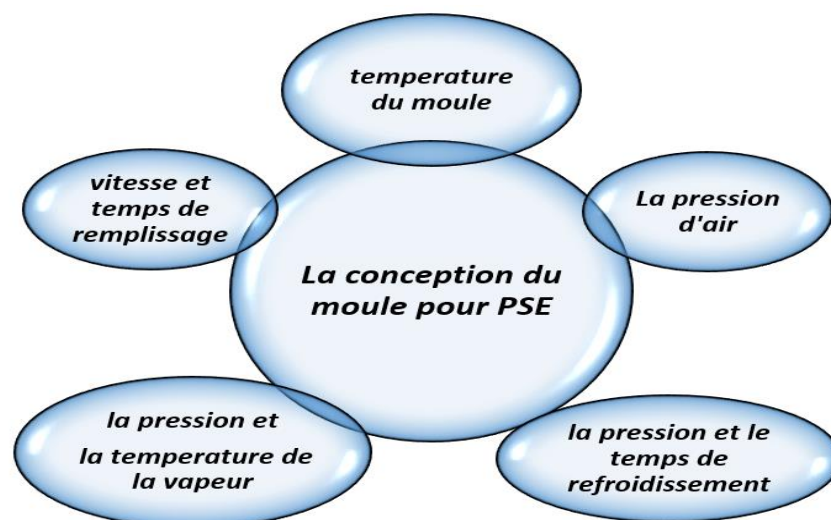


Dans le cadre des cours CAO (conception assistée par ordinateur), nous allons faire une étude et conception d'un moule à expansion, pour la palette **EPS-FRI-350S** en polystyrène expansé pour l'entreprise ENIEM.

❖ **Cette étude est due à**

- La fabrication d'une pièce finie de forme complexe.
- La fabrication en grande série.
- Minimisation des pertes de matière.
- Minimiser les couts d'emballage pour le produit réfrigérateur 350S.
- Donner à l'entreprise et à la machine le rendement optimal en créant les conditions en tirant le meilleur parti possible du procédé.

Le choix de plusieurs paramètres peut améliorer considérablement le bon déroulement de l'expansion, ainsi la qualité finale des pièces moulées, ces paramètre sont présentés dans la (Figure III.12) suivante :



**Figure III.12.** Paramètres optimales pour la conception d'un moule à injection.

Nous avons pris en considération trois paramètres très essentiels pour l'obtention d'une pièce de bonne qualité, ces paramètres sont :

### III-5-1-paramètres du remplissage

- Température de chargement de la matière principale : 30°C (température ambiante).
- Température des parois du moule : ces parois sont chauffées après passage de la vapeur d'eau à 95°C, la matière à l'entrée trouve le moule à une température ambiante
- Temps du chauffage du moule : 2 Sec.
- Pression de chargement : 0.7 bar.
- Pression de la partie mobile : 0.4 bar.
- Pression de la partie mobile : 0 bar.
- Chauffage d'un côté opposé : 2 Sec.
- Chauffage des deux côtés : 5 Sec.
- Temps de remplissage de la matière : 30 Sec.
- Temps de maintien de la pression : 03 Sec.
- Temps du refroidissement : 30 Sec.
- Temps de refroidissement par air : 2 min.
- Source de pression de vapeur : 0.7 bar.
- Source de pression de refroidissement : 0.5 bar.
- Source de pression d'air : 0.5 bar.
- Pression à la sortie du moule : 0.1 bar.
- Temps total du cycle : 3- 15 min.

### III-5-2-système de refroidissement

Le système de refroidissement du moule, se devise en deux catégories (Figure III.14), un refroidissement à eau (Figure III.13) qui est assuré principalement par une pièce qu'on appelle serpent, nous avons choisi une conception d'un serpent en forme carrée, de canaux de section circulaire pour les nombreux avantages que ça représente, à savoir leur facilité d'usinage. La section des canaux ne doit pas être très grande au risque d'un affaiblissement du moule; des buses de pulvérisations sont soudées sur le serpent de sorte que l'eau passante dans ce dernier puisse refroidir les empreintes; Et d'un refroidissement à air (Figure III.14) assuré par des tuyères pour aérer, désaérer et vaporiser le moule et la pièce après passage de l'eau; ces dernières construites par la voie de l'enlèvement de copeaux et dont les orifices pour le passage de l'air sont formés par des nervures parallèles disposées à distance et en traversant la tuyère. Ce refroidissement est commandé par une pression, appelée la pression de refroidissement (Figure III.10), si cette pression est inférieure ou bien

supérieure à celle indiquée cela aura des effets directs sur la qualité de la pièce moulée finale (Figure III.11).

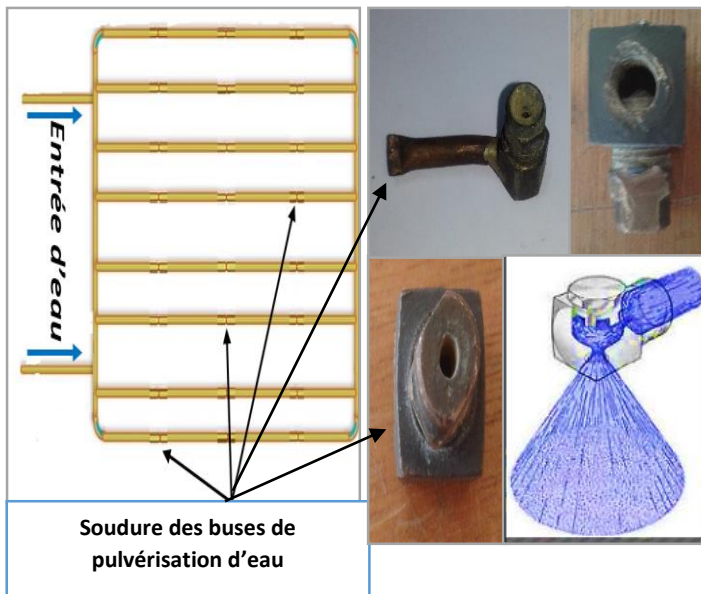


Figure III.13. Serpentin de refroidissement à eau.

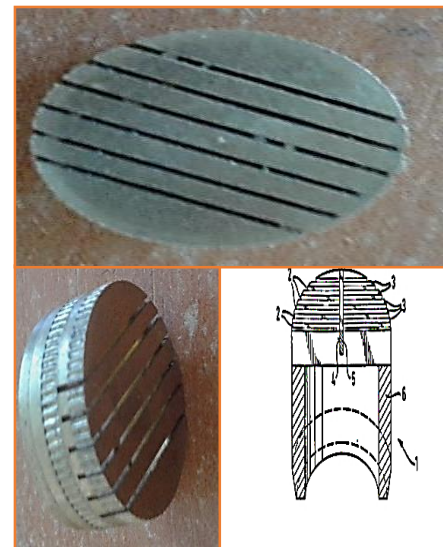


Figure III.14. Tuyère d'aération et vaporisation.

Exemple de répartition de ces deux systèmes de refroidissement (Figure III.15) :

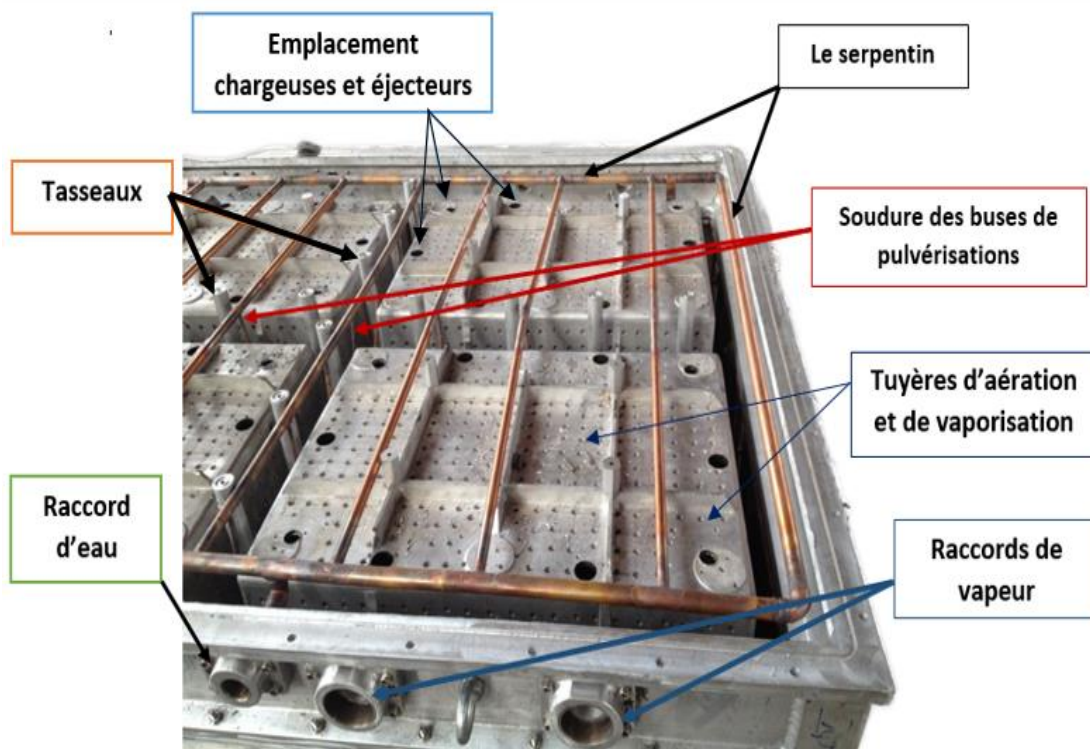


Figure III.15. Exemple d'un montage du serpentin sur un moule, et indication des voies d'air.

### III-6-Conception du moule

#### III-6-1-Le logiciel utilisé pour la conception du moule

Nous avons choisi Pour cette conception le logiciel de base, Avec lequel nous avons eu l'habitude de travailler durant notre cursus universitaire, à l'université de MOULOU D MAMMERIE pour réaliser les quinze (15) composantes du moule qui est le SolidWorks.

Le logiciel SolidWorks, est un logiciel de conception mécanique, qui permet de réaliser de la modélisation 2D et 3D, ce logiciel de CAO est réputé pour sa simplicité d'utilisation et se veut intuitif. Le logiciel SolidWorks, permet de concevoir des objets en 3D de manière très précise, de développer des produits. Dans notre cas on l'utilisera pour concevoir un moule (Figure III.19) en 3D pour l'entreprise ENIEM, qui a sa fin servira pour un travail en série de production de la palette EPS-FRI-350S, cette palette sera standard, pour certains nombre de réfrigérateur ENIEM. [13]

En fonction du type de pièce, du nombre d'empreintes, de la position de chargeuses, du type d'injection, des contre-dépouilles, nous aurons des outillages différents (Tableau III.4):

**Tableau III.4** Outillages du moule.

|                      |                                                                                                        |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>MOULE</b>         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Petit expandeur</li> <li>• Grand expandeur</li> </ul>         |
| <b>Ejections</b>     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ejecteurs</li> <li>• Air comprimé</li> </ul>                  |
| <b>Alimentations</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Chargeuses standards</li> <li>• Chargeuses normaux</li> </ul> |

Le dimensionnement de l'outillage sera en fonction de :

- La forme de la pièce
- Les dimensions de la pièce
- La matière de la pièce
- Du budget
- Des cadences de production
- Des capacités de la machine.

#### III-6-2-Les fonctions d'un moule

Un moule doit remplir plusieurs fonctions :

- fonction mise en forme.
- fonction alimentation.
- fonction refroidissement.
- fonction éjection.

### III-6-2-1-Fonction mise en forme

Dans un moule à expansion, le nombre d'empreintes est généralement en fonction de la pièce, ceci est fait pour des raisons d'équilibrage et de remplissage. Il doit permettre d'obtenir une pièce conforme au cahier des charges mais surtout une pièce qui soit démouler sans problème.

La forme de la pièce se fait par l'empreinte qui se répartit entre les deux parties (fixe et mobile) dans le but de faire des formes en contre dépouilles.

#### ➤ Notion de dépouilles

##### • Forme non dépouillée :

Le démoulage est difficile, voir impossible car il y a un frottement important entre les formes moulantes de l'empreinte (poinçon) et la matière solidifiée. Ces frottements sont dus essentiellement au retrait de la matière lors de son refroidissement dans l'empreinte (Figure III.16.1).

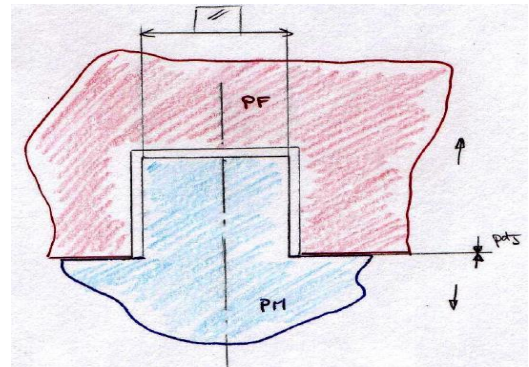


Figure III.16.1. Forme non dépouillée.

##### • Forme dépouillée :

Mettre des angles de dépouilles facilite le démoulage de l'empreinte. En général les angles de dépouilles intérieures sont plus importants que les angles de dépouilles extérieures (retrait). (Figure III.16.2)

- $\alpha$  : angle de dépouille extérieure.
- $\beta$  : angle de dépouille intérieure.

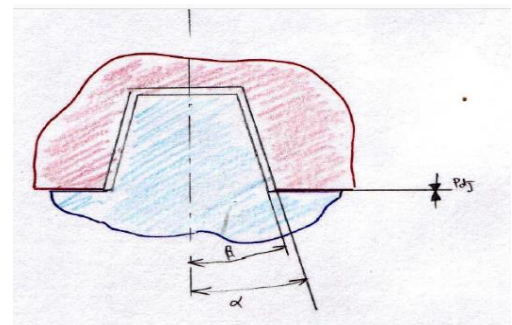


Figure III.16.2. Forme dépouillée.

#### ➤ Les lignes de joint

Les lignes de joints sont des marques sur la pièce démoulée qui résultent du contact de différents éléments de l'outillage participant au morcellement de l'empreinte. Il existe deux types de lignes de joints :

- Les extérieures
- Les intérieures

##### - La ligne de joint extérieure ou externe :

On appelle ligne de joint extérieure la trace que le plan de joint de l'outillage laisse sur les pièces. Elle résulte du contact entre la partie mobile et la partie fixe de l'outillage. Elle sera toujours une ligne dite fermée. Plus l'outillage sera soigné et de qualité, moins la ligne de joint sera visible.

**- La ligne de joint intérieure ou interne :**

On appelle ligne de joint interne la trace que laissent les éléments de formes moulantes tels que les broches, les poinçons et les noyaux. Lorsque ces derniers viennent en contact avec la partie opposée du moule (fermeture).

**III-6-2-2-Fonction alimentation**

La fonction alimentation a pour but de transférer la matière sous forme de bille de la trémie d'alimentation de la machine, vers l'empreinte du moule. Au cours de ce cheminement, la matière est soumise à différentes contraintes en passant par : les canaux d'alimentation (chargeuse) ; les points de chargement ; les formes de la pièce (nombre d'empreintes).

**III-6-2-3-Fonction refroidissement**

La régulation de la température de l'outillage est assurée par une tour de refroidissement et se fait à travers :

- un liquide qui est de l'eau pour des températures faibles, eau à 20 °C à 30°C (température ambiante) ;
- L'air comprimé.

Ce liquide est envoyé à travers des canaux sur lesquels sont soudés des buses de pulvérisations (Figure III.13).

**III-6-2-4-Fonction éjection**

La plupart des pièces réalisées par moulage à expansion restent dans le moule après son ouverture et ne sont pas évacuées sous l'effet de la gravité seule si aucun système d'éjection n'existait.

Plusieurs systèmes ont donc été conçus afin d'aider l'extraction de la pièce à l'ouverture du moule,

- Des éjecteurs qui sont des barres métalliques cylindriques pleines qui, lors de l'ouverture du moule, viennent pousser la pièce pour l'extraire du moule. Il s'agit de la technique d'éjection la plus utilisée car elle peut s'appliquer à quasiment toutes les pièces en polystyrène expansé.
- De l'air qui passe à travers des tuyères sous formes circulaires, pour aérer ou désaérer ou vaporiser le moule

Des défauts d'éjections peuvent être visibles :

- Déformations.
- Les éjecteurs transpercent la pièce au moment de l'éjection.

Causes possibles :

- Température matière trop importante au moment de l'éjection ;
- Pression interne trop élevée ;
- Mauvaise taille/disposition des éjecteurs.

Actions correctives :

- Augmenter le temps de refroidissement ;
- Adapter le profil des vitesses d'expansion ;
- Adapter la vitesse des éjecteurs ;
- Baisser la température du moule ;
- Vérifier que les éjecteurs soient correctement montés.

La pièce reste coincée au moment de l'éjection (démoulage) :

Dégradations irréversibles :

- Cassures
- Rainures
- Fissures.

Causes possibles / correction :

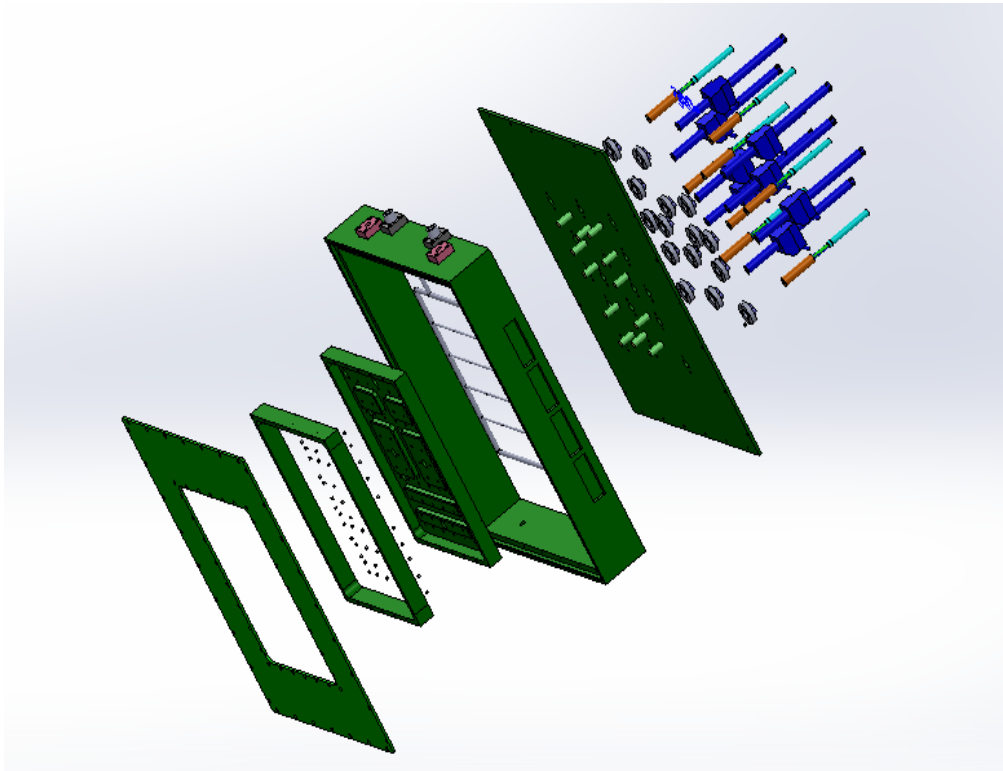
- Pression interne trop élevée ;
- La pièce reste coincée sur ses parois externes : l'éjection est trop précoce ;
- La pièce reste coincée sur ses parois internes : l'éjection est trop tardive ;
- Manque de dépouille sur la pièce moulée.

### **III-6-3-Vue des deux parties partie fixe (PF) et partie mobile (PM) du moule**

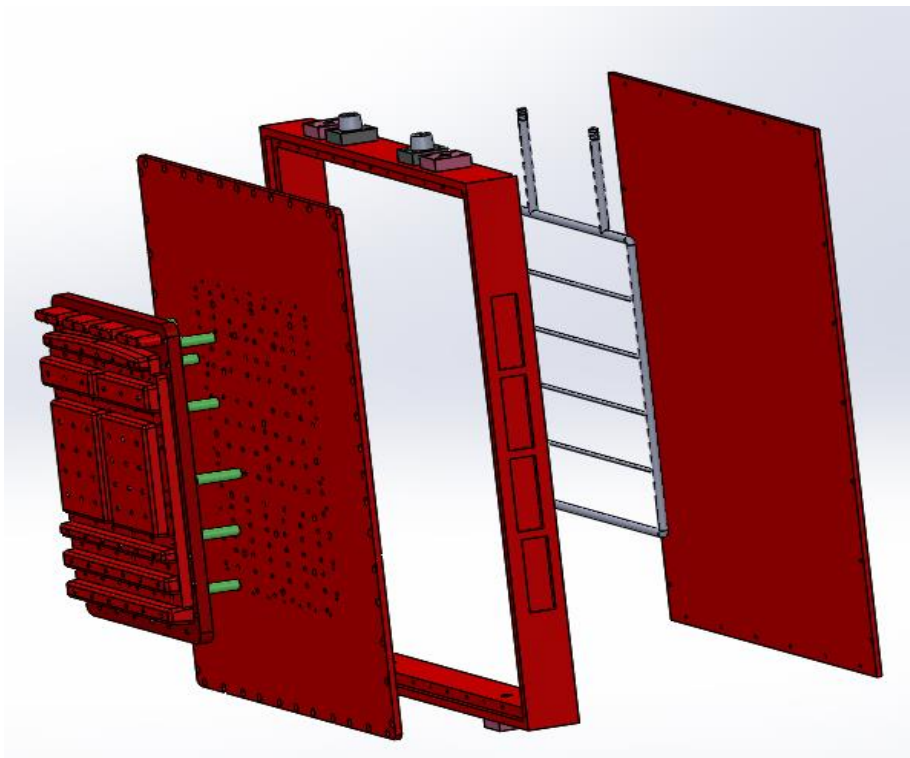
L'outillage ou moule à expansion, est en général constitué d'une partie fixe fixée sur l'expanseur, d'une partie mobile qui va se déplacer pour pouvoir libérer la pièce une fois refroidie et d'un système d'éjection chargé de pousser la pièce en dehors du moule.

De façon simplifiée notre moule est composé de deux parties bien distinctes :

- Une partie mobile, Figure III.18.
- Une partie fixe, Figure III.17.



**Figure III.17.** Partie fixe du moule en 3D conçu par SolidWorks.

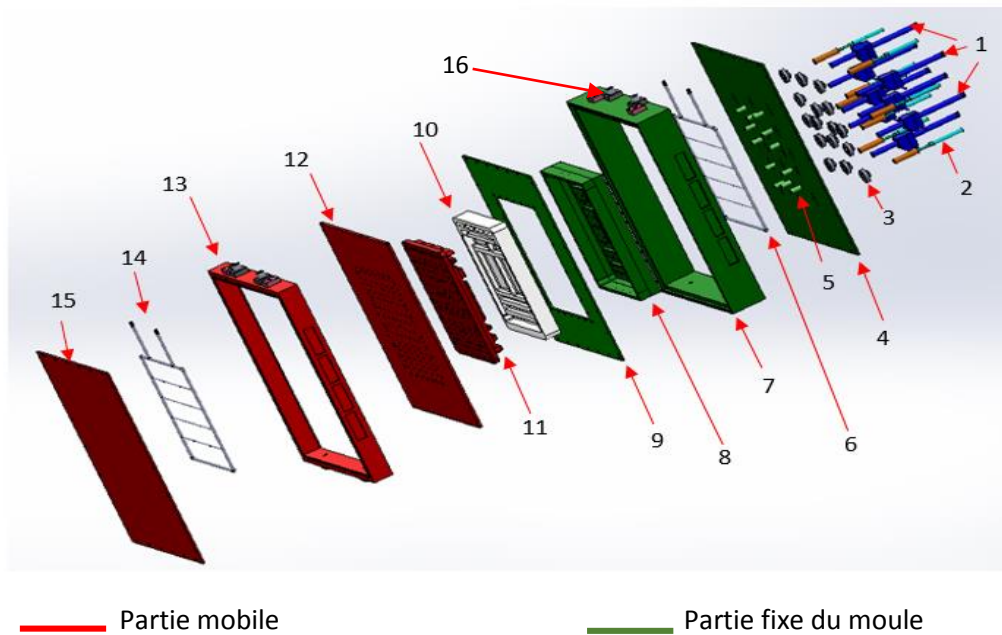


**Figure III.18.** Partie mobile du moule en 3D conçu par SolidWorks.

### III-6-4-Vue éclatée du moule

La (Figure III.19) représente les différents composants de notre moule.

□



**Figure III.19.** Vue en 3D du moule conçu par SolidWorks.

Le tableau ci-dessous (Tableau III.5) donne les terminologies des éléments représentés avec des flèches et numéros.

**Tableau III.5.** Terminologie des éléments constituant l'outillage.

| N° Pièces | Terminologies                                    |
|-----------|--------------------------------------------------|
| 1         | chargeuses                                       |
| 2         | Ejecteurs                                        |
| 3         | Bagues de centrages plus les brides              |
| 4         | plaque porte chargeuses et éjecteurs partie fixe |
| 5         | Tasseaux                                         |
| 6         | serpentin                                        |
| 7         | Cadre partie fixe                                |
| 8         | fond                                             |
| 9         | Plaque porte empreinte                           |
| 10        | Palette ESP-FRI350L                              |
| 11        | Plaque porte pionçons                            |
| 12        | Plaque porte empreinte                           |
| 13        | Cadre partie mobile                              |
| 14        | serpentin                                        |
| 15        | Plaque arrière partie mobile                     |
| 16        | Raccords d'entrées d'eau et de vapeur            |

### III-7-Présentation des éléments constituant l'outillage

Les éléments de notre moule sont :

#### III-7-1-Les chargeuses

Elles sont placées sur la plaque porte chargeuses et injecteurs, c'est éléments de l'outillage assurant un acheminement de la matière plastique PSE, de la trémie vers le moule (Figure III.20, 21, 22), leurs nombre doit être le plus grand possible afin d'assurer un remplissage uniforme de la pièce, ce sont des éléments achetés par l'entreprise ENIEM.



Figure III.20. Chargeuse réelle et en 3d conçu par SolidWorks.

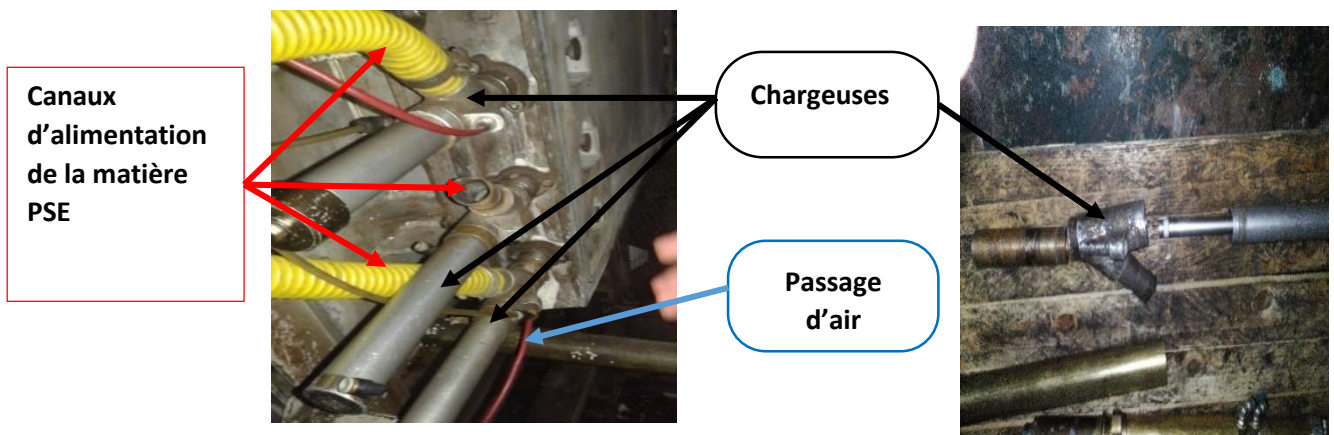


Figure III.21. Exemple d'une chargeuse et son emplacement sur un expandeur industriel ENIEM.

#### III-7-2-Les Ejecteurs

Éléments de l'outillage qui permettent d'extraire la ou les pièces en matière plastique de l'empreinte lors du démoulage et l'éjection des pièces en dehors du moule (Figure III.22).

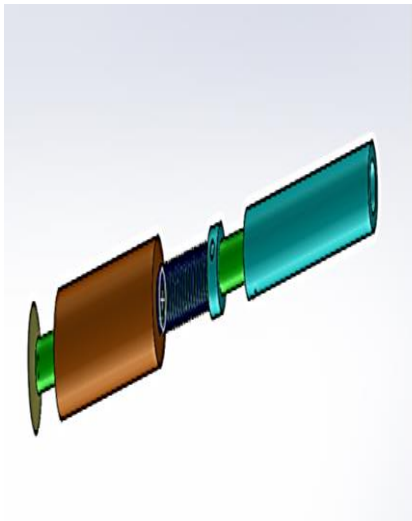


Figure III.22.1 Ejecteur conçu par SolidWorks.

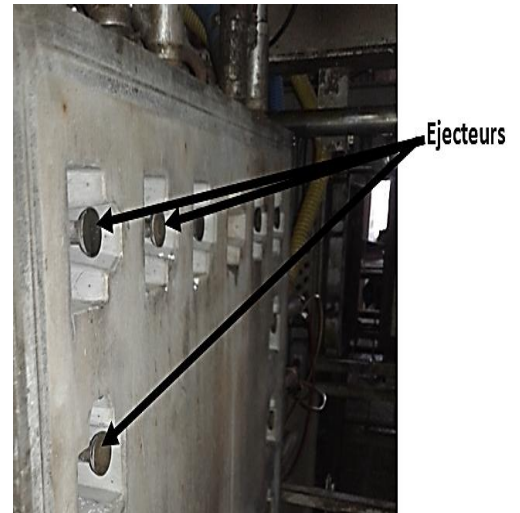


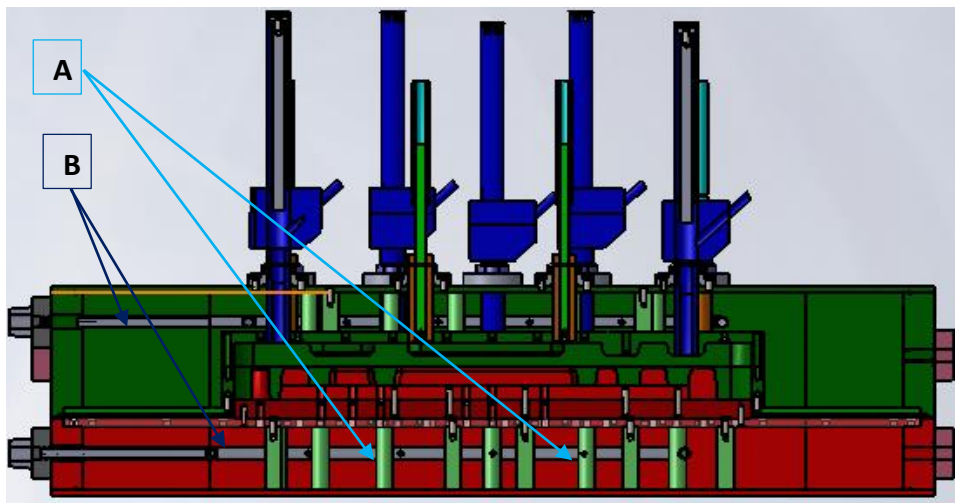
Figure III.22.2 Ejecteurs places sur la partie fixe

- **Leurs formes** : Circulaire autant que possible (facilite d'usinage), a lame si l'appui se trouve sur un rebord ou à l'extrémité d'une nervure, tubulaire si nous sommes en présence d'une forme circulaire creuse a démouler.
- **Leur nombre** : Le plus grands nombres possibles afin d'assurer une extraction sans problème. Le minimum afin de réduire les couts de l'outillage.
- **Le positionnement** : Sur des surfaces non visibles et non fonctionnelles à proximité des endroits où l'empreinte est profonde (nervure, bossage...), aussi à proximité immédiate des contre-dépouilles ou des surfaces ayant des dépouilles faibles.
- **La longueur** : Chaque éjecteur est ajuste individuellement par rapport à la surface de l'empreinte.
- **La course** : Elle sera au minimum égale à la profondeur maxi de l'empreinte à démouler.
- **Sécurité** : Afin d'éviter toute détérioration de l'outillage, il est impératif qu'à la fermeture du moule le dispositif d'éjection soit rentré. Les systèmes permettant le retour des éjecteurs sont :
  - ✓ Les ressorts. ★
  - ✓ Les vérins.
  - ✓ Les éjecteurs de remise à zéro.
- **Choix du dispositif d'éjection** : En fonction de la forme de la pièce, du nombre de pièces, des spécifications du cahier des charges de la pièce, on choisira un type d'éjection différent :

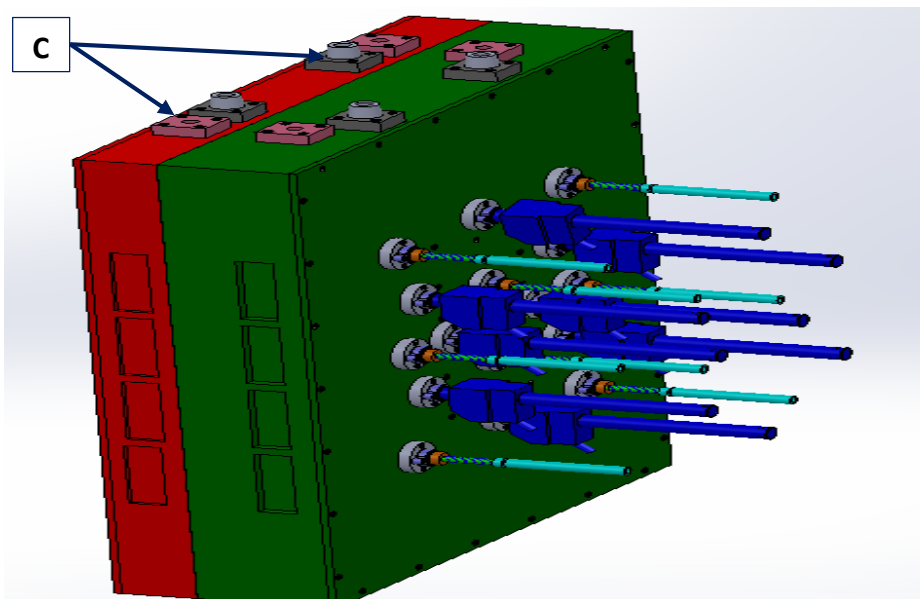
- ✓ Ejecteur cylindrique ou tubulaire.
- ✓ Ejecteurs à lames.
- ✓ Soupape d'éjection. ★
- ✓ Ejection combine (associe 2 ou 3 systèmes).
- ✓ Ejecteur annulaire.
- ✓ Air comprimé. ★

**NB :** ★ l'étoile désigne le type utilisé dans notre moule.

Les figures (Figure III.23, 24) ci-dessous donnent différentes vues en 3D du moule après fermeture ce qui nous permet de mieux visualiser les différentes composantes et le volume intérieur:

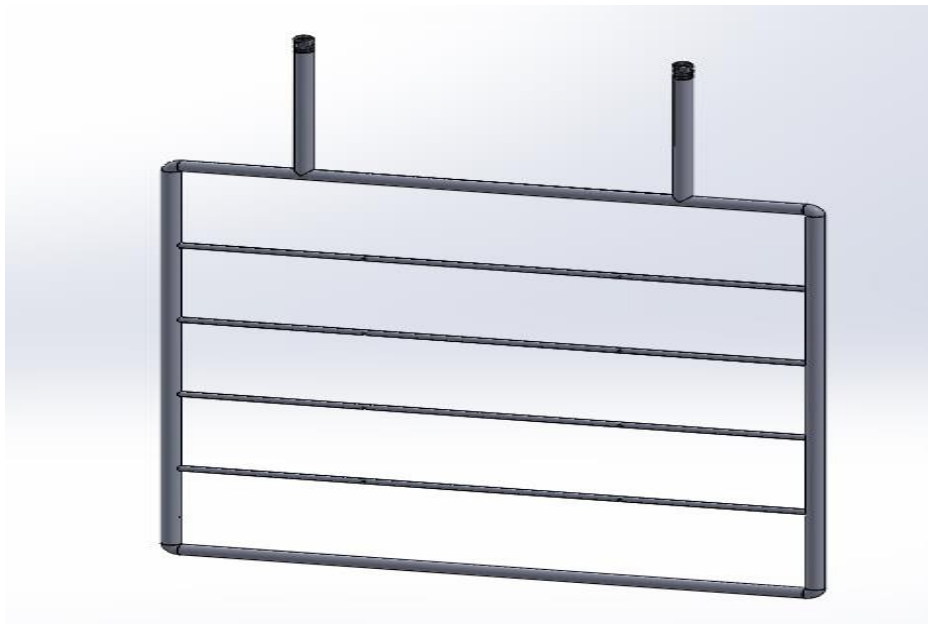


**Figure III.23.1.** Coupe horizontale du moule fermé en 3D conçu par SolidWorks.



**Figure III.23. 2.** Vue complète du moule fermé en 3D conçu par SolidWorks.





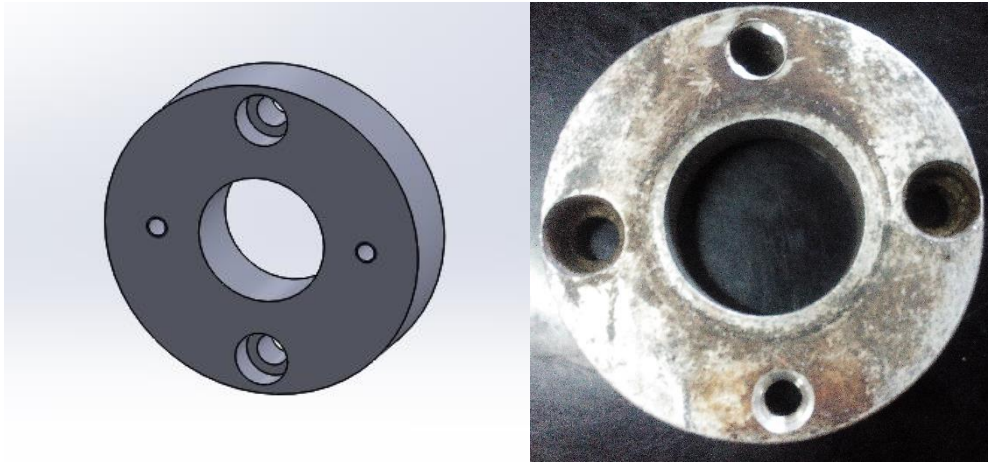
**Figure III.25.** Le serpentin (régulateur de la température) conçu par SolidWorks.

#### III-7-4-Les brides et les bague de centrages

D'autres éléments comme les bagues de centrages et les brides sont nécessaires à la fixation des chargeuses et éjecteurs sur la plaque porte chanteuse et éjecteurs et le bon centrage de ces derniers au moment du fonctionnement du moule. Les (figures III.26, 27) ci-dessous présentent la bride et la bague de centrage en forme 3d conçues par SolidWorks.

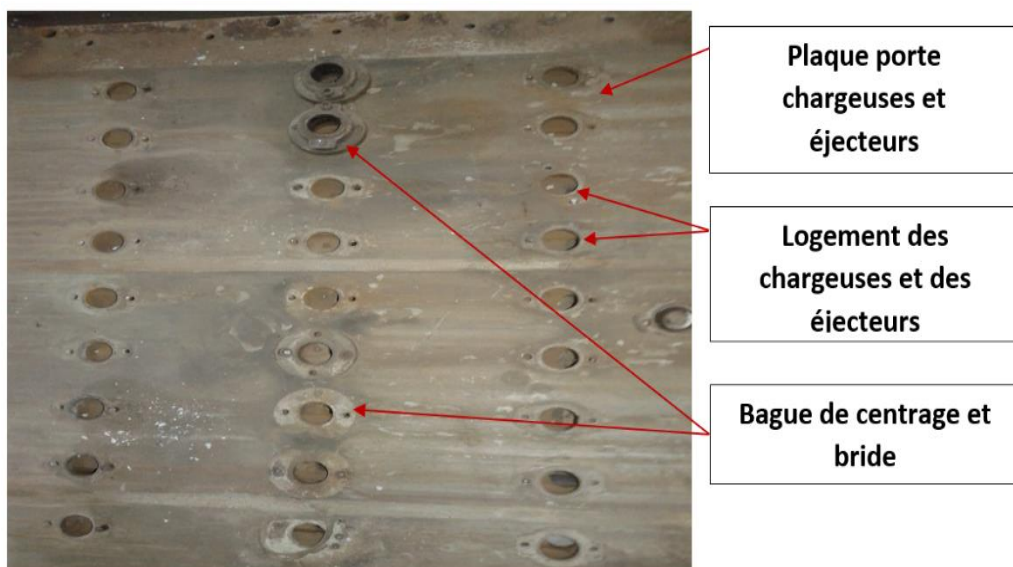


**Figure III.26.** Une bride conçue par SolidWorks, et une bride réelle.



**Figure III.27.** Bague de centrage conçue par SolidWorks et une bague de centrage réelle.

La (Figure III.28) montre leurs emplacements sur le moule :



**Figure III.28.** Emplacement de la bague de centrage et de la bride sur la plaque porte chargeuses et éjecteurs.

### III-8-Choix des matériaux [5]

Un matériau est la forme marchande d'une matière première choisie en raison de ces propriétés d'usage spécifiques et mise en œuvre par des techniques appropriées pour l'obtention d'un objet de géométrie donnée à fonction préméditée.

Le (Tableau III.6) suivant, nous montre les différents matériaux utilisés pour chaque pièce :

**Tableau III.6.** Choix des matériaux.

| Nom de la pièce                                  | Matière           | $\rho$ densité volumique [Kg/m <sup>3</sup> ] | Re [MPa] |
|--------------------------------------------------|-------------------|-----------------------------------------------|----------|
| plaque arrière coté mobile                       | Al Mg 5           | 2700                                          | 100      |
| Tasseaux partie mobile                           | Al Mg 5           | 2700                                          |          |
| cadre partie mobile                              | Al Mg 5           | 2700                                          |          |
| Plaque porte empreinte partie mobile             | Al Mg 5           | 2700                                          |          |
| Plaque porte pionçons                            | Al Mg 5           | 2700                                          |          |
| Pionçons                                         | Al Mg 5           | 2700                                          |          |
| Plaque secondaire partie mobile                  | Al Mg 5           | 2700                                          |          |
| Plaque porte empreinte partie fixe               | Al Mg 5           | 2700                                          |          |
| Panneaux                                         | Al Mg 5           | 2700                                          |          |
| Fond partie fixe                                 | Al Mg 5           | 2700                                          |          |
| Cadre partie fixe                                | Al Mg 5           | 2700                                          |          |
| Tasseaux partie fixe                             | Al Mg 5           | 2700                                          |          |
| Plaque porte chargeuses et éjecteurs partie fixe | Al Mg 5           | 2700                                          |          |
| Vis CHC à tête creuse                            | Cu Al 10 Fer 5 Ni | /                                             |          |

### III-8-1-Aluminium et Ses Alliages (Al Mg5)

Les alliages d'aluminium sont divisés en deux grandes catégories : les alliages de fonderie, qui sont élaborés en tenant compte de leurs propriétés à l'état liquide afin de produire des pièces de fonderie saines, et les alliages de corroyage élaborés en tenant compte plus particulièrement de leur capacité à être mis en forme à l'état solide.[5]

Nous avons opté pour cet alliage (Al Mg 5) pour sa disponibilité au niveau de l'entreprise et parce qu'il présente diverses propriétés qui permettent à la réalisation du moule. Sa température de fusion est 660 °C et celle de d'ébullition 2467°C environ.

- ❖ Sa caractéristique la plus importante est sa faible densité 2.7g/m<sup>3</sup> à température ambiante.
- ❖ Il est très ductile, ce qui facilite son usinage et sa mise en forme.
- ❖ L'aluminium se distingue par sa résistance élevée à la corrosion à cause de la formation à sa surface d'une couche protectrice (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) avec le temps.

### III-8-2-Cuivre et alliages

C'est un métal rouge plus ou moins foncé. Il est très bon conducteur de la chaleur et de l'électricité(le second après l'argent)

- Température de fusion : 1083°C.
- Masse volumique: 8.9 kg/dm<sup>3</sup>.

La structure est de type Cubique à Faces Centrées (CFC), ce qui le rend très ductile et très malléable. Il s'écrouit facilement. La résistance à la corrosion est bonne. L'oxydation à l'air commence vers 500°C. Il est souvent employé sous forme d'alliage.

- ✓ Laitons ;
- ✓ Bronze.

Nous avons optés pour le cupro-aluminium le CC333G [Cu Al 10 Fer 5 Ni], car :

- ✓ C'est un matériau devant résister à la corrosion.
- ✓ Inoxydable à chaud.
- ✓ Utilisé pour les visseries et boulons.

### III-9-Partie calcul

#### III-9-1-Masse de matière mise en œuvre

Masse de matière = (volume de la pièce × masse volumique de la matière) + perte.  
La perte (bavures) doit être déterminée expérimentalement pour chaque moule et pour chaque matière.

$$\rho = \frac{M}{V} \leftrightarrow M = \rho * V$$

Avec  $\rho = 15\text{Kg/m}^3$  Et  $V = 0.026 \text{ m}^3 \leftrightarrow M = 15 * 0.026 = 0.39\text{Kg}$        $M = 390 \text{ g}$

**III-9-2-Force de moulage**

La pression de moulage P est donnée par la formule :

$$P = \frac{F}{S * [K]} \leftrightarrow F = [K] * P * S$$

Pour une pression recommandée par le constructeur de 0.7 bar.

$$P = 0.7 \text{ bar} = 7,13 \text{ tonnes/m}^3$$

- **F** : est la force totale appliquée sur le moule.
- **S** : est la surface projetée de la moulée (plan horizontal), égale à la somme de la surface projetée de toutes les empreintes. Donnée par SolidWorks.

$$S = 1.46 \text{ m}^2.$$

- **[K]** : Coefficient de sécurité. Entre 1.5 et 2

**Application numérique :**

- Pour **[K]** = 2

$$F = 2 * 7,13 * 1.46$$

$$F = 20.41 \text{ Tonnes.}$$

$$20 \text{ Tonnes} = 20000 \text{ Kg} = 200000 \text{ N}$$

**III-9-3-Résistance des éléments du moule**

La force exercée par les plateaux de la machine sur les différentes plaques du moule, engendre des contraintes à l'intérieur du moule provoquant des déformations caractérisées d'une plaque à une autre.

La force de fermeture qu'exerce une machine à expansion est égale à son tonnage. Partant de ce principe, l'expanseur fournit une force de fermeture de 20 Tonnes.

Donc la force de fermeture F du moule est de  $20 * 10^4 \text{ N}$ .

**III-9-3-1-Condition de résistance au matage**

$$\sigma \leq [\sigma] \quad \sigma = \frac{F}{S} \leq R_{pe}$$

$$\text{Avec : } R_{pe} = \frac{R_e}{S} \text{ et } S=2 ;$$

Où **Re** : résistance limite à la traction ( $R_e \leq 100 \text{ MPa}$  pour l'aluminium).

$S'$ : coefficient de sécurité ; Il est choisi de façon à ce qu'en cours de fonctionnement normal, les contraintes normales maximales ne dépassent pas la limite élastique  $Re$  du matériau.

Pour l'Aluminium le coefficient de sécurité est compris entre 1.5 et 2.

$$\text{Pour } S' = 2 \quad \gg \quad Rep = \frac{100}{2} = 50 \text{ MPa.}$$

- **Plaque arrière porte chargeur (même chose pour la plaque arrière partie mobile même dimensions, même force.) :**

$$\sigma = \frac{F}{S} \leq Rep$$

$$\text{Avec } \left\{ \begin{array}{l} F: \text{ Est la force exercée sur la plaque. } F = 200000. \\ S: \text{ Est la surface de la plaque soumise au matage; } S = l * e. \\ \quad \text{Ou } e: \text{ Est l'épaisseur de la plaque. } e = 12\text{mm.} \\ \quad \text{Et } l: \text{ Est la longueur de la plaque. } l = 1350\text{mm.} \end{array} \right.$$

**A.N :**

$$\sigma = \frac{F}{S} \leq Rep \quad \gg \quad \sigma = \frac{200000}{12 * 1350} = \frac{200000}{16200} \quad \gg \quad \sigma = 12.34 \text{ MPa} < 50 \text{ MPa}$$

→ *Condition vérifiée.*

- **cadre partie fixe (Même chose pour le cadre partie mobile) :**

$$\sigma = \frac{F}{S} \leq Rep$$

$$\text{Avec } \left\{ \begin{array}{l} F: \text{ Est la force exercée sur le cadre. } F = 200000. \\ S: \text{ Est la surface de la plaque soumise au matage; } S = l * e. \\ \quad \text{Ou } e: \text{ Est l'épaisseur de la plaque. } e = 47\text{mm.} \\ \quad \text{Et } l: \text{ Est la longueur de la plaque. } l = 1350\text{mm.} \end{array} \right.$$

$$\sigma = \frac{F}{S} \leq Rep \quad \gg \quad \sigma = \frac{200000}{47 * 1350} = \frac{200000}{63450} \quad \gg \quad \sigma = 3.50 \text{ MPa} < 50 \text{ MPa}$$

→ *Condition vérifiée.*

- Tasseaux partie fixe : (formes cylindriques)

$$\sigma = \frac{F}{N * S''} \leq Rep$$

$$Avec \left\{ \begin{array}{l} F: \text{ Est la force exercée sur les tasseaux. } F = 200000. \\ d = 25mm. \\ \text{Ou } S'': \text{ Est le volume du cylindre. } S'' = \frac{\pi * 25^2}{4} = 490.625mm. \\ \text{Et } l: \text{ Est la longueur du cylindre. } l = 65mm. \\ N: \text{ Nombre de tasseaux. } N = 12. \end{array} \right.$$

$$\sigma = \frac{F}{N * S''} \leq Rep \gg \sigma = \frac{200000}{490.625 * 12} = \frac{200000}{5887.5} \gg \sigma = 33.97 MPa < 50 MPa$$

→ *Condition vérifiée.*

- Tasseaux partie mobile : (formes cylindriques)

$$\sigma = \frac{F}{N * S''} \leq Rep$$

$$Avec \left\{ \begin{array}{l} F: \text{ Est la force exercée sur les tasseaux. } F = 200000. \\ d = 25mm \\ \text{Ou } S'': \text{ Est le volume du cylindre. } S'' = \frac{\pi * 25^2}{4} = 490.625mm. \\ \text{Et } l: \text{ Est la longueur du cylindre. } l = 105mm. \\ N: \text{ Nombre de tasseaux. } N = 17. \end{array} \right.$$

$$\sigma = \frac{F}{N * S''} \leq Rep \gg \sigma = \frac{200000}{(490.625) * 17} = \frac{200000}{44625} \gg \sigma = 23.97 MPa < 50 MPa$$

→ *Condition vérifiée.*

### III-9-3-2-Calcul de résistance des vis

Afin de vérifier la résistance des vis aux conditions de travail du moule, il est nécessaire de définir le comportement de quelques pièces sollicitées mécaniquement.

- **Poids des pièces constituant le moule**

Le poids est déterminé par la relation suivante (Tableau.III.7) :

$$P = \rho * V$$

Avec  $\left\{ \begin{array}{l} P: \text{Le poids de la pièce en [Kg]}. \\ \rho : \text{la masse volumique en } \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right]. \rho = 2700 \text{ Kg/m}^3 \\ V : \text{volume de la pièce } \text{m}^3. \text{Données solidworks} \end{array} \right.$

**Tableau III.7.** Calculs du poids et du volume de chaque pièce.

| Nom de la pièce                                  | Matière | Volume [m <sup>3</sup> ] | $\rho$ densité volumique [Kg/m <sup>3</sup> ] | Poids [Kg] |
|--------------------------------------------------|---------|--------------------------|-----------------------------------------------|------------|
| plaque arrière coté mobile                       | Al Mg 5 | 0.018                    | 2700                                          | 50.23      |
| Tasseaux partie mobile                           | Al Mg 5 | 0.00088                  | 2700                                          | 2.38       |
| cadre partie mobile                              | Al Mg 5 | 0.024                    | 2700                                          | 65         |
| Plaque porte empreinte partie mobile             | Al Mg 5 | 0.009                    | 2700                                          | 25.47      |
| Plaque porte pionçons                            | Al Mg 5 | 0.014                    | 2700                                          | 39.65      |
| Pionçons                                         | Al Mg 5 | 0.0087                   | 2700                                          | 23.68      |
| Plaque secondaire partie mobile                  | Al Mg 5 | 0.0088                   | 2700                                          | 23.93      |
| Plaque porte empreinte partie fixe               | Al Mg 5 | 0.0183                   | 2700                                          | 49.61      |
| Panneaux                                         | Al Mg 5 | 0.004                    | 2700                                          | 11.04      |
| Fond partie fixe                                 | Al Mg 5 | 0.016                    | 2700                                          | 44.81      |
| Cadre partie fixe                                | Al Mg 5 | 0.043                    | 2700                                          | 117.43     |
| Tasseaux partie fixe                             | Al Mg 5 | 0.00035                  | 2700                                          | 0.96       |
| Plaque porte chargeuses et éjecteurs partie fixe | Al Mg 5 | 0.021                    | 2700                                          | 57         |

- **Condition de résistance au cisaillement**

**Données :** Vis CHC a têtes fraisées a 6 pans creux ISO 10642.

**Condition de résistance :**  $\tau = \frac{F}{N * S * n} \leq [\tau]_{CIS}$

$$\left\{ \begin{array}{l} R_e : \text{La limite d'élasticité de la vis. } R_e = 250 \text{ MPa.} \\ S : \text{Coefficient de sécurité; } S = 2. \\ N : \text{Nombre de vis.} \\ n : \text{Nombre de sections cisillées.} \\ F : \text{Poids des pièces.} \\ d : \text{diamètre de la vis} \end{array} \right.$$

$$[\tau]_{CIS} = 0.8 * \frac{R_e}{2} = 0.8 * \frac{250}{2} = 100 \text{ MPa.} \gg [\tau]_{CIS} = 100 \text{ MPa.}$$

- partie mobile :

✓ Plaque arrière

$$\left\{ \begin{array}{l} F = 502.3 \text{ N} \\ N = 26 \\ n = 1 \\ s = 50.24 \text{ mm}^2 \\ d = 8 \text{ mm} \end{array} \right.$$

$$\tau = \frac{F}{N * n * S} \leq [\tau]_{CIS} \gg \tau = \frac{502.3}{(26 * 1 * 50.24)} = 0.38 \text{ MPa} < 100 \text{ MPa}$$

→ Condition vérifiée.

✓ Plaque porte empreinte :

$$\left\{ \begin{array}{l} F = 1151.1 \text{ N} \\ N = 28 \\ n = 1 \\ s = 78.5 \text{ mm}^2 \\ d = 10 \text{ mm} \end{array} \right.$$

$$\tau = \frac{F}{N * n * S} \leq [\tau]_{CIS} \gg \tau = \frac{1151.1}{(28 * 1 * 78.5)} = 0.52 \text{ MPa} < 100 \text{ MPa}$$

→ Condition vérifiée.

- Partie fixe

✓ plaque porte chargeuses et éjecteurs

$$\begin{cases} F = 579.6N \\ N = 29 \\ n = 1 \\ s = 50.24mm^2 \\ d = 8 mm \end{cases}$$

$$\tau = \frac{F}{N * n * S} \leq [\tau]_{CIS} \gg \tau = \frac{579.6}{(29 * 1 * 50.24)} = 0.39 MPa < 100 MPa$$

→ *Condition vérifiée.*

✓ plaque porte empreinte

$$\begin{cases} F = 1054.6N \\ N = 33 \\ n = 1 \\ s = 78.5mm^2 \\ d = 10 mm \end{cases}$$

$$\tau = \frac{F}{N * n * S} \leq [\tau]_{CIS} \gg \tau = \frac{1054.6}{(33 * 1 * 78.5)} = 0.0.40 MPa < 100 MPa$$

→ *Condition vérifiée.*

### III-10-Simulation numérique [13]

Cette partie est consacrée à la simulation numérique du comportement mécanique de la palette en polystyrene expansé lors de l'application des différentes charges auxquelles elle sera semis durant sa manutention.

Nous avons commencé par une présentation générale du code de calcul par éléments fini ABAQUS. Ensuite nous avons réalisé une simulation numérique bidirectionnelle de la palette en supposant que le contact sol et palette est un plan, donc en éliminant le déplacement suivant l'axe verticale, après une étude paramétrique de maillage afin de déterminer les déplacement, les contraintes de van mises, et les déformations ressortissant de cette palette sous l'effet des différentes charges.

#### III-10-1-Le code de calcul par éléments finis ABAQUS

##### III-10-1-1-Définition

ABAQUS, est un programme de simulation numérique d'ingénierie produit par la société Dassault Simulation, il est l'un des plus performants des solveurs. Il est basé sur le principe de calcul par éléments finis, il est utilisé pour simuler devers problèmes soient linéaires des plus simple aux problèmes non linéaires complexes. Pour effectuer ces analyses ABAQUS contient une librairie étendue des éléments qui nous permettent de modéliser une quelconque géométrie même les plus compliquées, on trouve aussi une grande liste du modèles qui peut

simuler le comportement d'un large répertoire des matériaux d'ingénierie tel que les métaux, le caoutchouc, les polymères, les composites, les mousses, le sol et les roches...etc. Toutes ces options intégrées dans le logiciel le rendent capable de simuler et d'analyser le comportement des structures. (Encore plus de détails dans l'annexe A).

ABAQUS existe sous trois produits ; Abaqus/ standard/implicite, Abaqus/explicite et Abaqus/CFD.

### III-10-1-2-ABAQUS/Standard (Implicite)

Ce module représente le code de calcul implicite dédié aux calculs quasi-statiques, linéaires ou non, thermiques, acoustiques, L'algorithme de calcul se base sur des calculs itératifs visant à atteindre l'équilibre global du système à chaque incrément de temps, ce qui lui confère une grande stabilité et une certaine inertie. Il résout un large rang des problèmes linéaires et non-linéaires.

### III-10-1-3-ABAQUS/Explicite

Le module explicite est souvent utilisé pour les calculs dynamiques. Contrairement au code implicite, l'algorithme explicite n'est pas itératif. Cet algorithme se base sur un très grand nombre d'incrémentes très courts définis par la vitesse de propagation d'une onde élastique. La notion de propagation d'onde présente l'avantage de limiter la résolution par éléments atteints par l'onde ce qui présente une économie par rapport au code implicite. Ceci lui confère la capacité de réaliser des calculs rapides.

### III-10-2-Simulation

#### - Application de la charge

La zone rouge représentée sur la figure III.29 montre l'aire sur laquelle le poids du réfrigérateur est appliqué.

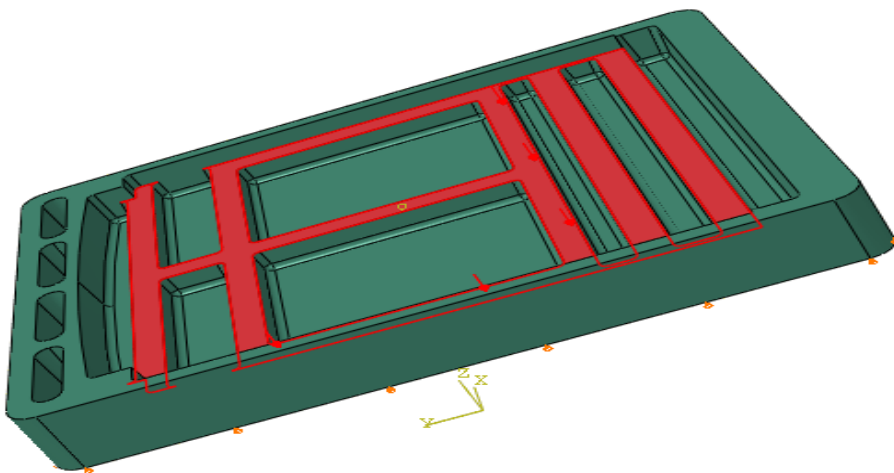
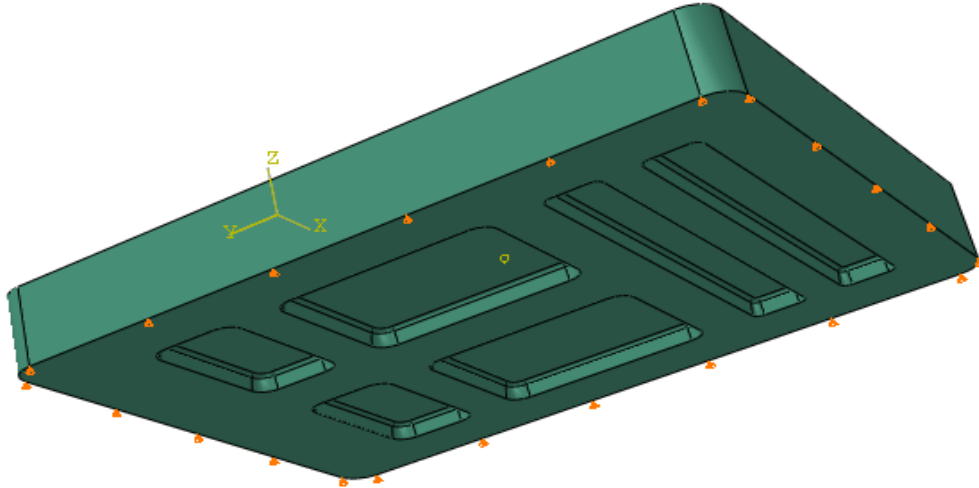


Figure III.29. Zone d'application de la charge.

### - Les conditions aux limites et le maillage

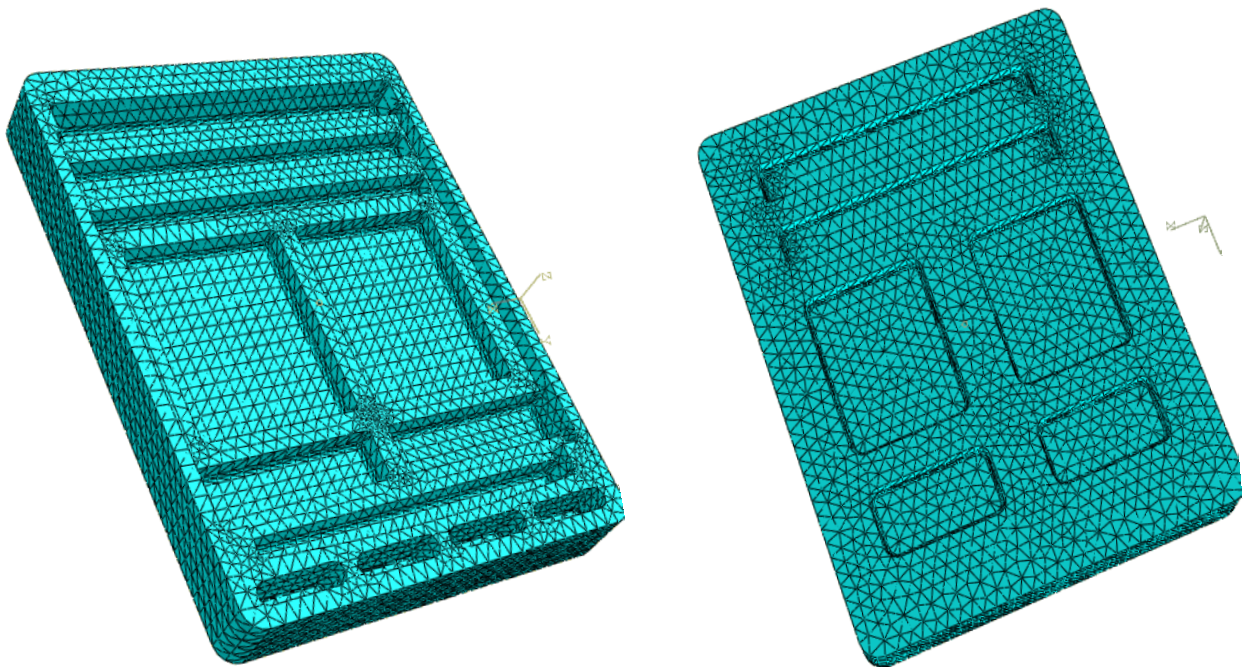
La figure III.30, représente les conditions aux limites imposées sur la palette EPS-FRI-350S. Comme le contact palette-sol est un contact plan, les déplacements suivant X et Y sont libres, et celui suivant Z est bloqué.



**Figure III.30.** Les conditions aux limites imposées sur la palette en polystyrène expansé.

### - Le maillage

Nous avons adopté un maillage tétragonal pour la discrétisation de la palette en éléments finis de type tétragonaux. La Figure III.31 montre ce maillage.

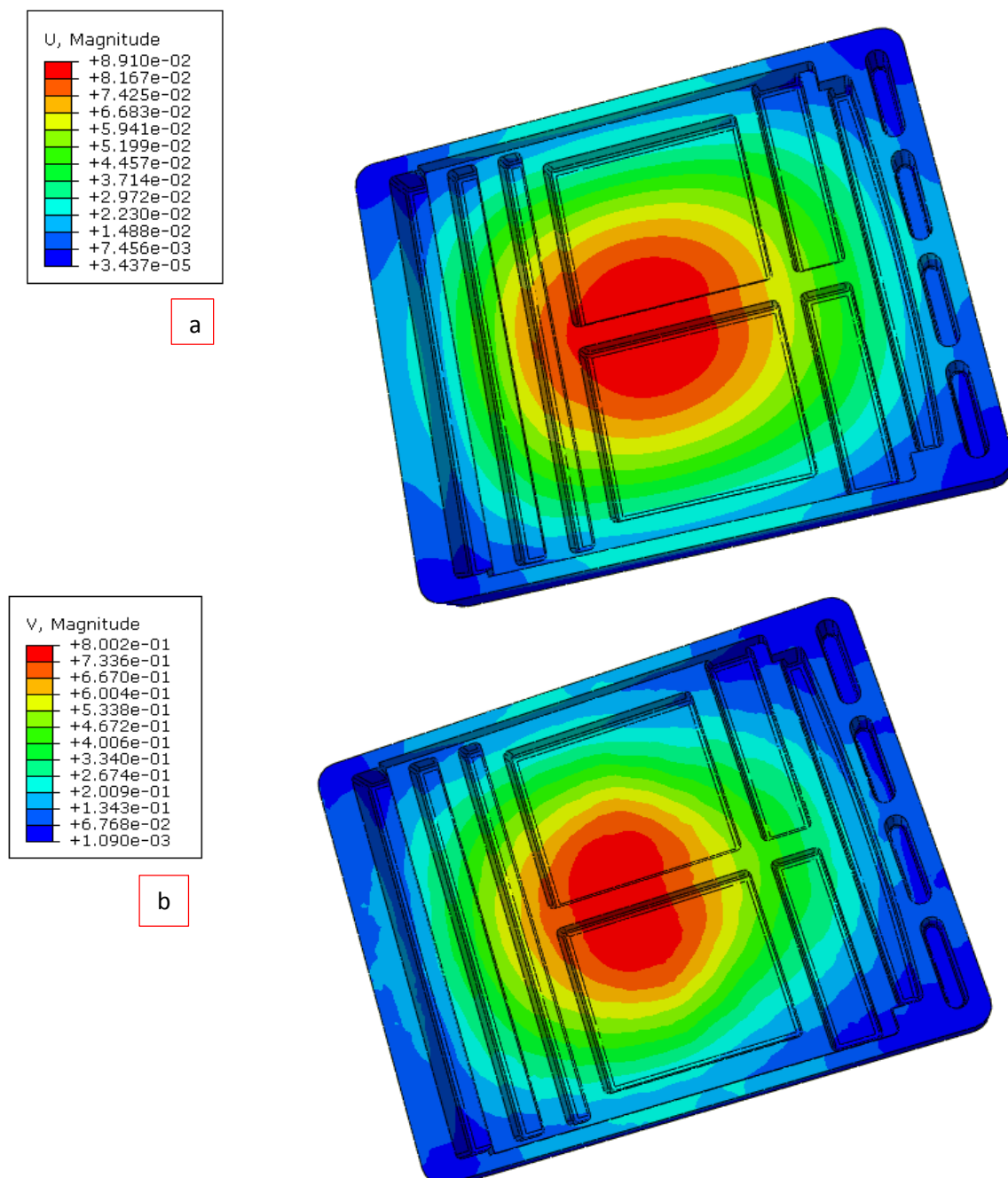


**Figure III.31.** Maillage adopté pour la palette.

### - Résultats

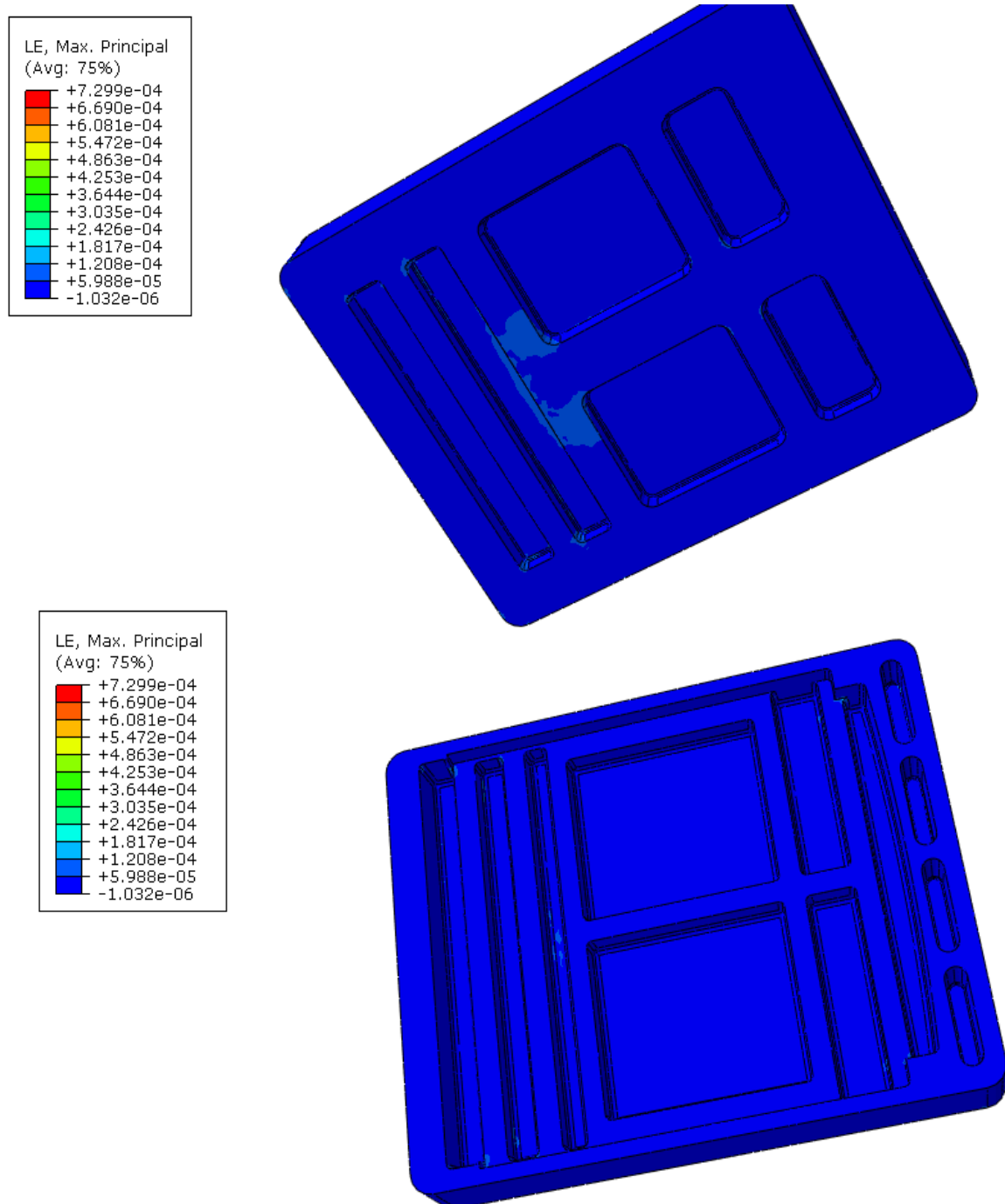
Les figures III.32, 33, 34, 35, représentent les différents résultats obtenus à l'aide du code de calcul d'ABAQUS.

Les figures III.32.a et III.32.b, montre respectivement la distribution de la magnitude des déplacements locaux de la palette, leurs vitesses de propagation correspondant.



**Figure III.32.** Aperçu des déplacements engendrés à l'intérieur de la structure de la palette EPS-FRI-350S.

La figure III.33, quant à elle donne une image précise de la répartition des déformations sur la structure et leurs valeurs, on remarque qu'il n'y a pas de zones rouges sur la structure, c'est-à-dire que la palette peut supporter plus de 65 kg.



**Figure III.33.** Répartition des déformations et leurs valeurs sur la palette EPS-FRI-350S.

La figure III.34, quant à elle donne plus d'information sur La distribution des contraintes maximale équivalentes de Van Mises dans la palette.

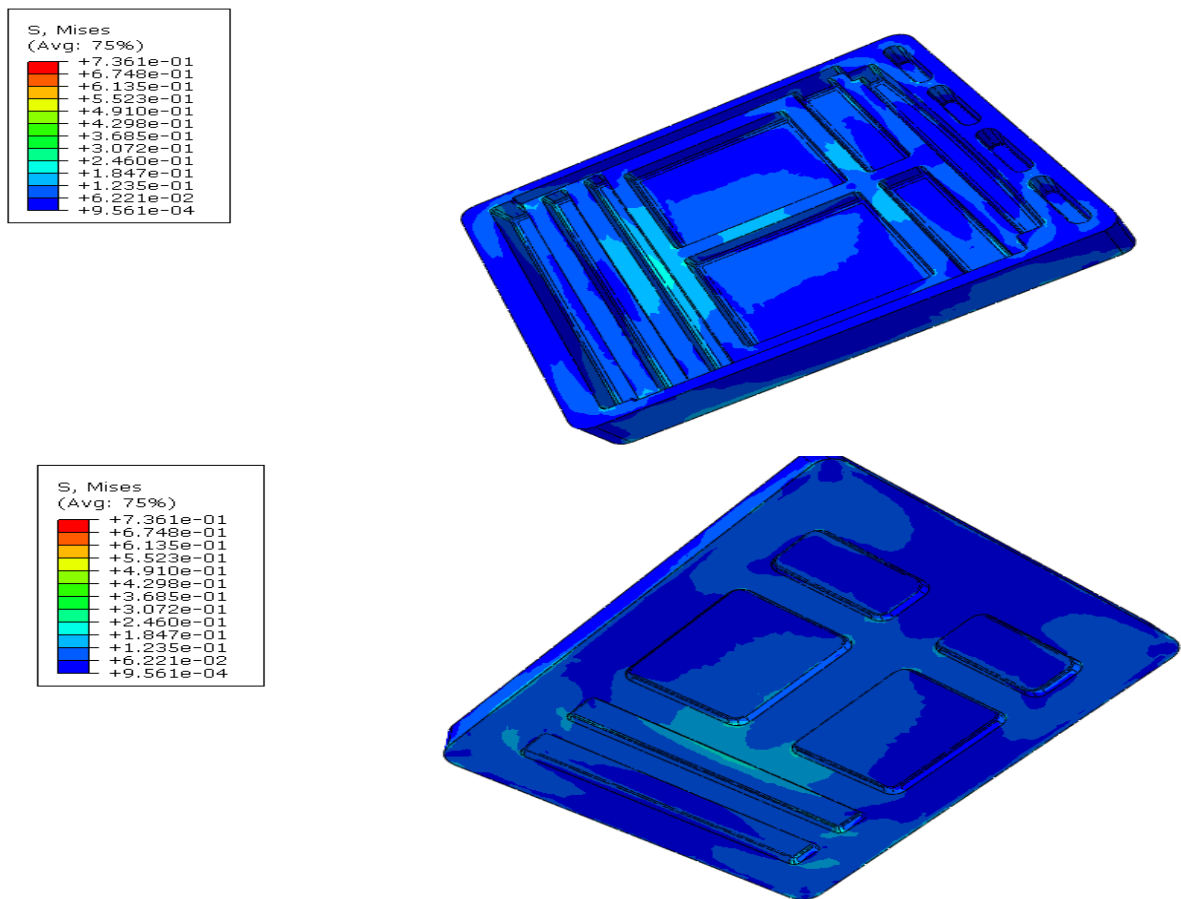


Figure III.34. Les contraintes de Van Mises.

La figure III.35, représente et situe les réactions du sol sur la palette dû au poids du réfrigérateur 350S.



Figure III.35. Les réactions de la palette.

Après cette simulation numérique faite par le logiciel de calcul des éléments finis ABAQUS, nous avons en premier lieu déterminé les contraintes maximales que peut supporter la palette, et nous avons déduit que la palette en polystyrène expansé PSE (EPS-FRI-350S), résistera largement au poids du réfrigérateur ENIEM série 350S.

### **III-11-conclusion**

Dans ce chapitre nous avons pu étudier et concevoir le moule, en premier lieu grâce au logiciel SolidWorks, ou nous avons par ailleurs fait un choix de matériaux répondants aux différentes sollicitations et forces lors du procédé de mise en forme du polystyrène. En deuxième lieu une simulation numérique grâce au logiciel ABAQUS, qui est un logiciel de calcul par éléments finis, où on a déduit que la palette en polystyrène expansé EPS-FRI-350S, résistera largement aux différentes conditions lors de sa manutention.

*Conclusion  
générale*

## Conclusion générale

---

Notre stage au niveau de l'ENIEM a été bénéfique à plus d'un titre. En effet, ce stage nous a permis de nous familiariser avec le procédé de moulage par expansion utilisé usuellement au sein de cette entreprise. De plus, notre contact très étroit avec le bureau d'études nous a permis d'accéder aux techniques d'études et de conception et de bénéficier du savoir-faire des ingénieurs ayant cumulé plusieurs années d'expérience.

Après une période d'initiation programmée en collaboration avec notre encadreur et notre co-encadreur, nous avons commencé notre projet intitulé « étude et conception d'un moule pour une palette en polystyrène expansé » et ce, tout en respectant les différentes phases usuellement admises.

Après l'étude des fiches techniques de la matière polymérique communément utilisée au niveau de l'entreprise, nous avons fait la synthèse des paramètres physico-chimiques indispensables pour l'étude et la conception du moule objet de notre projet.

Ensuite nous avons entrepris l'étude du procédé de moulage par expansion afin de tirer les paramètres technologiques nécessaires pour les notes de calcul, le design et la conception.

En menant des études comparatives de différentes palettes mises sur le marché, nous avons optimisé le produit tout en tenant compte des aspects techniques de moulage, de performances mécaniques, de design et économiques en minimisant le poids de la moulée.

A l'issue de ces études de base, nous avons finalisé les notes de calcul associées à la RDM et la conception afin de fixer définitivement la géométrie de la pièce.

Enfin, l'étude et la conception étant terminées, il ne reste qu'à procéder à la réalisation du moule par l'ENIEM.

*Bibliographie et  
perspectives*

## Bibliographie

---

- [1] BOUZID Latifa, Modélisation moléculaire des copolymères PMMA-PS, mémoire, université d'Oran, 2011.
- [2] MAHIOUT Soraya, Mettre en valeur ou bannir le polystyrène-Approche dans un cadre de développement durable, thèse de doctorat, université SHERBOCK, 2014.
- [3] AYAT Moulkheir, synthèse et caractérisation de nouveaux polymères a base de  $\alpha$ -méthyle styrène canalisé par la Maghnite échangée, thèse de doctorat université d'Oran, 2016
- [4] REGLERO RUIZ José Antonio, VINCENT Michel, polymères allégés en injection, article scientifique, université HEI paris, 2013.
- [5] ENIEM, documents fournies par l'entreprise ENIEM, fiche technique des outillages.
- [6] HEIM Philippe, LINARÈS Olivier, HYM Laure, polystyrène et copolymères de styrène, techniques de l'ingénieur, Atofina du groupe Total, France, 2002, référence internet AM3340.
- [7] NOVA CHEMICAL®, le stockage et la manutention du polystyrène expansé, guide de sécurité, France, 2005.
- [8] CSEMP, emballages de matières plastiques, chambre syndicale des emballages des matières plastique, France, 2002.
- [9] Les plastiques dans notre vie quotidienne, revue scientifique, cours, collège le Monteil, France 2016
- [10] ALIANE Massinissa, GUESSOUM Fatah, étude et conception d'un moule de thermoformage pour la nouvelle contre pote du produit réfrigérateur 350S, mémoire de fin d'étude, UMMTO, 2016
- [11] D.A.Tomalia, J.M. Frechet, dendrimers and other dendritic polymère, New York, 2001
- [12] S.Jouanne, options chimie physicochimie des polymères, université Piere et Marie Curie, 2005
- [13] Dassault système, [www.3ds.com](http://www.3ds.com).
- [14] DUPEUX Michel, science des matériaux, livre aide-mémoire.
- [15] C. fond, cours sur les polymères.
- [16] BEGHIN Bertrand, polystyrène expansé, techniques de l'ingénieur, Haute étude industrielles Ile de France (HEI), 2008, référence internet AM3341.

## Perspectives

---

S'agissant d'un projet initié pour la première fois par l'ENIEM, nous proposons comme perspectives de :

1. Caractériser la matière première PS-E via diverses techniques physico-chimiques et mécaniques pour comprendre le comportement de cette matière dans le procédé de mise en œuvre.
2. Etude et analyse du procédé pour comprendre les aspects phénoménologiques associés à la trilogie Matière-Machine-Energétique.
3. Pilotage du procès via la mise en place de capteurs de pression, de température et de temporisateurs.

# *Annexe A*

*Le code de calculs par  
éléments finis ABAQUS*

### A-1-Le code de calcul par éléments finis Abaqus

Un solveur (Standard, Explicit, Implicit, etc.) qui effectue la résolution d'un problème décrit par un fichier « entrée » (ou fichier de données) et dont il écrit la solution vers un fichier « de sortie » (ou fichier de résultats) (Figure 1)

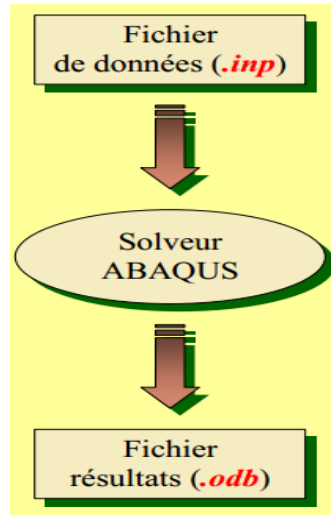


Figure 1. Les fichiers d'entrée et de sortie dans le solveur Abaqus.

Les étapes de simulation sont résumées dans la (Figure 2) ci-dessous :

- 1- Preprocessing (Abaqus/CAE)
- 2- Simulation (Abaqus/Standard or Abaqus/Explicit)
- 3- Postprocessing (Abaqus/CAE)

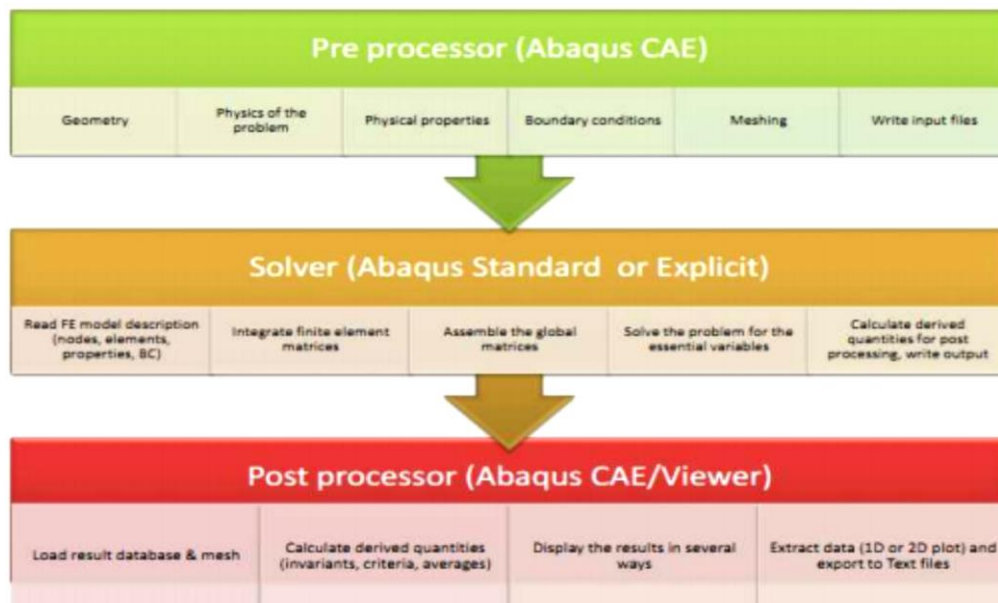


Figure2. Étapes de simulation dans le code de calcul par éléments finis Abaqus.

## Annexe A : Le code de calcul par éléments finis Abaqus

Les fichiers de sortie (Figure3) sont :

- Le fichier («ñ texte ù») de données : Extension : .inp Contenu : mots clés qui décrivent les géométries, les matériaux, les conditions limites ...etc.;
- Le fichier de résultats : Extension : .odb Contenu : contours et courbes résultats Les autres fichiers créés pendant le calcul ;
- Le Fichier .com : exécutable de votre calcul ;
- Le Fichier .dat : Fichier résumé de votre modélisation Messages d'erreur concernant votre modélisation Temps de calcul ;
- Le Fichier .msg : Fichier résumé du calcul en cours Messages d'erreur lors du déroulement du calcul.

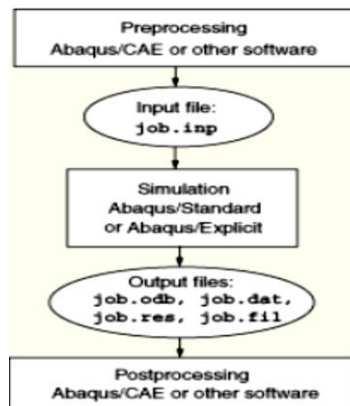


Figure 3. Les fichiers de sortie après les calculs.

### A-2-Description de l'interface ABAQUS CAE

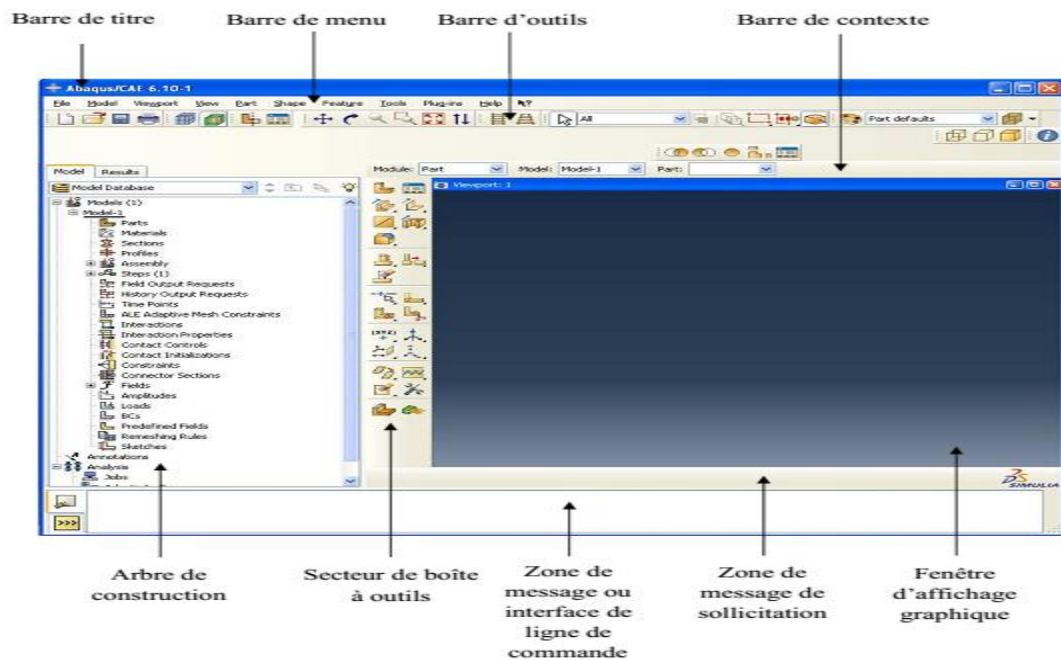


Figure 4. Interface Abaqus.

- **Barre de menu** : La barre de menu contient tous les menus disponibles ; les menus donnent l'accès à toutes les fonctionnalités du produit.

- **Barre d'outils** : Y sont disposées les icônes correspondant aux commandes les plus courantes, c'est-à-dire les commandes d'ouverture et de sauvegarde de fichiers, et les commandes réglant l'affichage des vues (perspective, ombrage, zoom, rotations, etc.)

- **Barre de contexte** : Barre de menus déroulant permettant d'accéder aux autres modules, ou de sélectionner le modèle ou la pièce sur lesquels on souhaite travailler.

- Secteur de boîte à outils : On dispose d'une colonne d'icônes permettant d'accéder aux outils disponibles à l'intérieur du module dans lequel on se trouve.

- **Zone de message de sollicitation** : L'espace juste sous la fenêtre d'affichage graphique est celui dans lequel Abaqus vous parle : les messages affichés à cet endroit sont faits pour vous guider dans l'action que vous avez entreprise.

- **Arbre de construction** : L'arbre donne une description visuelle de la hiérarchie des objets du modèle. Tous les objets (comme des pièces, des matériaux, des étapes, des charges) sont indiqués par de petites icônes avec en parenthèses le nombre de ces objets. L'ordre de l'arbre reflète l'ordre classique d'élaboration du modèle. A partir de cet arbre il est possible de retrouver la plupart des fonctionnalités de la barre de menu principale.

### A-3-Les modules principaux d'Abaqus

#### A-3-1-ABAQUS/Standard

Résolution par EF les problèmes :

\_ Linéaires et non-linéaires

\_ Géométries 1D, 2D, Axis ou 3D

\_ Nombreuses procédures d'analyses dans le domaine temporel ou fréquentiel.

#### A-4-2-ABAQUS/Explicit

Résolution par EF les problèmes :

- Analyse non-linéaire, transitoire et dynamique de structures Méthode explicite d'intégration du temps

- Mais possibilités d'analyses quasi-statiques où il existe un comportement non-linéaire.

### A-4-ompléments de modules

- **ABAQUS/CAE** : environnement complet pour la création des modèles, le lancement d'une analyse et le traitement des résultats.

- **ABAQUS/Post** : post-traitement affichage déformée, iso-contours, graphiques...

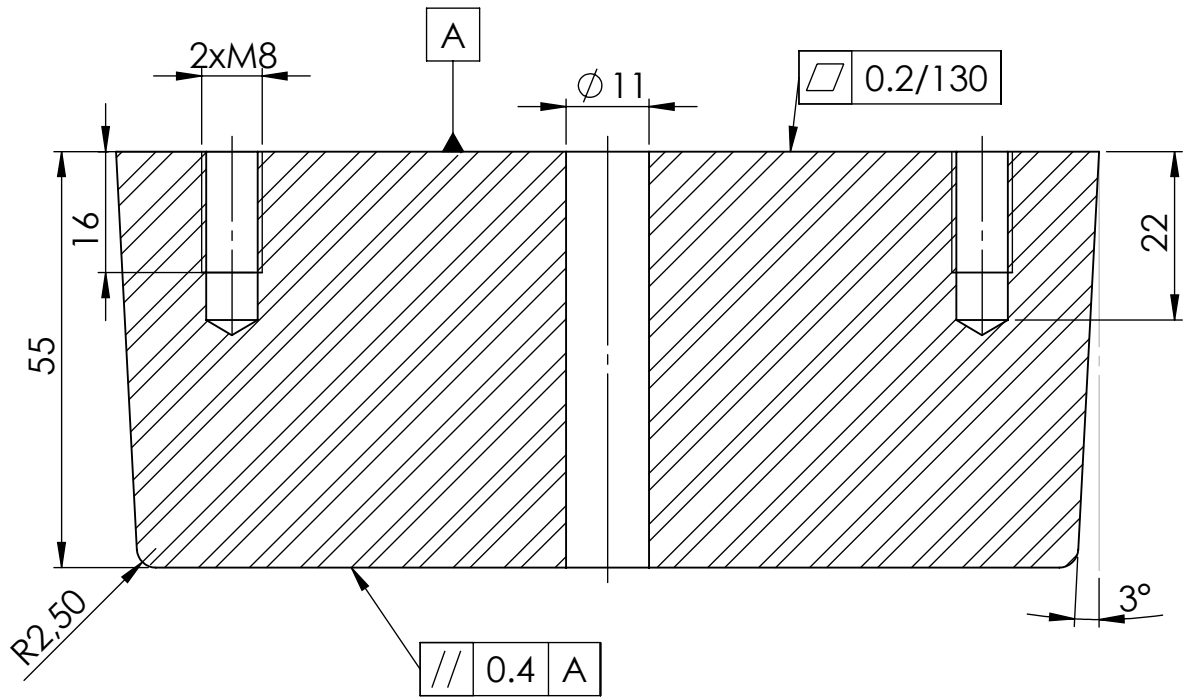
- **ABAQUS/Viewer** : environnement interactif du post-traitement.

- **ABAQUS ABAQUS/Design** : paramétrage des modèles ABAQUS et analyses de sensibilité
- **ABAQUS/Safe** : durée de vie d'une structure.
- **Interfaces** : Catia, I-DEAS, Pro/Engineer. . . ADAMS, C-MOLD, Mold\_ow. . .
- **Informations supplémentaires** : [http : //www.abaqus.com](http://www.abaqus.com).

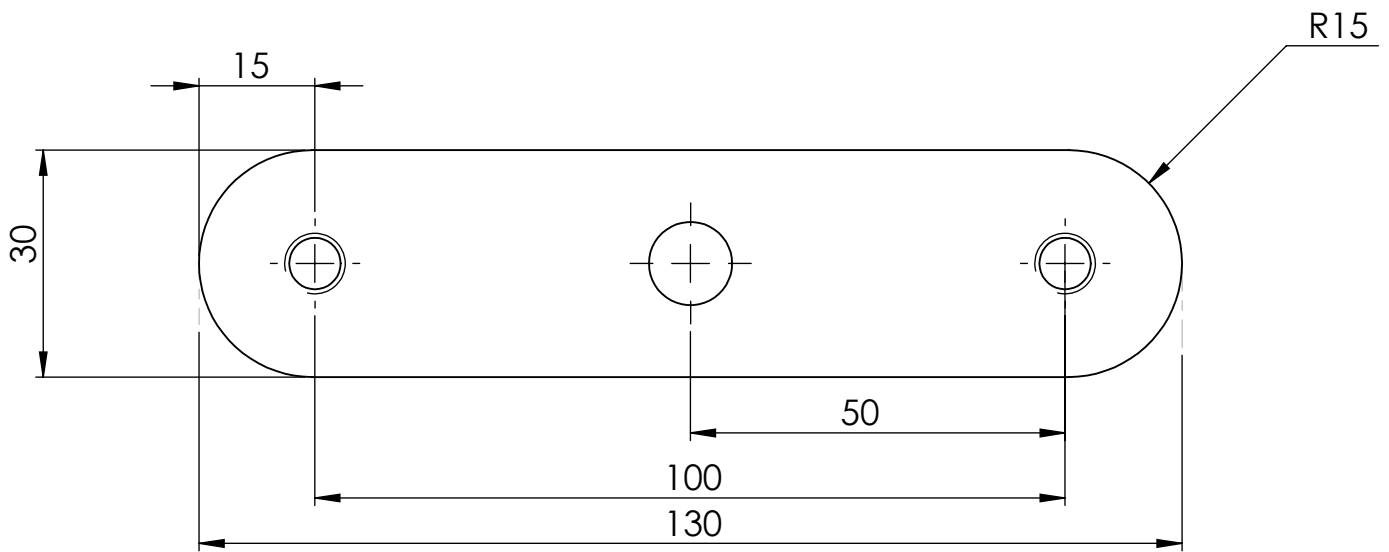
### A-5-Les principaux modules d'Abaqus

- **Le module PART** : Le module Part permet de créer tous les objets géométriques nécessaires à notre problème, soit en les dessinant dans Abaqus CAE, soit en les important d'un logiciel de dessin tiers.
- **Le module PROPERTY** : Le module Property permet, comme son nom l'indique, de définir toutes les propriétés d'un objet géométrique ou d'une partie de ces objets.
- **Le module ASSEMBLY** : Ce module permet d'assembler les différents objets géométriques créés dans un même repère de coordonnées global. Un modèle Abaqus contient un seul assemblage.
- **Le module STEP** : Ce module permet de définir toutes les étapes et les requêtes pour le post traitement, c'est à dire le moment (temps) à partir duquel une force est appliquée et jusqu'à quand, il est aussi possible de créer des forces, ou, des conditions limites qui s'activent à des moments donnés.
- **Le module INTERACTION** : Grâce ce module, il est possible de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, qu'elles soient mécaniques, thermiques ou autres. Il faut savoir qu'Abaqus ne prend en compte que les interactions explicitement définies, la proximité géométrique n'étant pas suffisante.
- **Le module LOAD** : Le module Load permet de spécifier tous les chargements, conditions limites et champs. Il faut savoir que les chargements et les conditions limites sont dépendants des steps, par exemple une force est appliquée au step 1 mais inactive au step 2.
- **Le module MESH** : Ce module contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage élément fini sur un assemblage. Le module « JOB ». Une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, il faut utiliser le module Job pour analyser ce modèle. Abaqus va alors réaliser tous les calculs nécessaires et en tirer des résultats.
- **Le module VISUALIZATION** : Ce module permet de visualiser le modèle et les résultats, les courbes de charges, les déformations. . .

*Mises en plans*



COUPE A-A

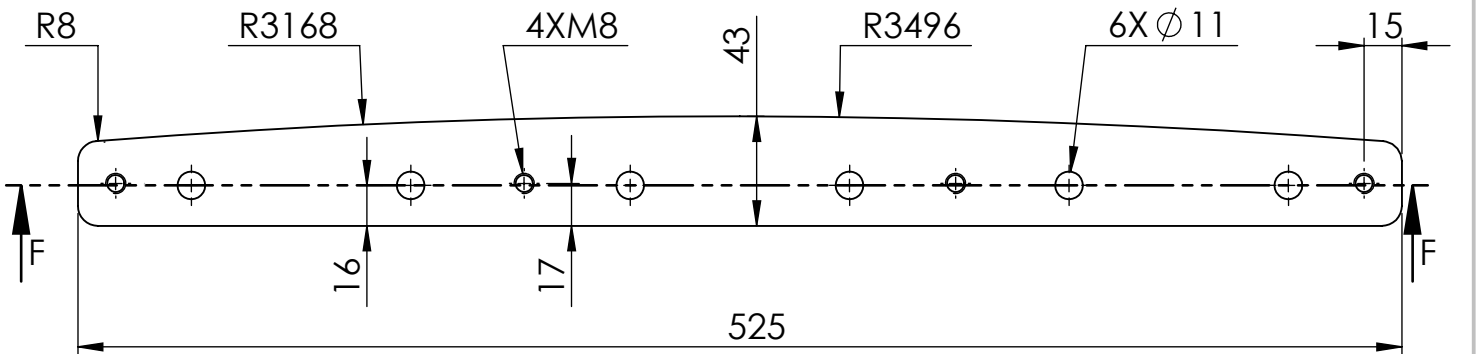
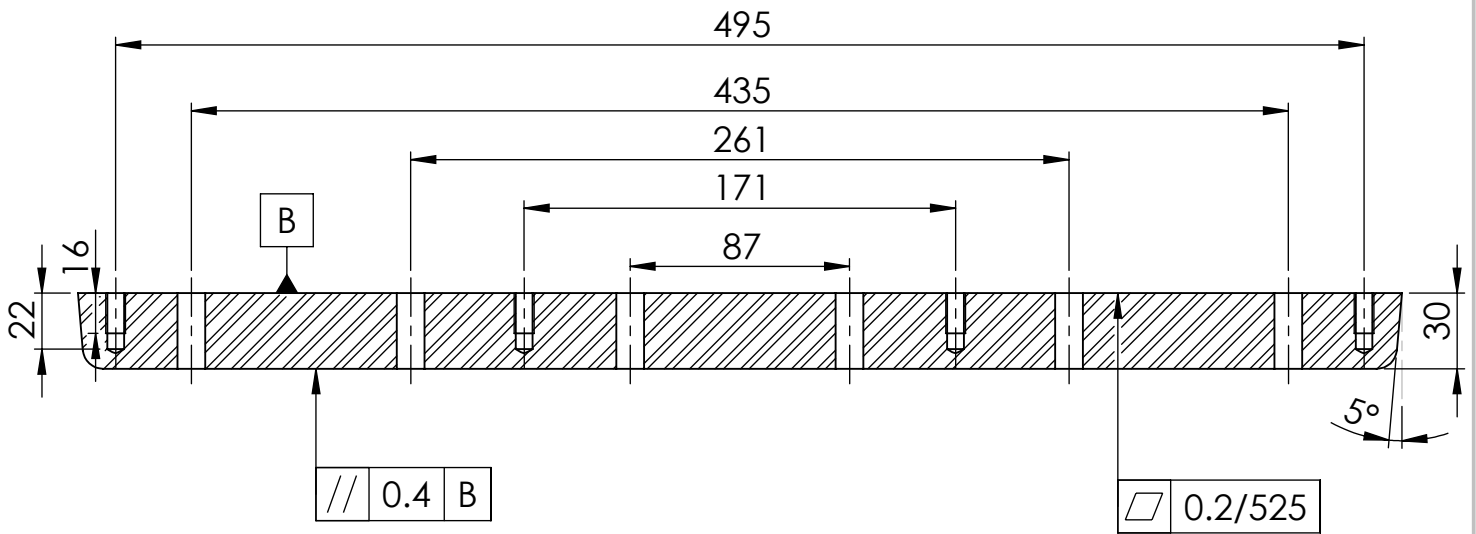


tolérances générales =  $\pm 0.05$

$\sqrt{ra}$  1.6

|                                                                                    |                                                             |                                                     |             |
|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------|
| 01 04                                                                              | Poinçon 1                                                   | Al Mg 5                                             |             |
| RF NB                                                                              | Designation                                                 | MATIERE                                             | Observation |
| ECHELLE<br>1/1                                                                     | MOULE A EXPANSION D'UNE PALETTE<br>POUR REFRIGIRATEUR 350 S | REALISE PAR:<br>AIT GANA LOUNES<br>MEHANI ABDERAHIM |             |
|  |                                                             | 2016/2017                                           |             |
| A4                                                                                 | FGC-GM-UMMTO                                                | MASTER 2                                            |             |

COUPE F-F

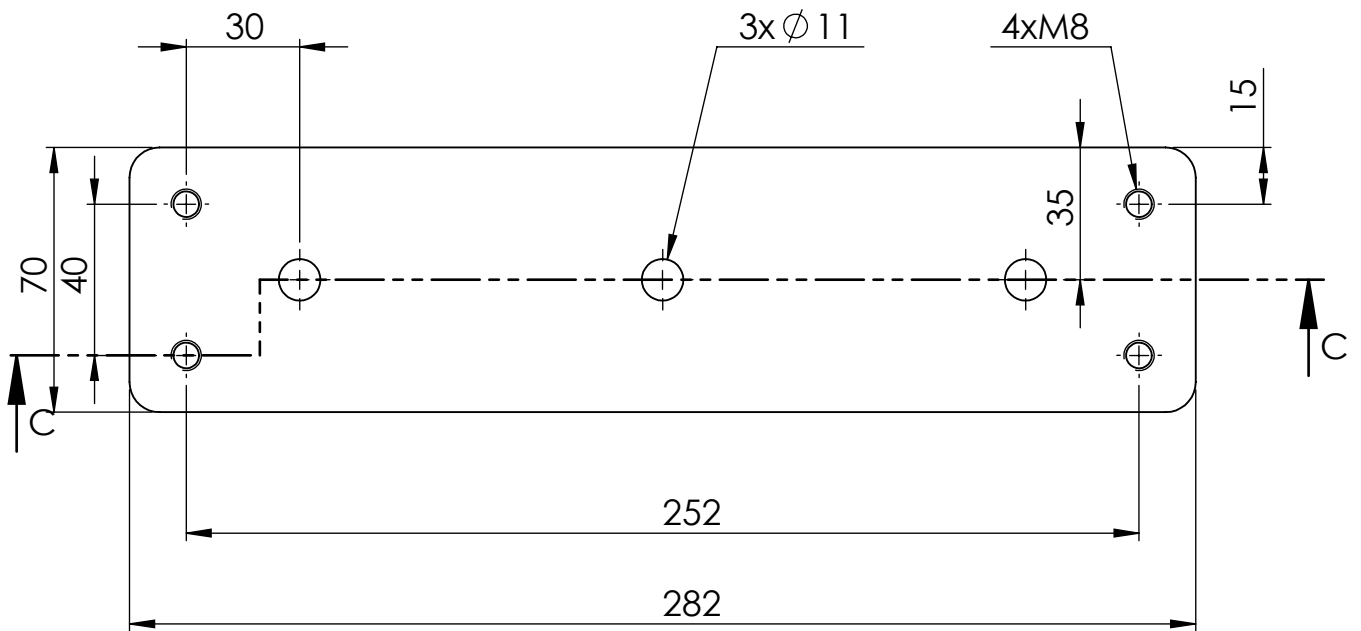
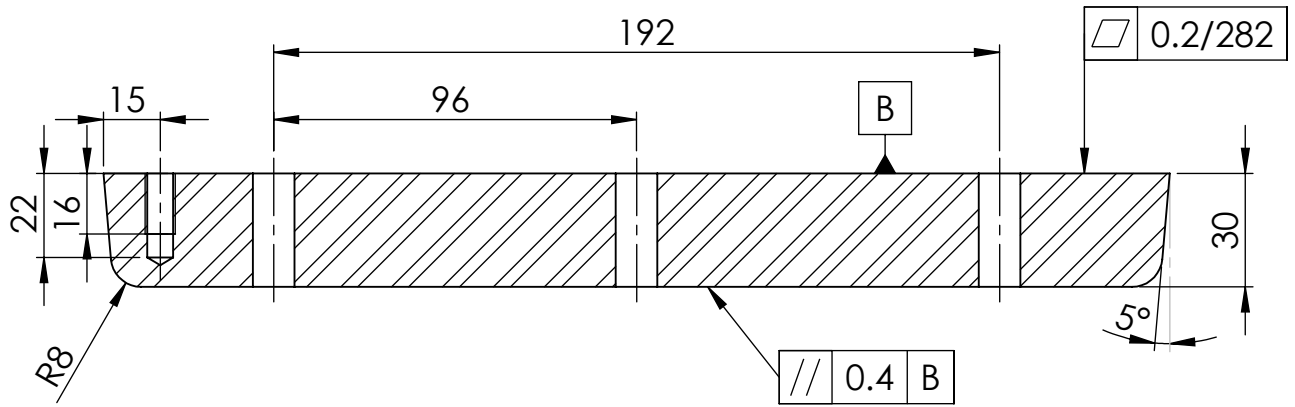


tolérances générales =  $\pm 0.05$

ra 1.6

|                                                                                                          |                                                                 |                                                     |             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------|
| 02 01                                                                                                    | Poinçon 2                                                       | Al Mg 5                                             |             |
| RF NB                                                                                                    | Designation                                                     | MATIERE                                             | Observation |
| ECHELLE<br>1/3<br><br> | MOULE A EXPANSION D' UNE PALETTE<br>POUR UN REFRIGIRATEUR 350 S | REALISE PAR:<br>AIT GANA LOUNES<br>MEHANI ABDERAHIM |             |
|                                                                                                          |                                                                 | 2016/2017                                           |             |
| A4                                                                                                       | FGC-GM-UMMTO                                                    | MASTER 2                                            |             |

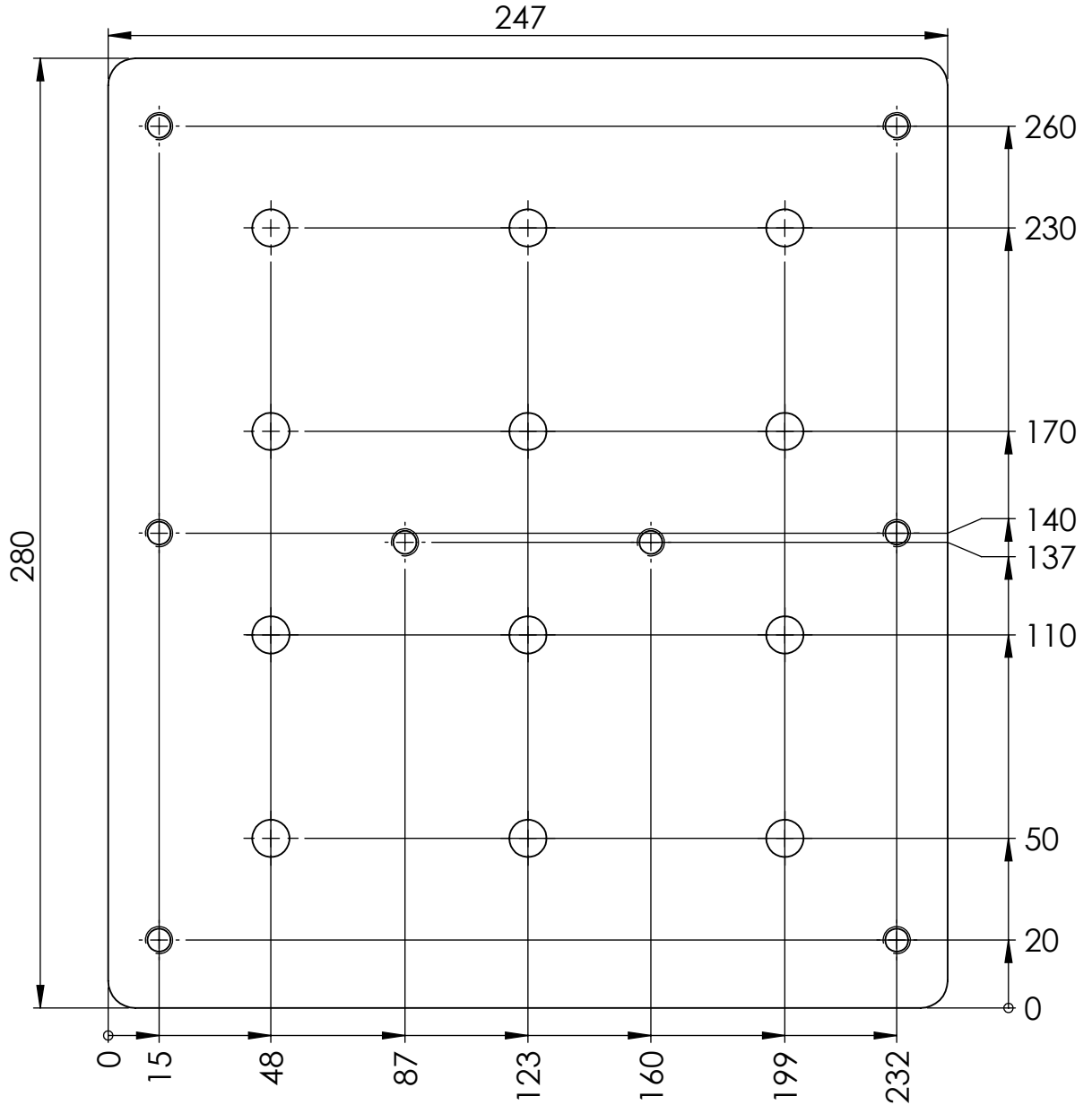
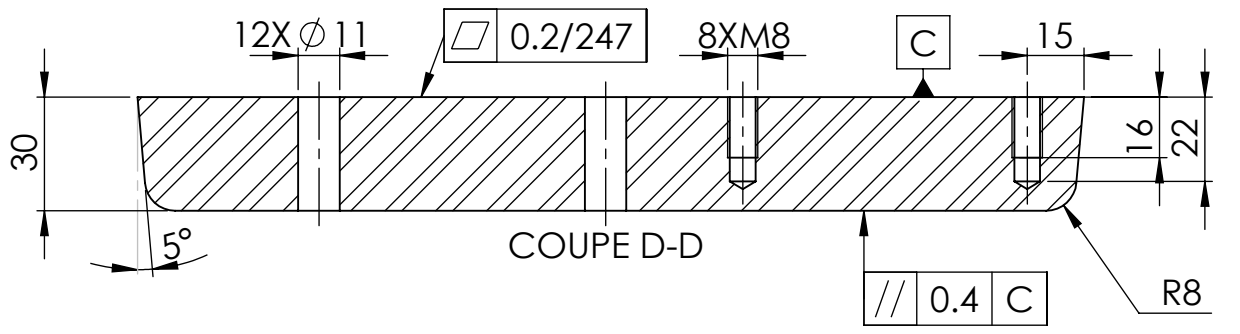
COUPE C-C



tolérances générales =  $\pm 0.05$

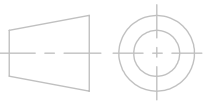
ra 1.6

|                |    |                                                                |         |                                                     |
|----------------|----|----------------------------------------------------------------|---------|-----------------------------------------------------|
| 03             | 02 | Poinçon 3                                                      | Al Mg 5 |                                                     |
| RF             | NB | Designation                                                    | MATIERE | Observation                                         |
| ECHELLE<br>1/2 |    | MOULE A EXPANSION D'UNE PALETTE<br>POUR UN REFRIGIRATEUR 350 S |         | REALISE PAR:<br>AIT GANA LOUNES<br>MEHANI ABDERAHIM |
| A4             |    | FGC-GM-UMMTO                                                   |         | 2016/2017<br>MASTER 2                               |

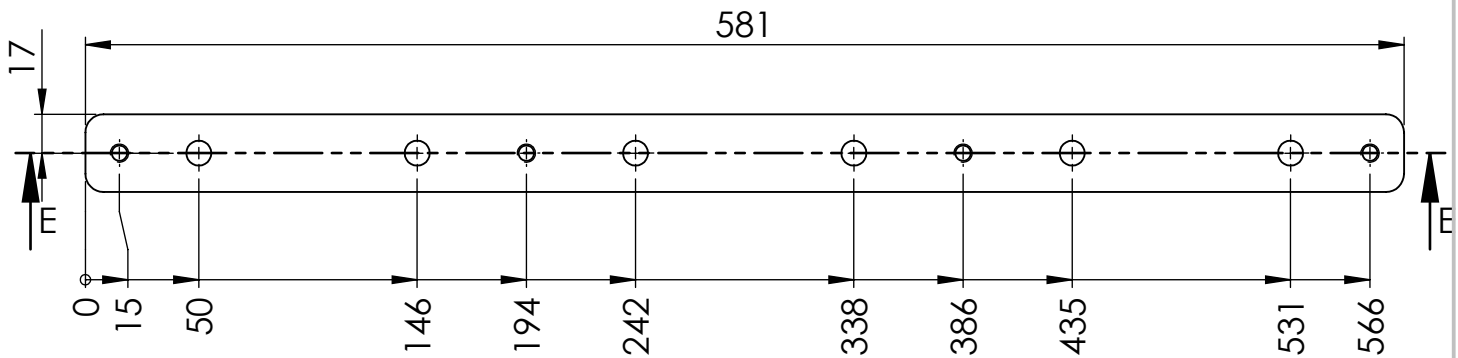
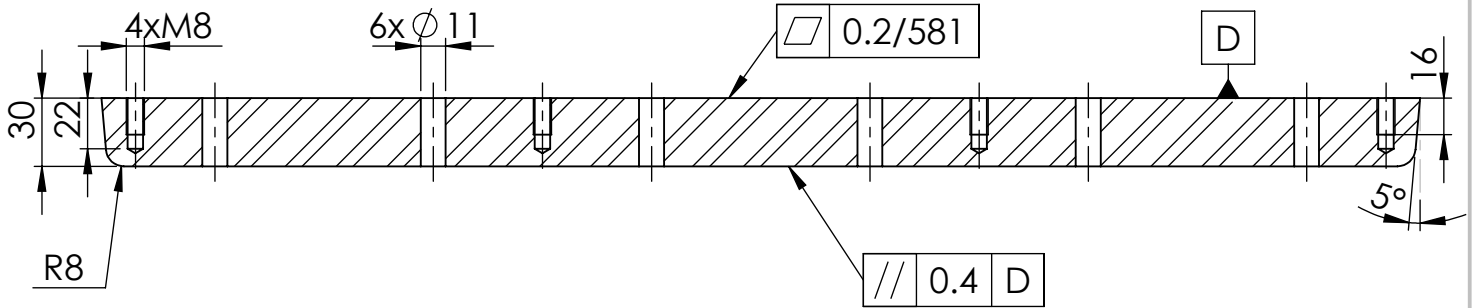


tolérances générales = ±0.1

ra 1.6

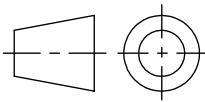
|                                                                                    |    |                                                                |                                                     |             |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------|
| 04                                                                                 | 02 | poinçon 4                                                      | Al Mg 5                                             |             |
| RF                                                                                 | NB | Designation                                                    | MATIERE                                             | Observation |
| ECHELLE<br>1/2                                                                     |    | MOULE A EXPANSION D'UNE PALETTE<br>POUR UN REFRIGIRATEUR 350 S | REALISE PAR:<br>AIT GANA LOUNES<br>MEHANI ABDERAHIM |             |
|  |    |                                                                | 2016/2017                                           |             |
| A4                                                                                 |    | FGC-GM-UMMTO                                                   | MASTER 2                                            |             |

COUPE E-E

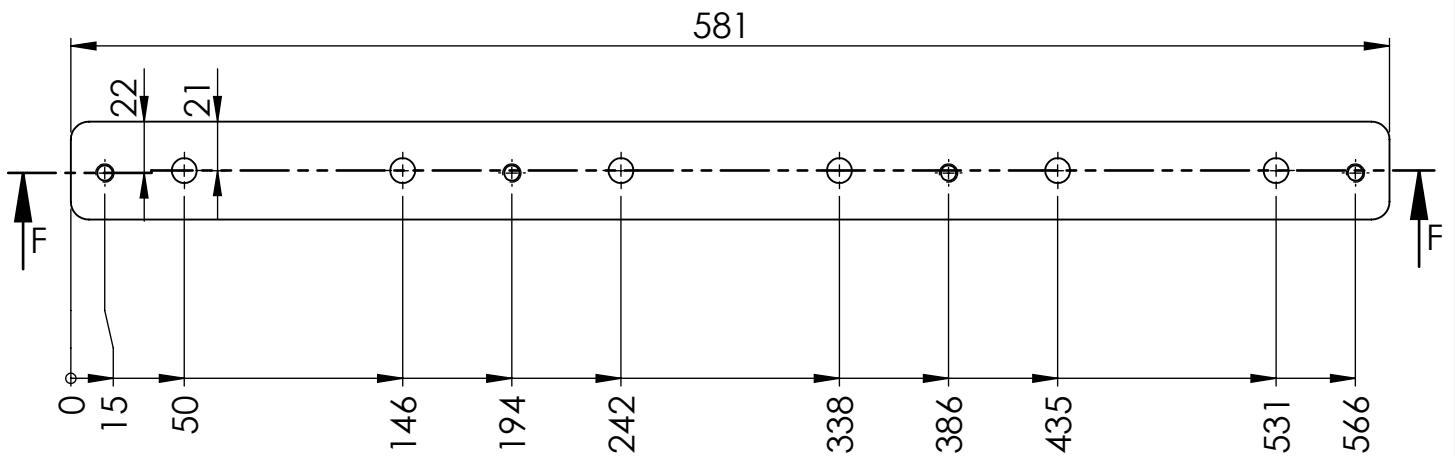
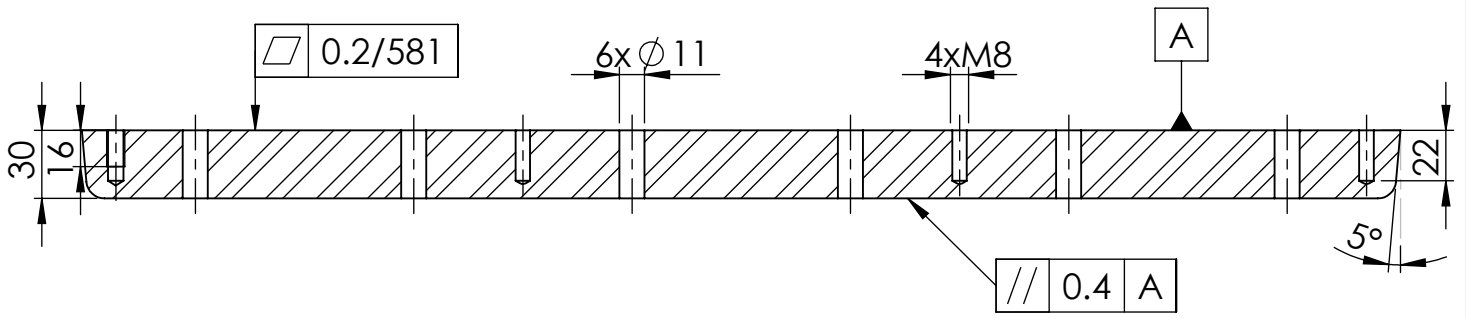


tolérances générales =  $\pm 0.05$

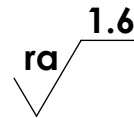
ra 1.6

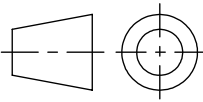
|                                                                                    |    |                                                                |                                                     |             |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------|
| 05                                                                                 | 01 | poinçon 5                                                      | Al Mg 5                                             |             |
| RF                                                                                 | NB | Designation                                                    | MATIERE                                             | Observation |
| ECHELLE<br>3:10                                                                    |    | MOULE A EXPANSION D'UNE PALETTE<br>POUR UN REFRIGIRATEUR 350 S | REALISE PAR:<br>AIT GANA LOUNES<br>MEHANI ABDERAHIM |             |
|  |    |                                                                | 2016/2017                                           |             |
| A4                                                                                 |    | FGC-GM-UMMTO                                                   | MASTER 2                                            |             |

COUPE F-F

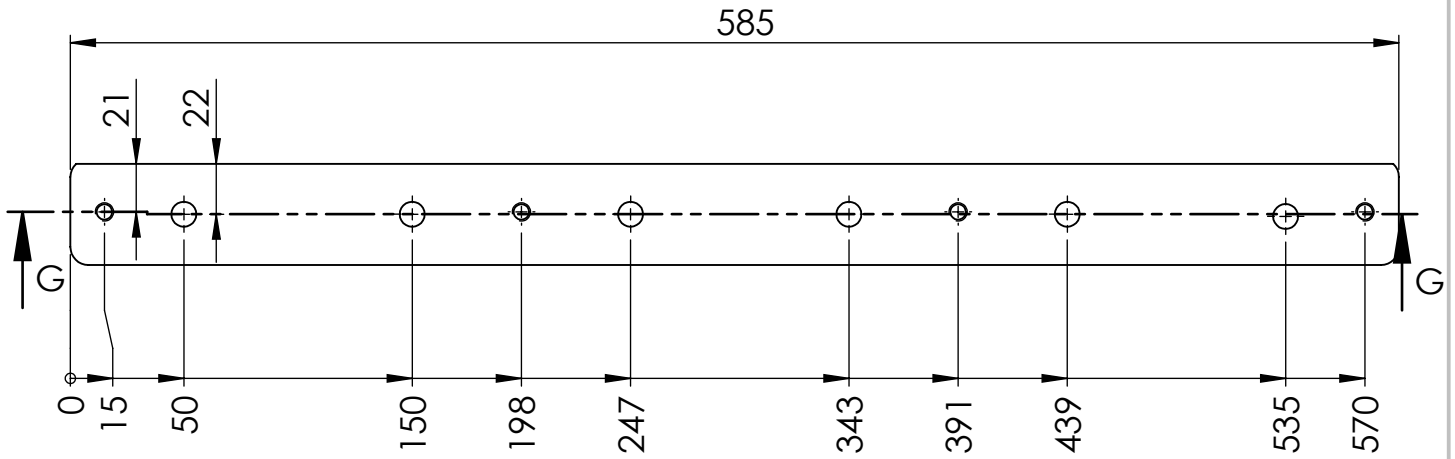
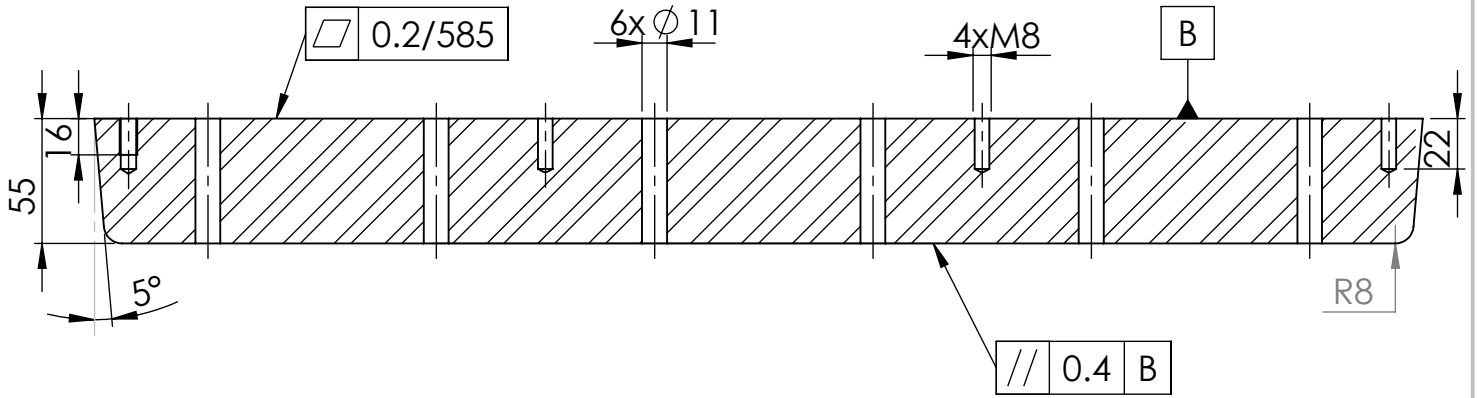


tolérances générales =  $\pm 0.05$



|                                                                                    |    |                                                                 |                                                     |             |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------|
| 06                                                                                 | 01 | Poinçon 6                                                       | Al Mg 5                                             |             |
| RF                                                                                 | NB | Designation                                                     | MATIERE                                             | Observation |
| ECHELLE<br>3:10                                                                    |    | MOULE A EXPANSION D' UNE PALETTE<br>POUR UN REFRIGIRATEUR 350 S | REALISE PAR:<br>AIT GANA LOUNES<br>MEHANI ABDERAHIM |             |
|  |    |                                                                 | 2016/2017                                           |             |
| A4                                                                                 |    | FGC-GM-UMMTO                                                    | MASTER 2                                            |             |

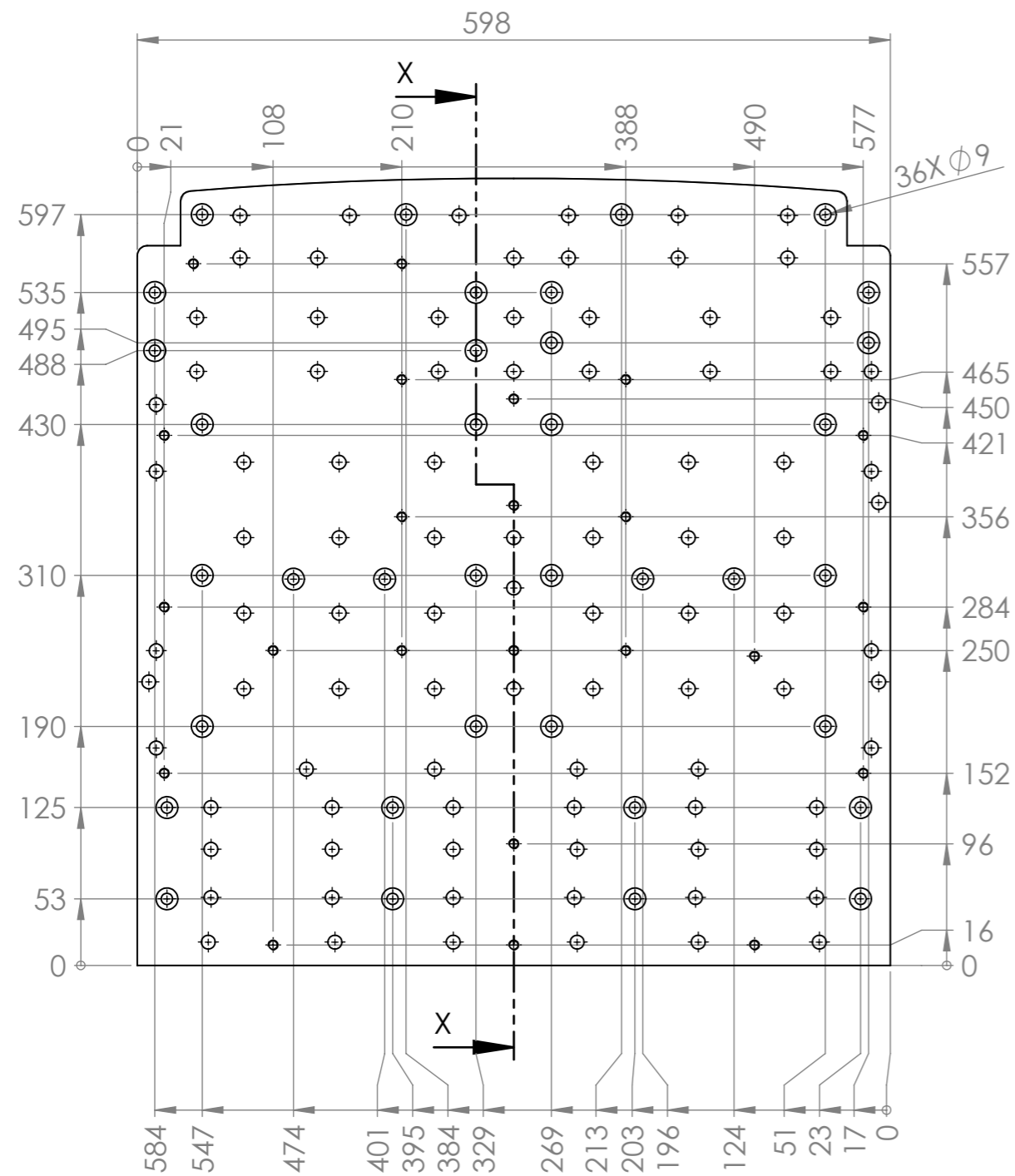
COUPE G-G



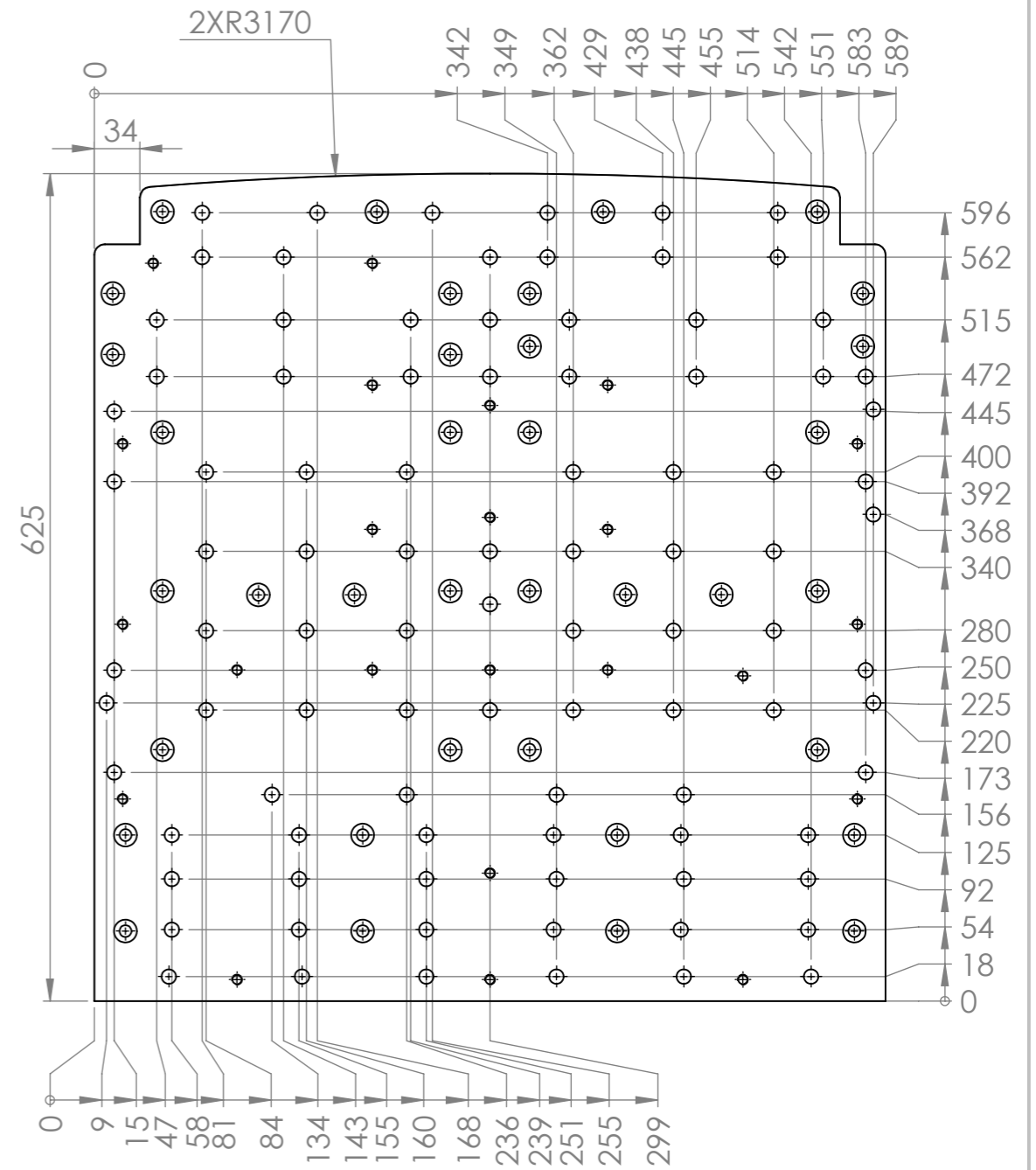
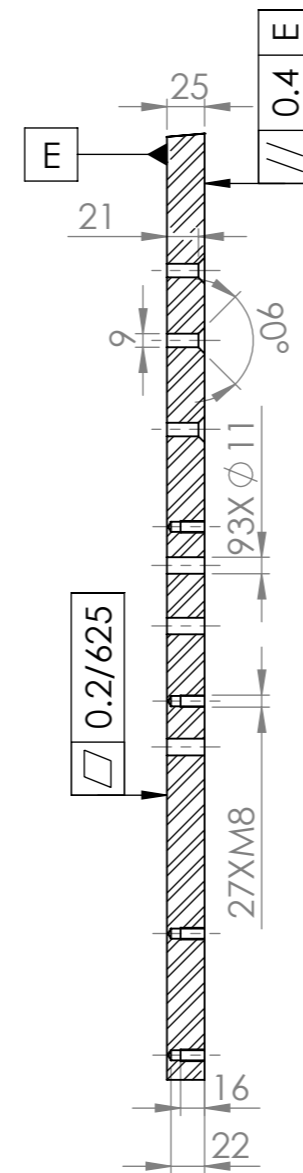
tolérances générales =  $\pm 0.05$

$ra \sqrt{1.6}$

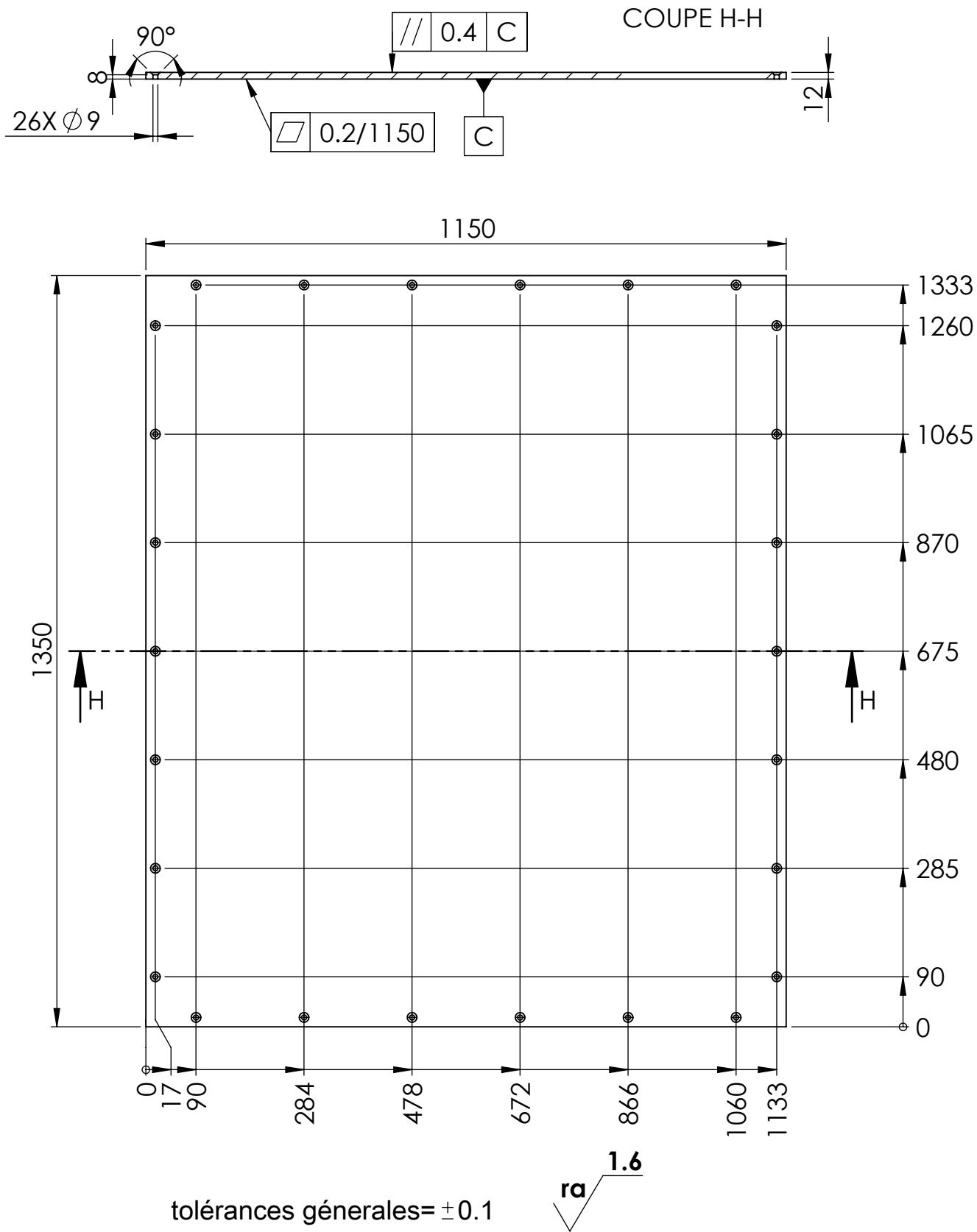
|                 |    |                                                                               |         |                                                     |
|-----------------|----|-------------------------------------------------------------------------------|---------|-----------------------------------------------------|
| 07              | 01 | Poinçon 7                                                                     | Al Mg 5 |                                                     |
| RF              | NB | Designation                                                                   | MATIERE | Observation                                         |
| ECHELLE<br>3:10 |    | MOULE A EXPANSION D'UNE PALETTE<br>A AMBALLAGE POUR UN REFRIGERATEUR<br>350 S |         | REALISE PAR:<br>AIT GANA LOUNES<br>MEHANI ABDERAHIM |
| A4              |    | FGC-GM-UMMTO                                                                  |         | 2016/2017                                           |
|                 |    |                                                                               |         | MASTER 2                                            |



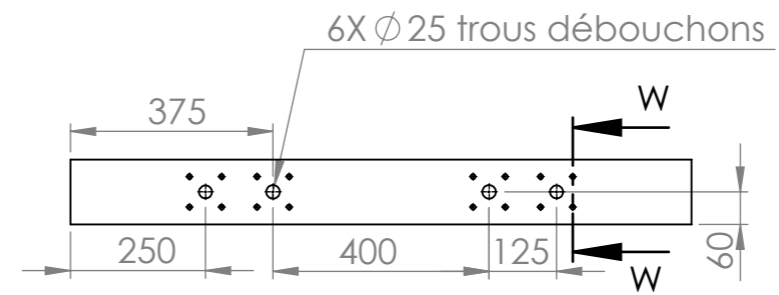
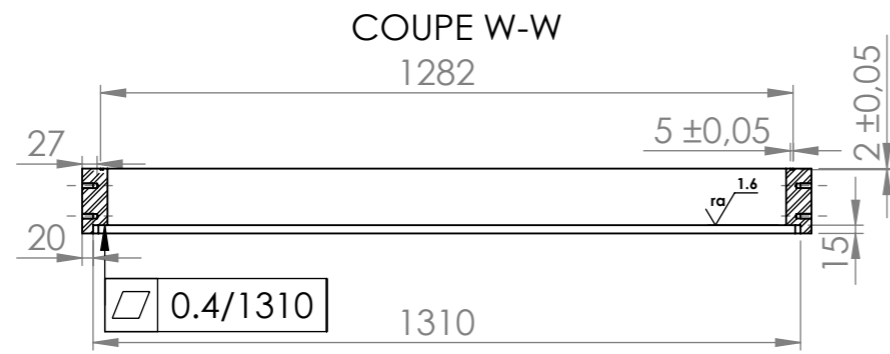
COUPE X-X



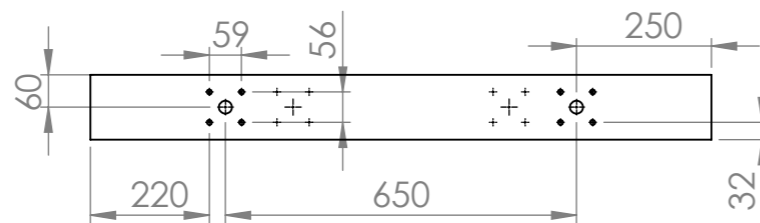
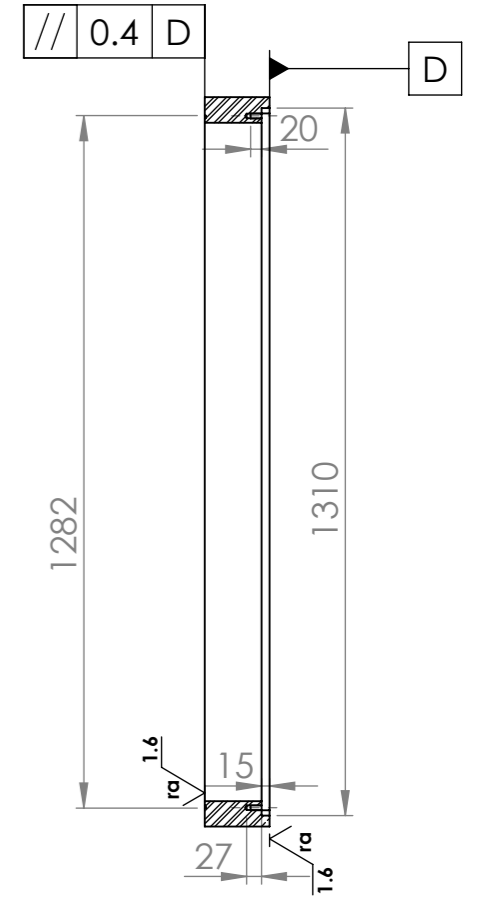
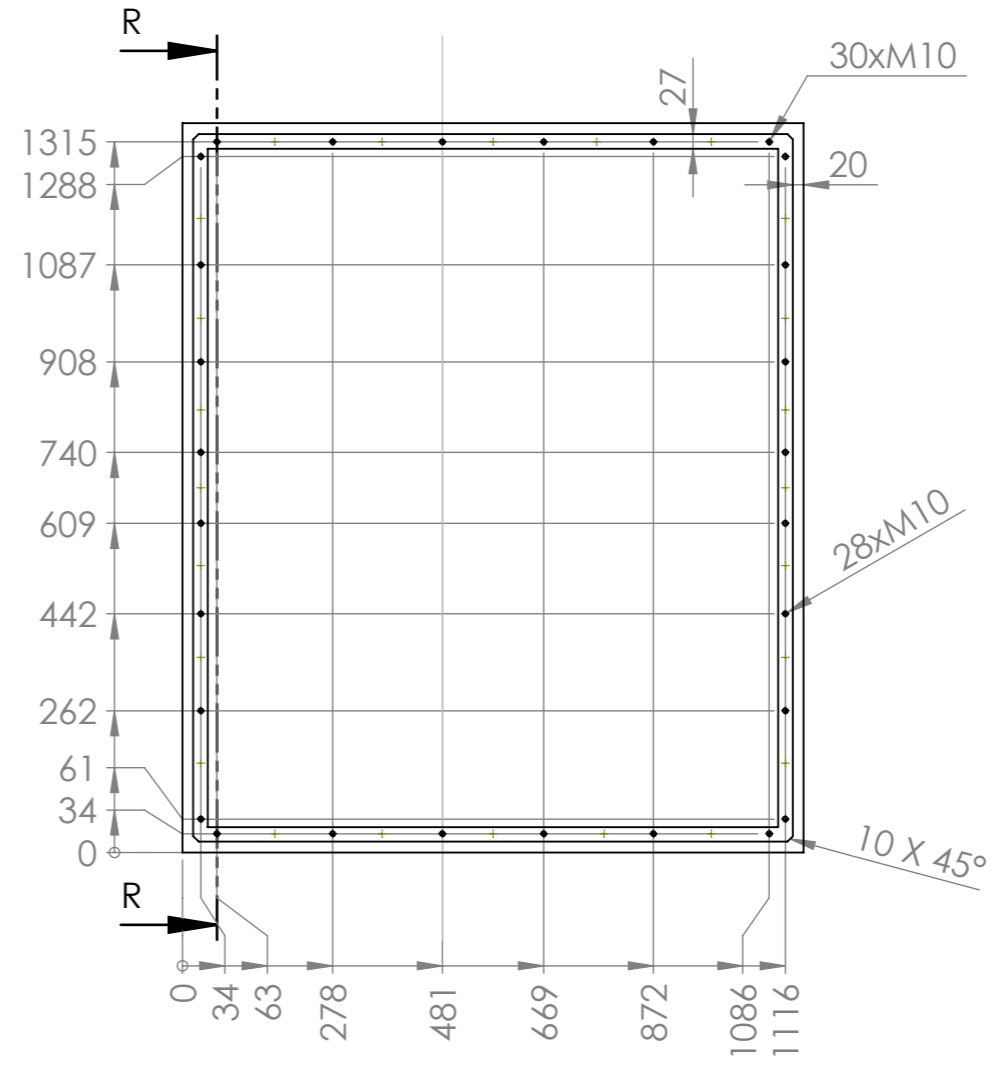
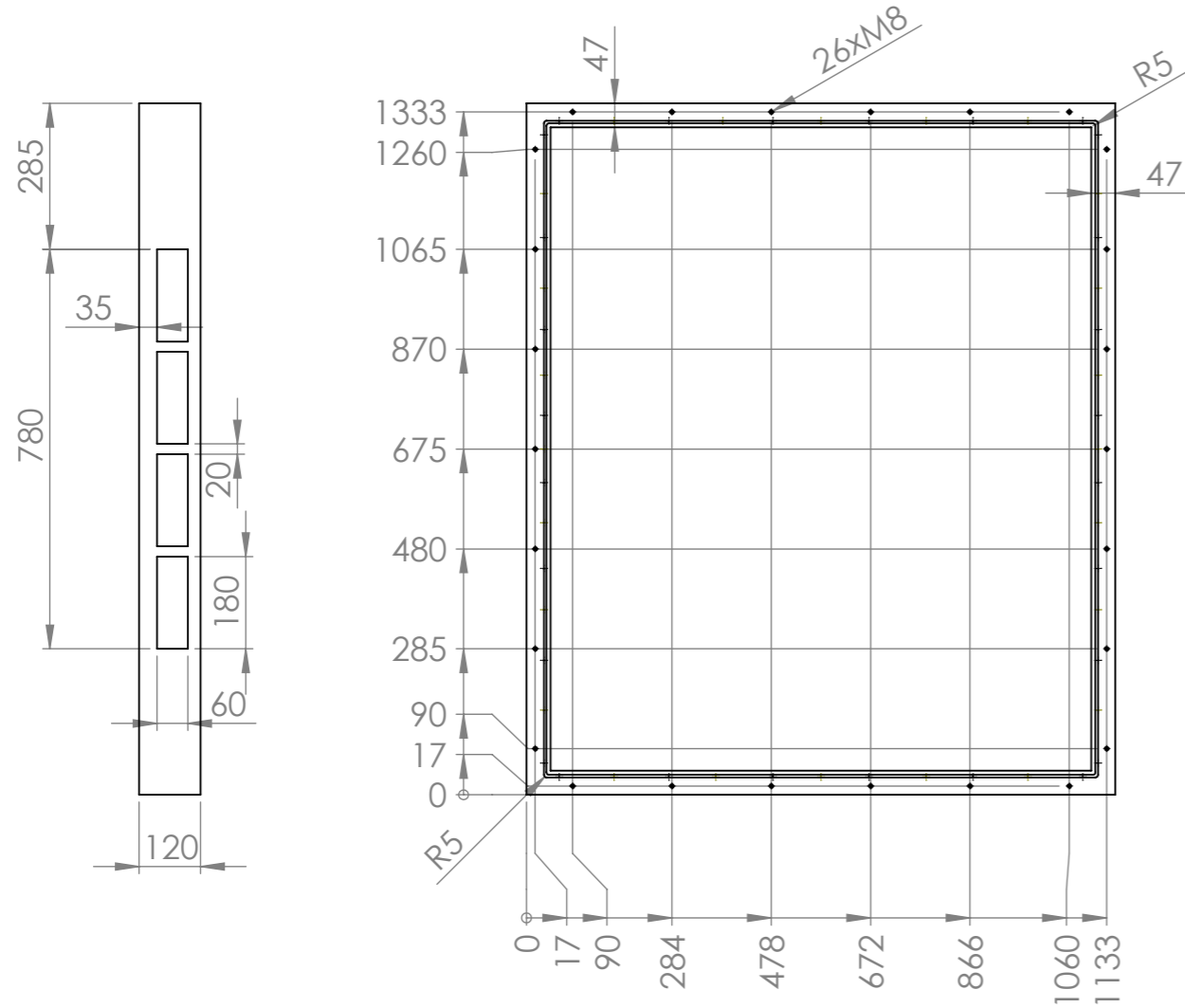
|                |    |                                                                 |                                                     |             |
|----------------|----|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------|
| 08             | 01 | plaque secondaire                                               | Al Mg 5                                             |             |
| RF             | NB | DESIGNATION                                                     | MATIERE                                             | OBSERVATION |
| ECHELLE<br>1/5 |    | MOULE A EXPANSION D' UNE PALETTE<br>POUR UN REFRIGIRATEUR 350 S | REALISE PAR:<br>AIT GANA LOUNES<br>MEHANI ABDERAHIM |             |
| A3             |    |                                                                 | 2016-2017                                           |             |
|                |    | FGC-GM-UMMTO                                                    | MASTER 2                                            |             |



|                 |                                                                |                              |         |                                                     |
|-----------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------|---------|-----------------------------------------------------|
| 14              | 01                                                             | PLAQUE ARRIERE PARTIE MOBILE | Al Mg 5 |                                                     |
| RF NB           |                                                                | Designation                  | MATIERE | Observation                                         |
| ECHELLE<br>1:10 | MOULE A EXPANSION D'UNE PALETTE<br>POUR UN REFRIGERATEUR 350 s |                              |         | REALISE PAR:<br>AIT GANA LOUNES<br>MEHANI ABDERAHIM |
|                 |                                                                |                              |         | 2016/2017                                           |
| A4              | FGC-GM-UMMTO                                                   |                              |         | MASTER 2                                            |



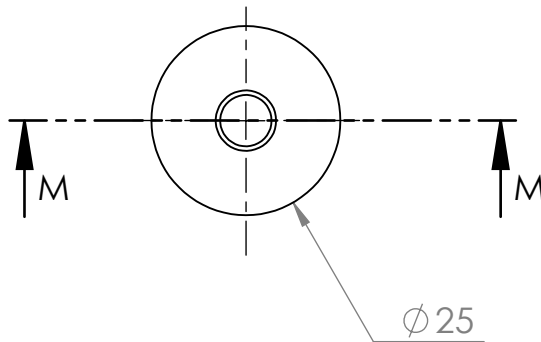
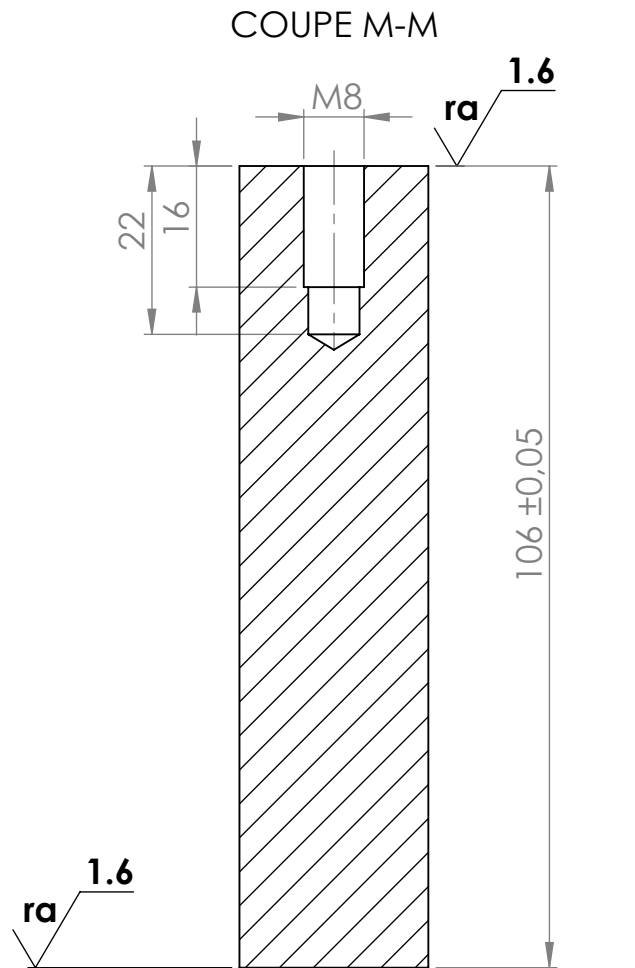
COUPE R-R



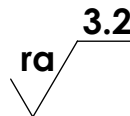
tolérances générales = ±0.1  
sauf indications

ra 3.2

|                 |    |                                                                 |         |                                                     |
|-----------------|----|-----------------------------------------------------------------|---------|-----------------------------------------------------|
| 11              | 01 | cadre partie mobile                                             | Al Mg 5 |                                                     |
| RF              | NB | DESIGNATION                                                     | MATIERE | OBSERVATION                                         |
| ECHELLE<br>1/14 |    | MOULE A EXPANSION D' UNE PALETTE<br>POUR UN REFRIGIRATEUR 350 S |         | REALISE PAR:<br>AIT GANA LOUNES<br>MEHANI ABDERAHIM |
| A3              |    |                                                                 |         | FGC-GM-UMMTO                                        |
|                 |    |                                                                 |         | MASTER 2                                            |

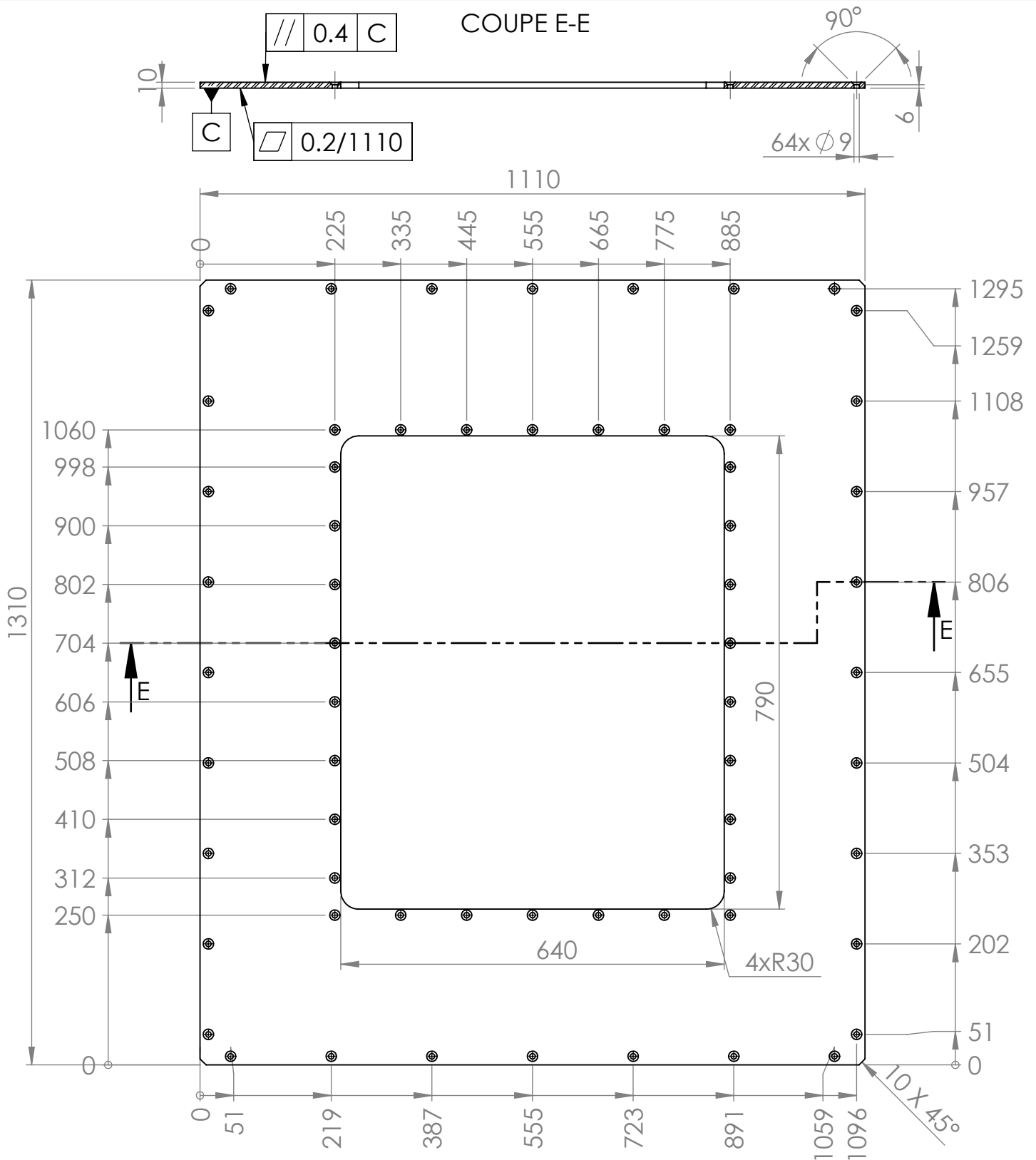


tolérances générales = ± 0.1  
sauf indications



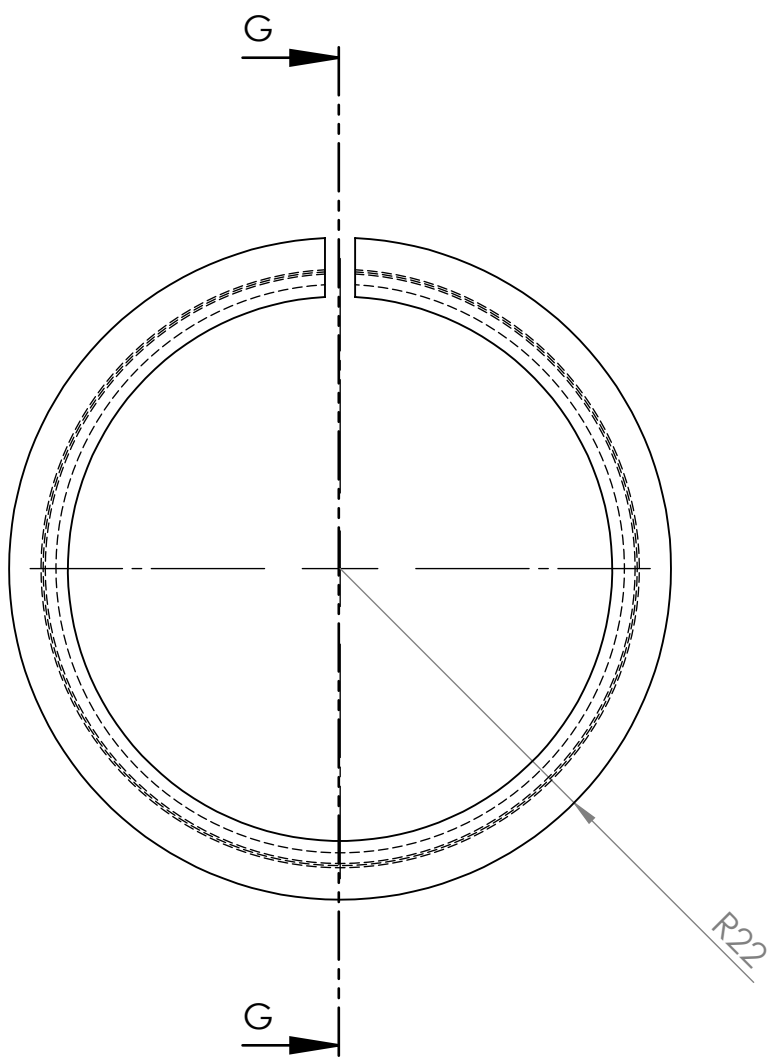
|                |    |                                                                |                                                     |             |
|----------------|----|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------|
| 15             | 12 | TASSEAU PARTIE MOBILE                                          | Al Mg 5                                             |             |
| RF             | NB | Designation                                                    | MATIERE                                             | Observation |
| ECHELLE<br>1/1 |    | MOULE A EXPANSION D'UNE PALETTE<br>POUR UN REFRIGIRATEUR 350 S | REALISE PAR:<br>AIT GANA LOUNES<br>MEHANI ABDERAHIM |             |
|                |    |                                                                | 2016/2017                                           |             |
| A4             |    | FGC-GM-UMMTO                                                   | MASTER 2                                            |             |

COUPE E-E

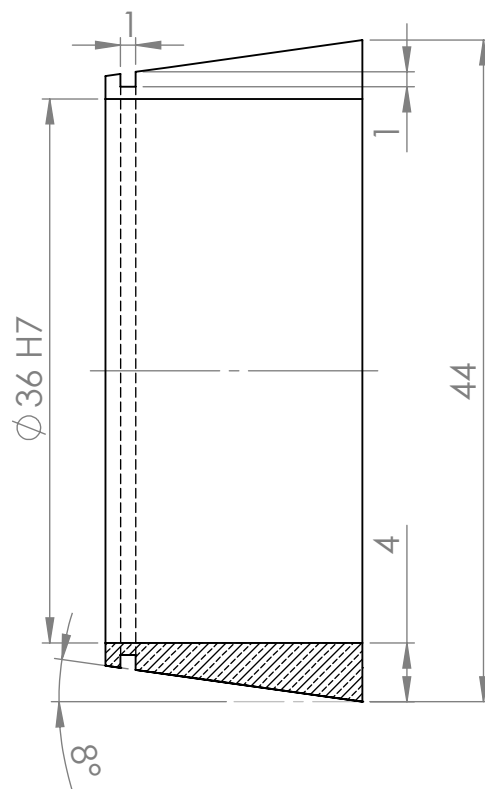


tolérances générales =  $\pm 0.1 \sqrt{ra}^{1.6}$

|                                                                                    |    |                                                                 |                                                     |             |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------|
| 18                                                                                 | 01 | PLAQUE PORTE EMPREINTE PARTIE FIXE                              | Al Mg 5                                             |             |
| RF                                                                                 | NB | Designation                                                     | MATIERE                                             | Observation |
| ECHELLE<br>1/9                                                                     |    | MOULE A EXPANSION D' UNE PALETTE<br>POUR UN REFRIGIRATEUR 350 S | REALISE PAR:<br>AIT GANA LOUNES<br>MEHANI ABDERAHIM |             |
|  |    |                                                                 | 2016/2017                                           |             |
| A4                                                                                 |    | FGC-GM-UMMTO                                                    | MASTER 2                                            |             |

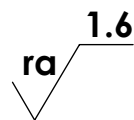


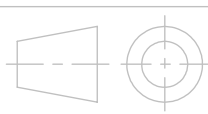
COUPE G-G



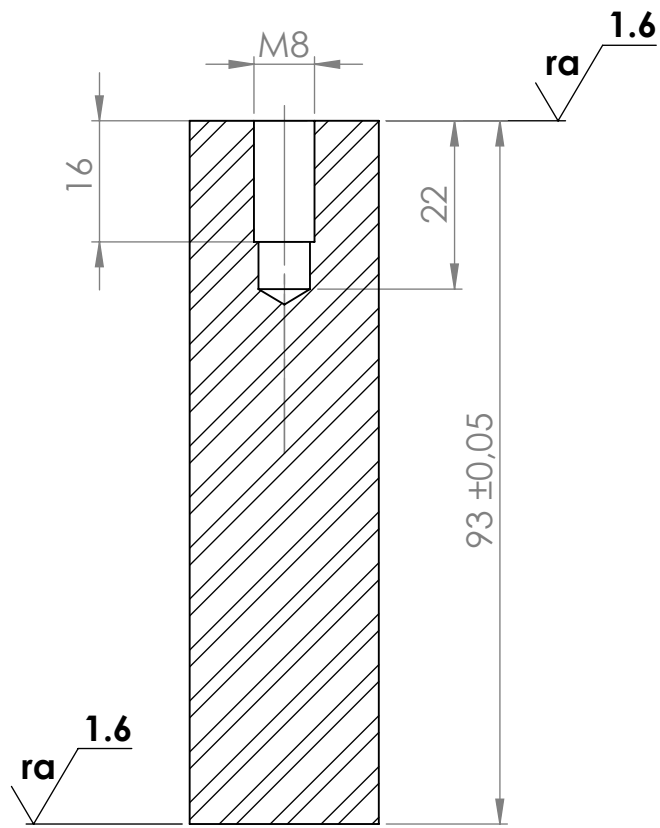
tolérances générales =  $\pm 0.1$

sauf indications

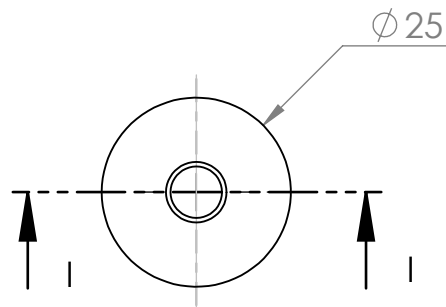


|                                                                                    |    |                                                                 |                                                     |             |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------|
| 20                                                                                 | 16 | BAGUE                                                           | BRONZE                                              |             |
| RF                                                                                 | NB | Designation                                                     | MATIERE                                             | Observation |
| ECHELLE<br>2/1                                                                     |    | MOULE A EXPANSION D' UNE PALETTE<br>POUR UN REFRIGIRATEUR 350 S | REALISE PAR:<br>AIT GANA LOUNES<br>MEHANI ABDERAHIM |             |
|  |    |                                                                 | 2016/2017                                           |             |
| A4                                                                                 |    | FGC-GM-UMMTO                                                    | MASTER 2                                            |             |

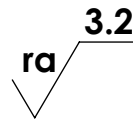




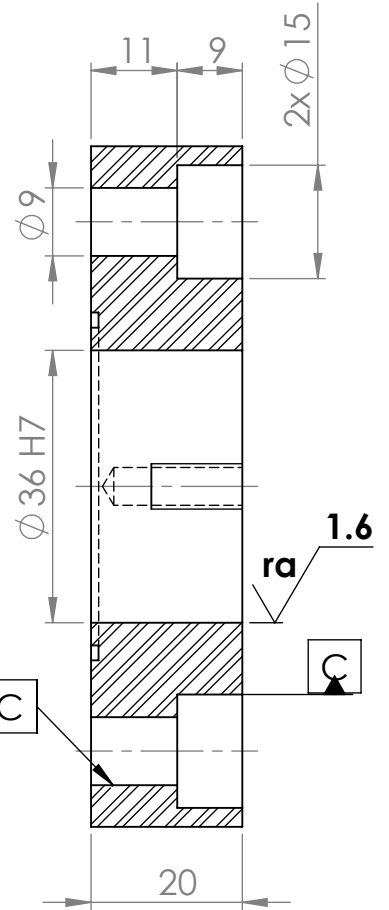
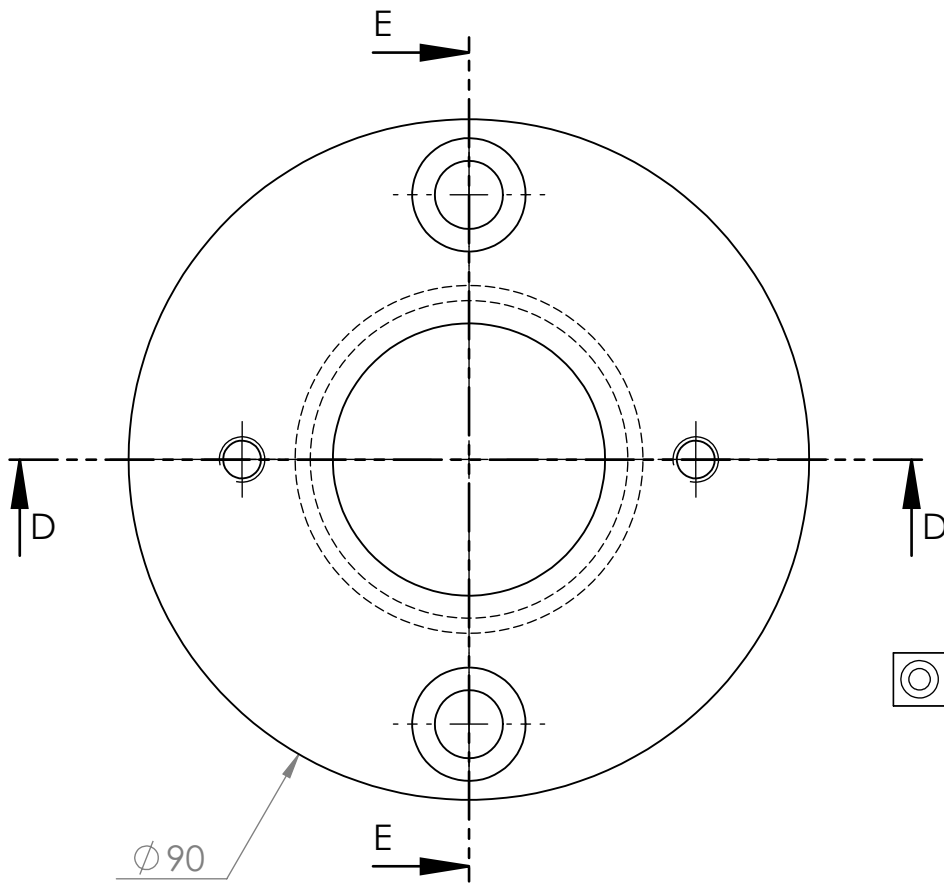
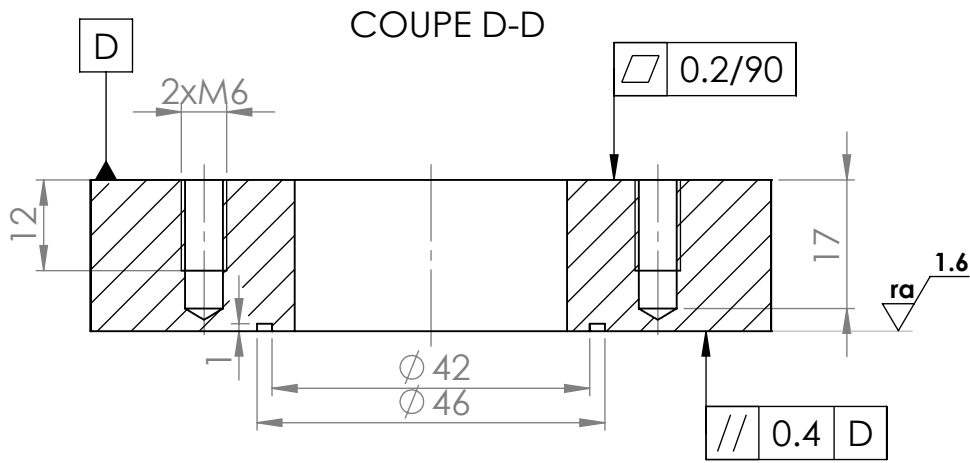
COUPE I-I



tolérances générales=0.1  
sauf indications



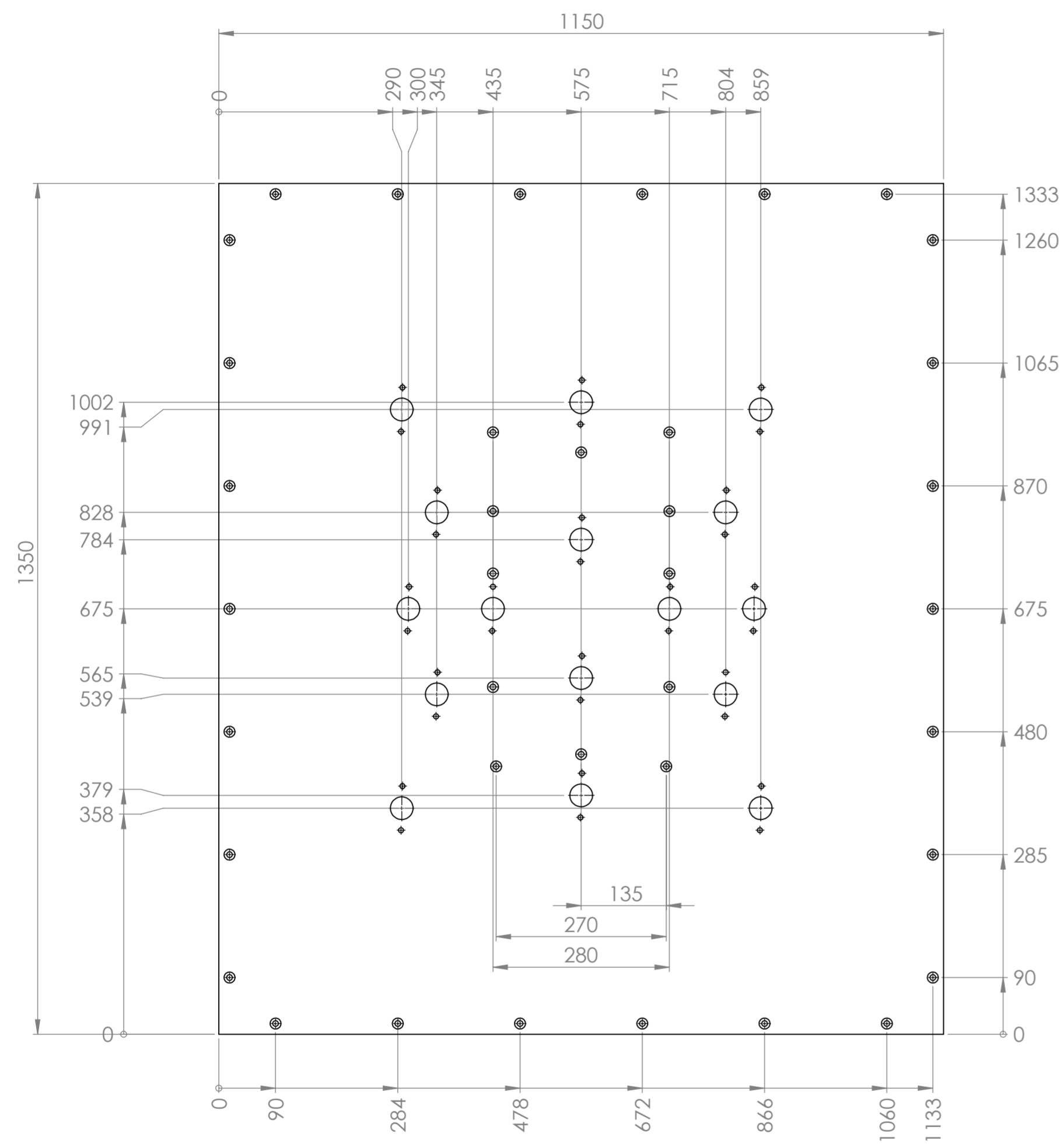
|                                                                                    |    |                                                                 |                                                     |             |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------|
| 23                                                                                 | 17 | TASSEaux PARTIE FIXE                                            | Al Mg 5                                             |             |
| RF                                                                                 | NB | Designation                                                     | MATIERE                                             | Observation |
| ECHELLE<br>1/1                                                                     |    | MOULE A EXPANSION D' UNE PALETTE<br>POUR UN REFRIGIRATEUR 350 S | REALISE PAR:<br>AIT GANA LOUNES<br>MEHANI ABDERAHIM |             |
|  |    |                                                                 | 2016/2017                                           |             |
| A4                                                                                 |    | FGC-GM-UMMTO                                                    | MASTER 2                                            |             |



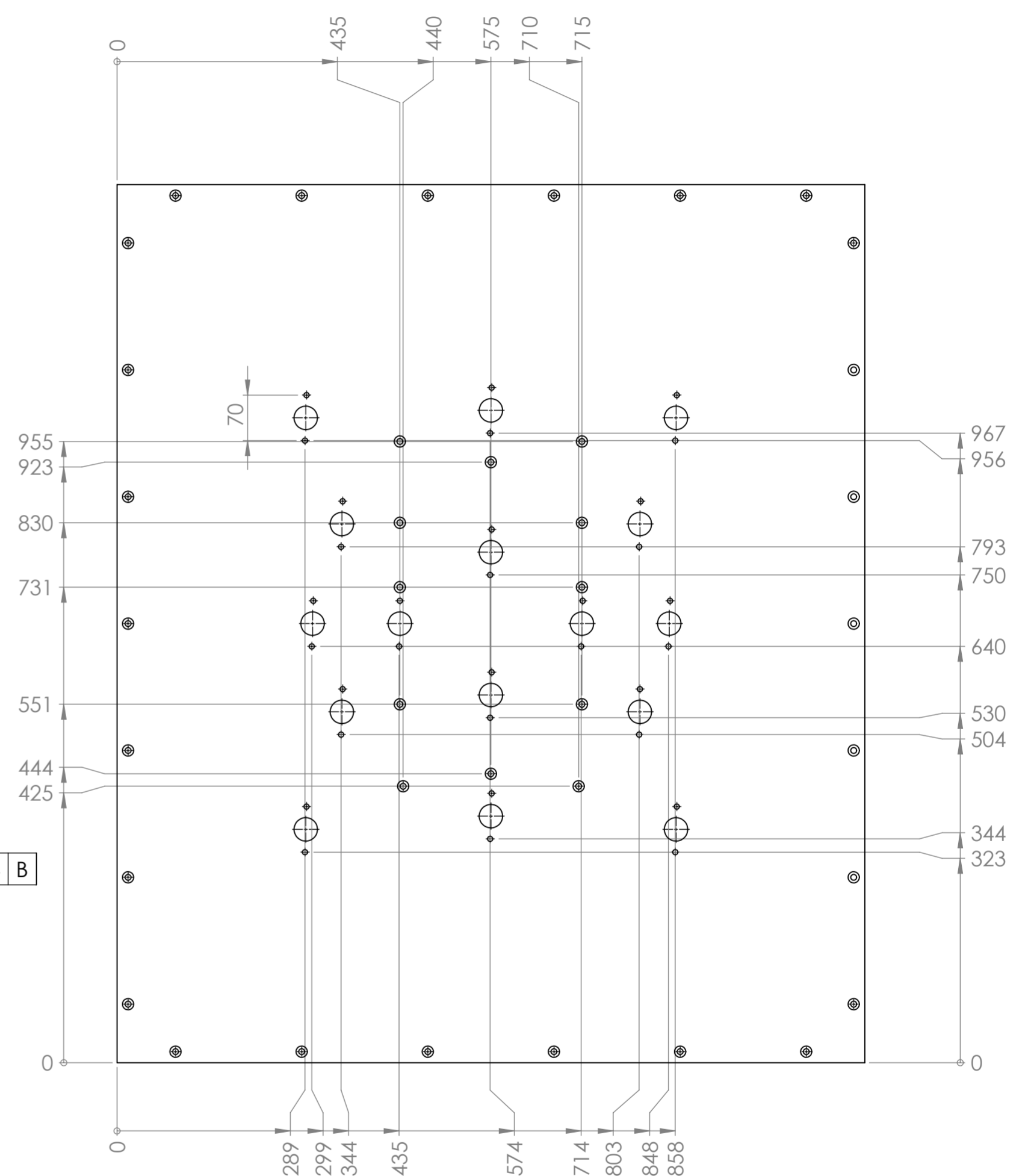
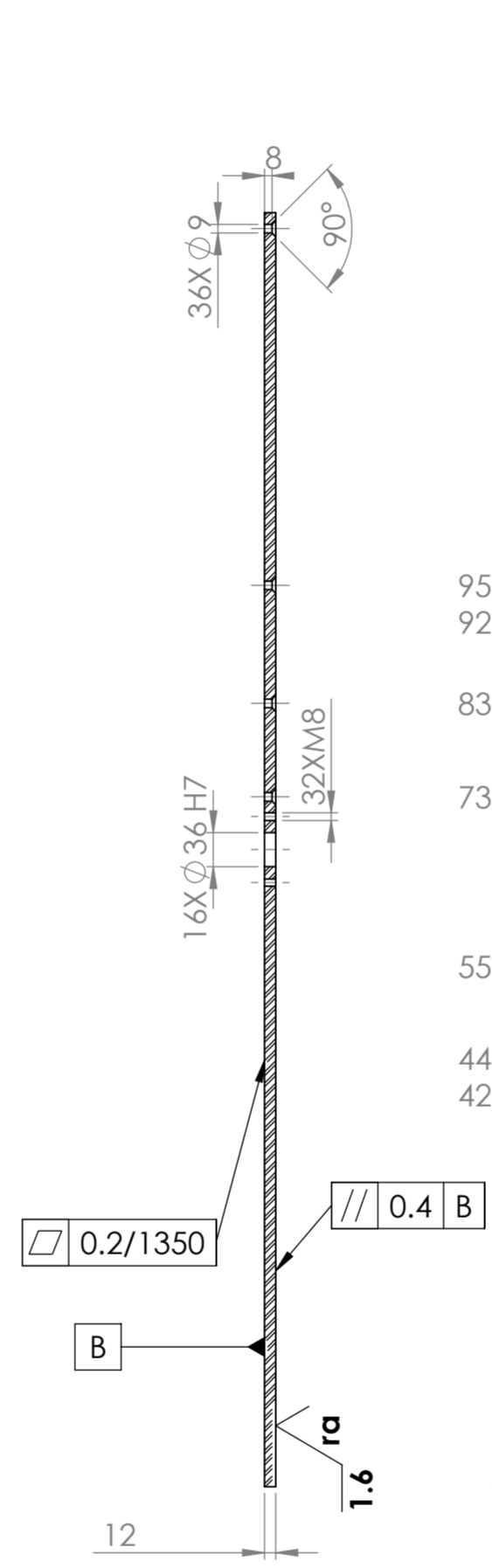
tolérances générales =  $\pm 0.1$   
sauf indications

$ra$  3.2

|                |    |                                                                 |                                                     |             |
|----------------|----|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------|
| 24             | 16 | BAGUE DE CENTRAGE                                               | BRONZE                                              |             |
| RF             | NB | Designation                                                     | MATIERE                                             | Observation |
| ECHELLE<br>1/1 |    | MOULE A EXPANSION D' UNE PALETTE<br>POUR UN REFRIGIRATEUR 350 S | REALISE PAR:<br>AIT GANA LOUNES<br>MEHANI ABDERAHIM |             |
| A4             |    |                                                                 | 2016/2017                                           |             |
|                |    | FGC-GM-UMMTO                                                    | MASTER 2                                            |             |

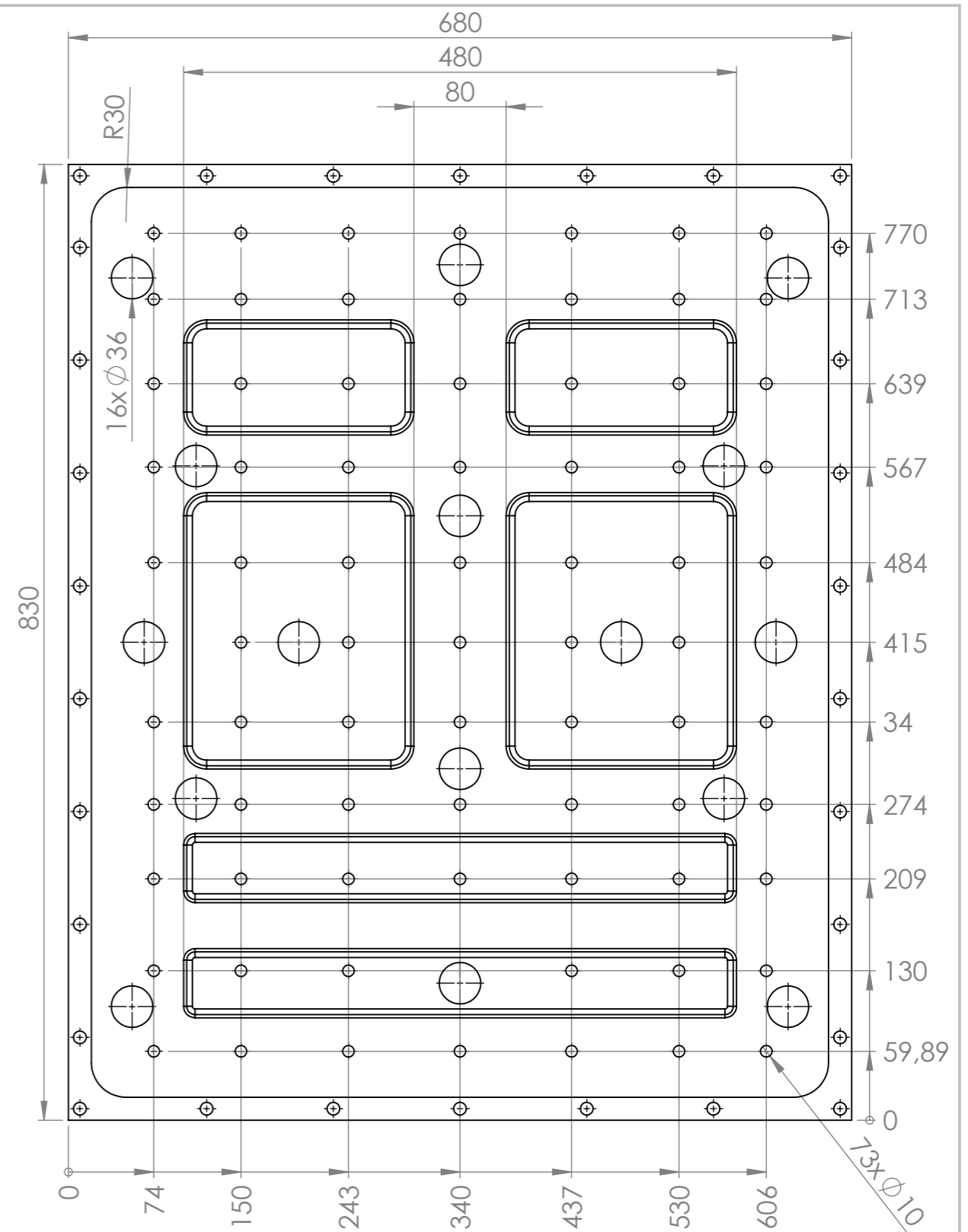
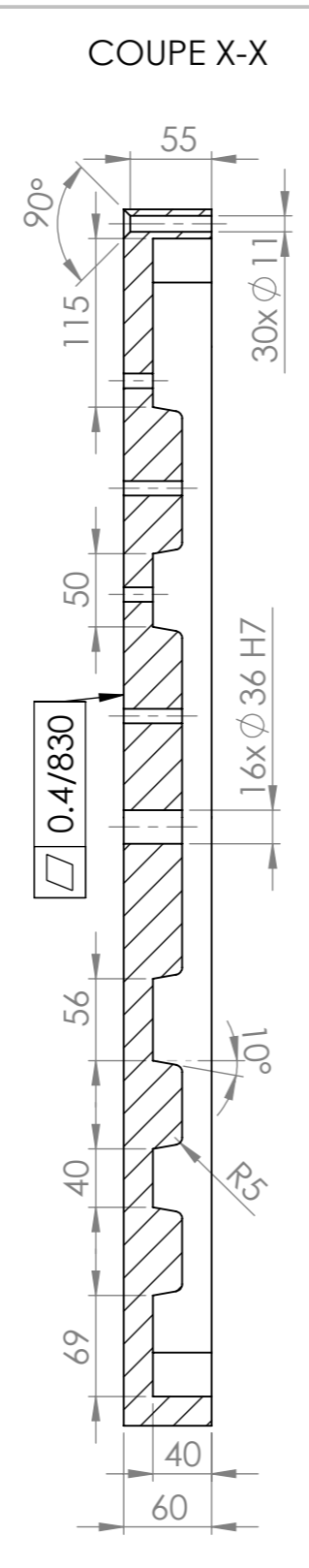
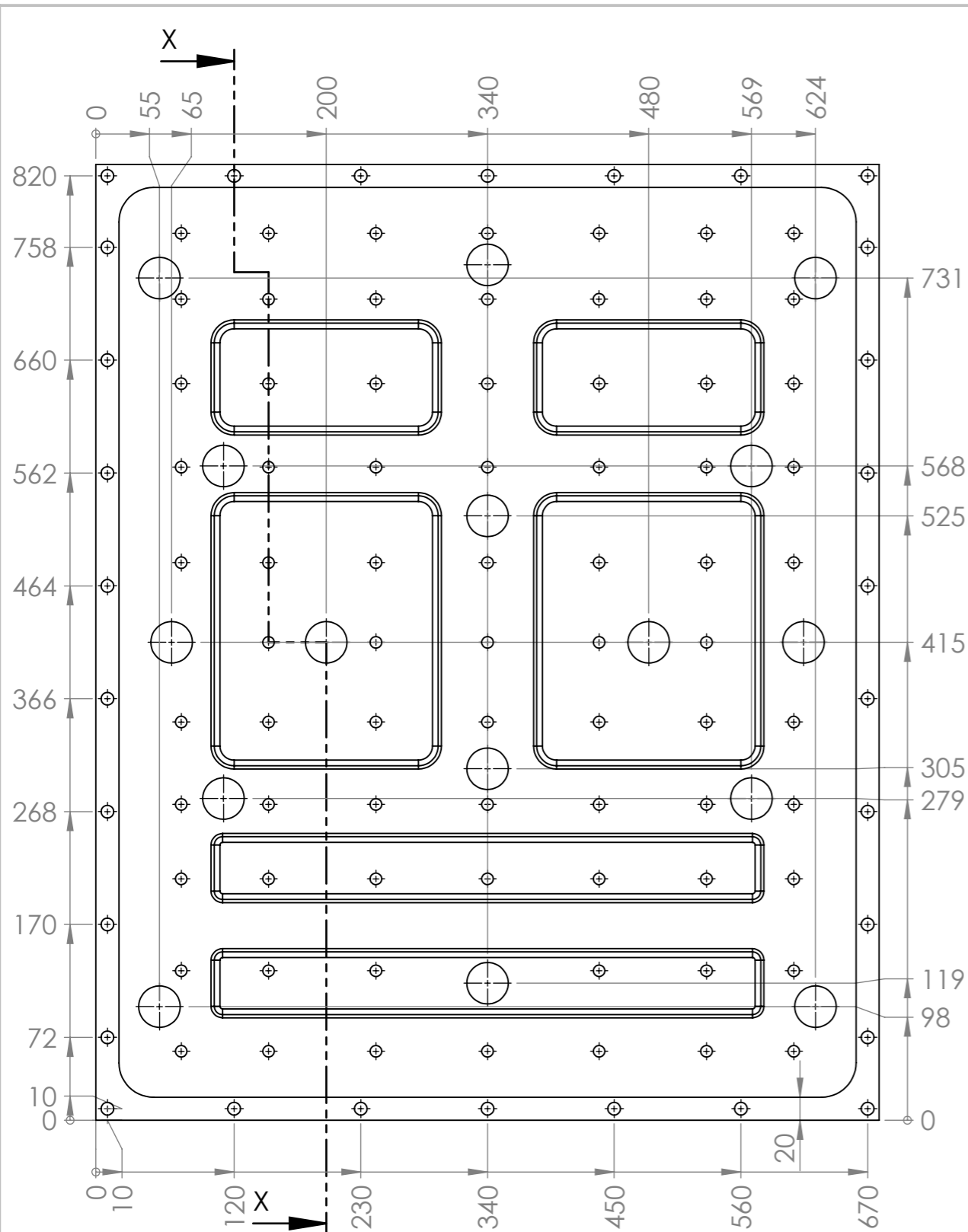


COUPE B-B



tolérances générales= ±0.1

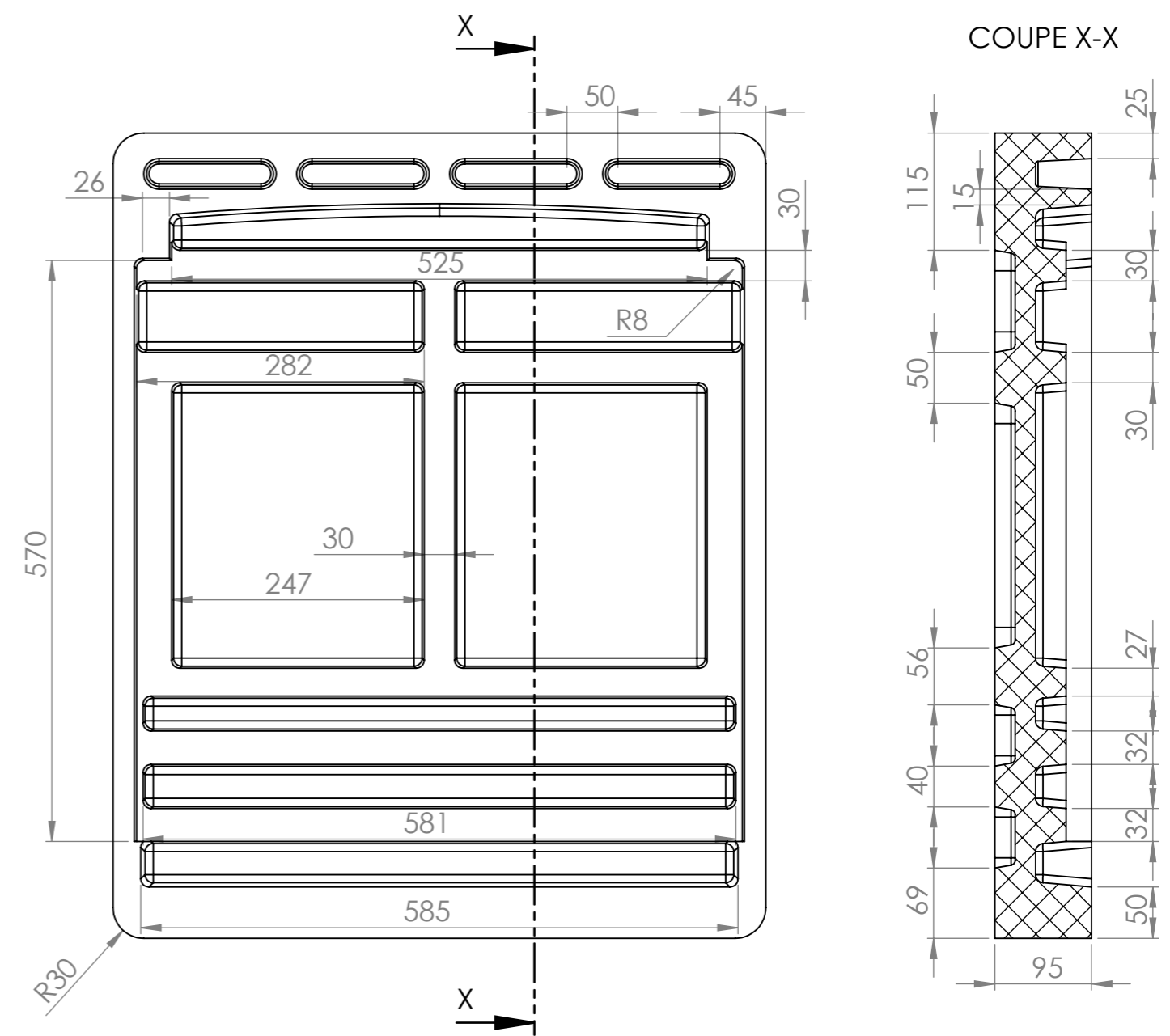
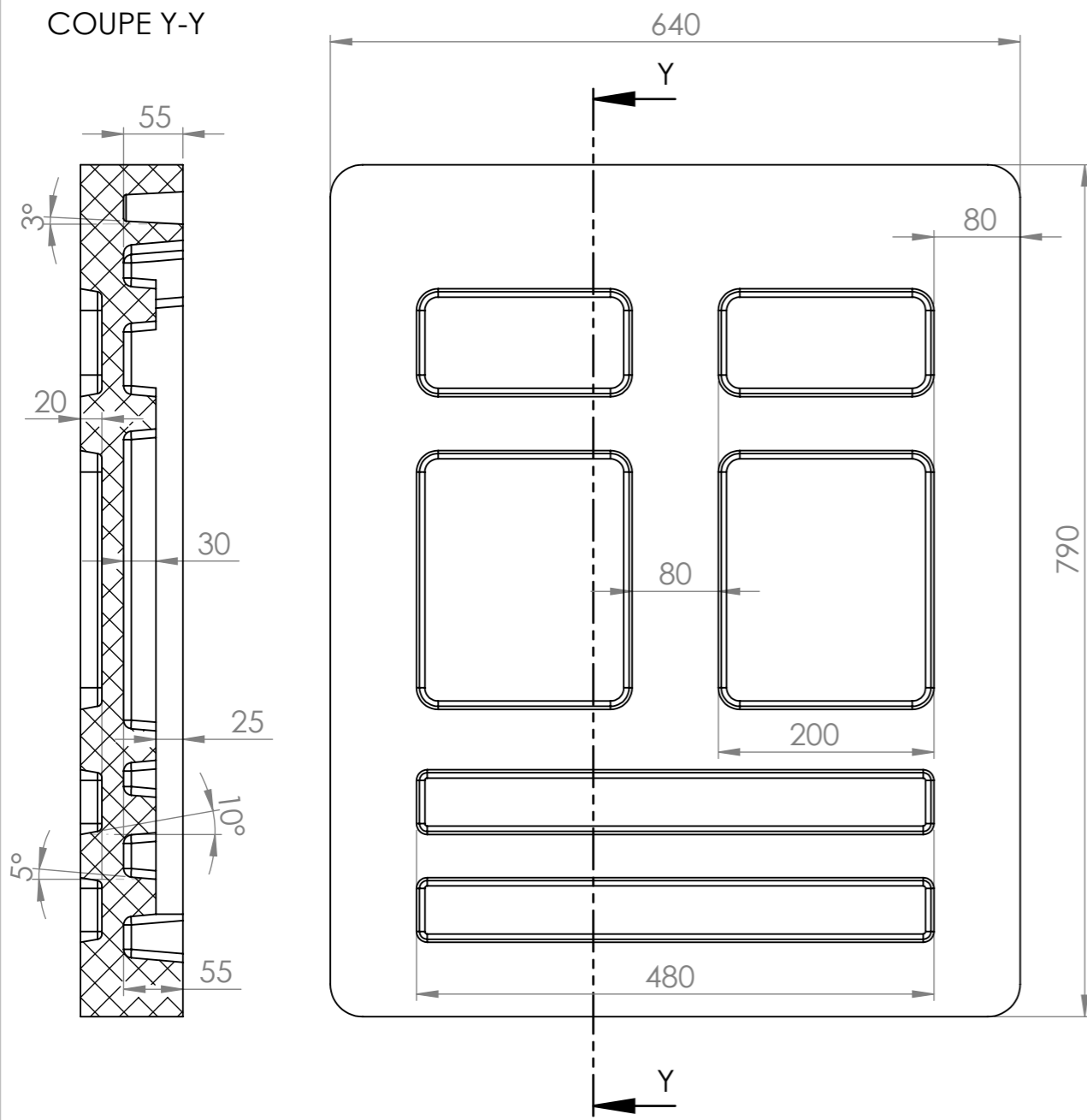
|                 |    |                                                                 |                                                     |             |
|-----------------|----|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------|
| 25              | 01 | PLAQUE PORTE CHARCHEUSES ET EJECTEURS                           | Al Mg 5                                             |             |
| NR              | NB | DESIGNATION                                                     | MATIERE                                             | OBSERVATION |
| ECHELLE<br>1/10 |    | MOULE A EXPANSION D' UNE PALETTE<br>POUR UN REFRIGIRATEUR 350 S | REALISE PAR:<br>AIT GANA LOUNES<br>MEHANI ABDERAHIM |             |
| A2              |    |                                                                 | 2016/2017                                           |             |
|                 |    | FGC-GM-UMMTO                                                    | MASTER 2                                            |             |



tolérances générales = ±0.1  
 sauf indications

ra 1.6

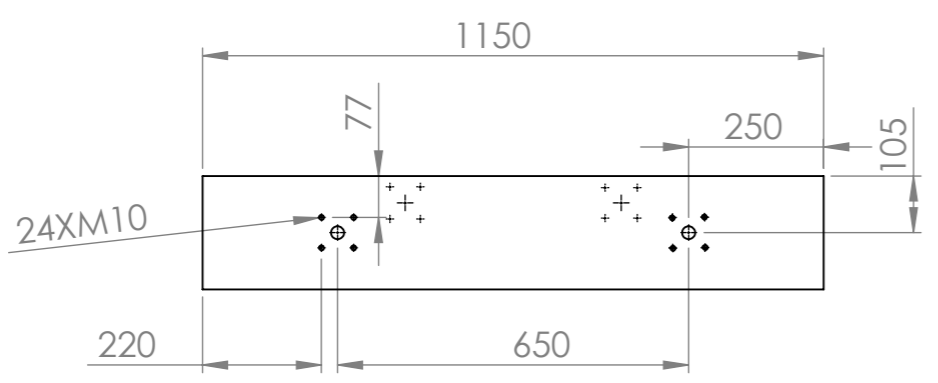
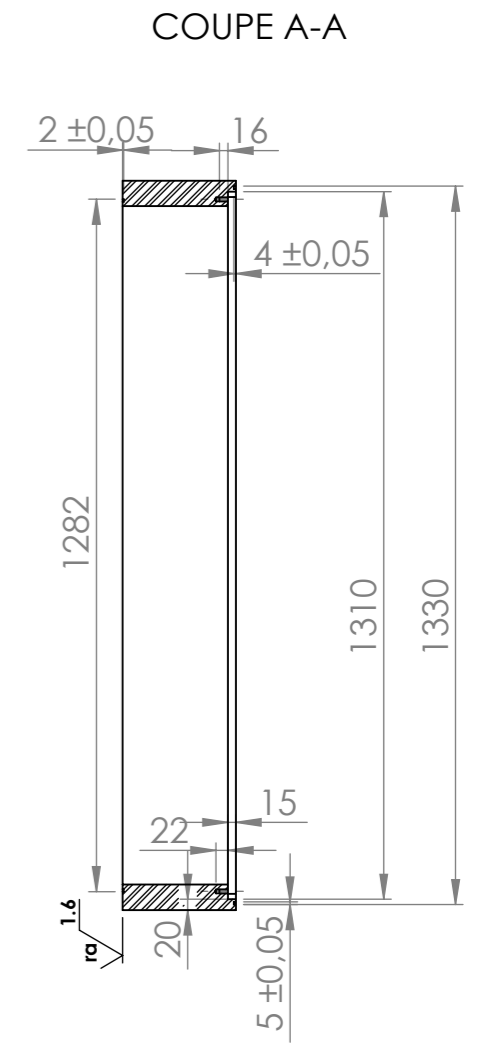
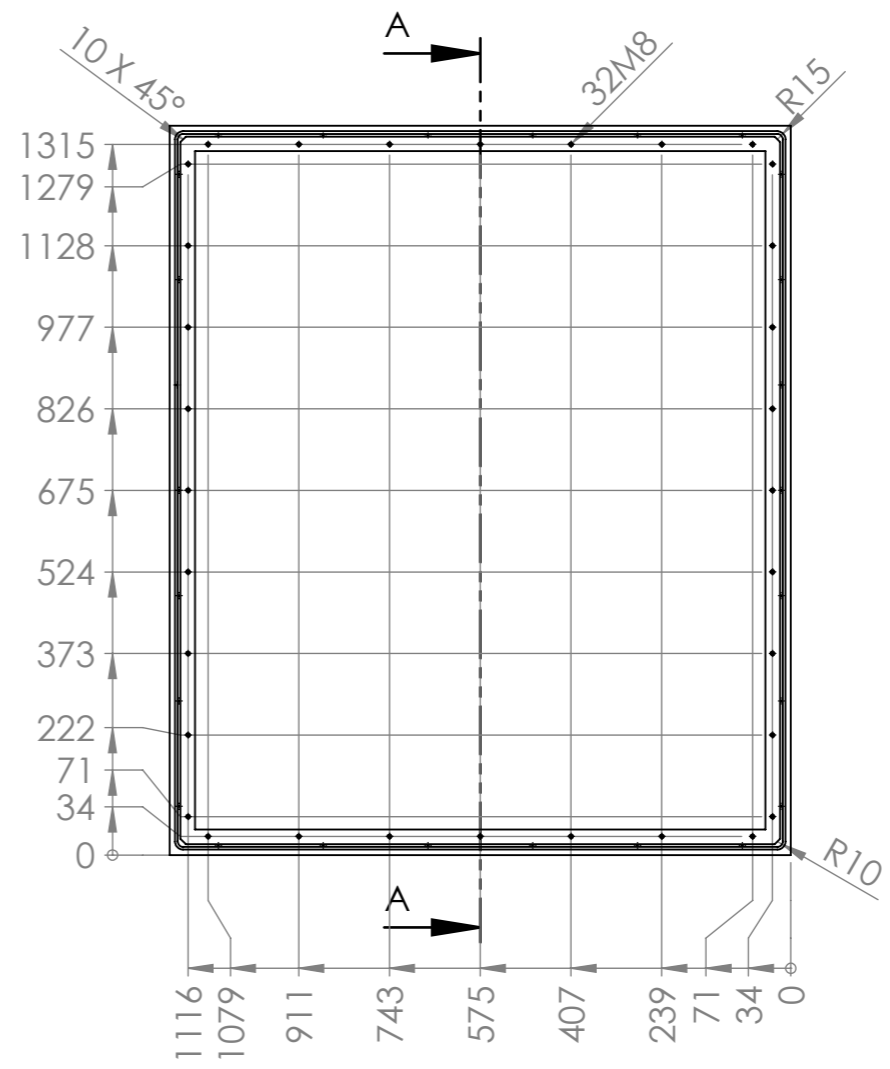
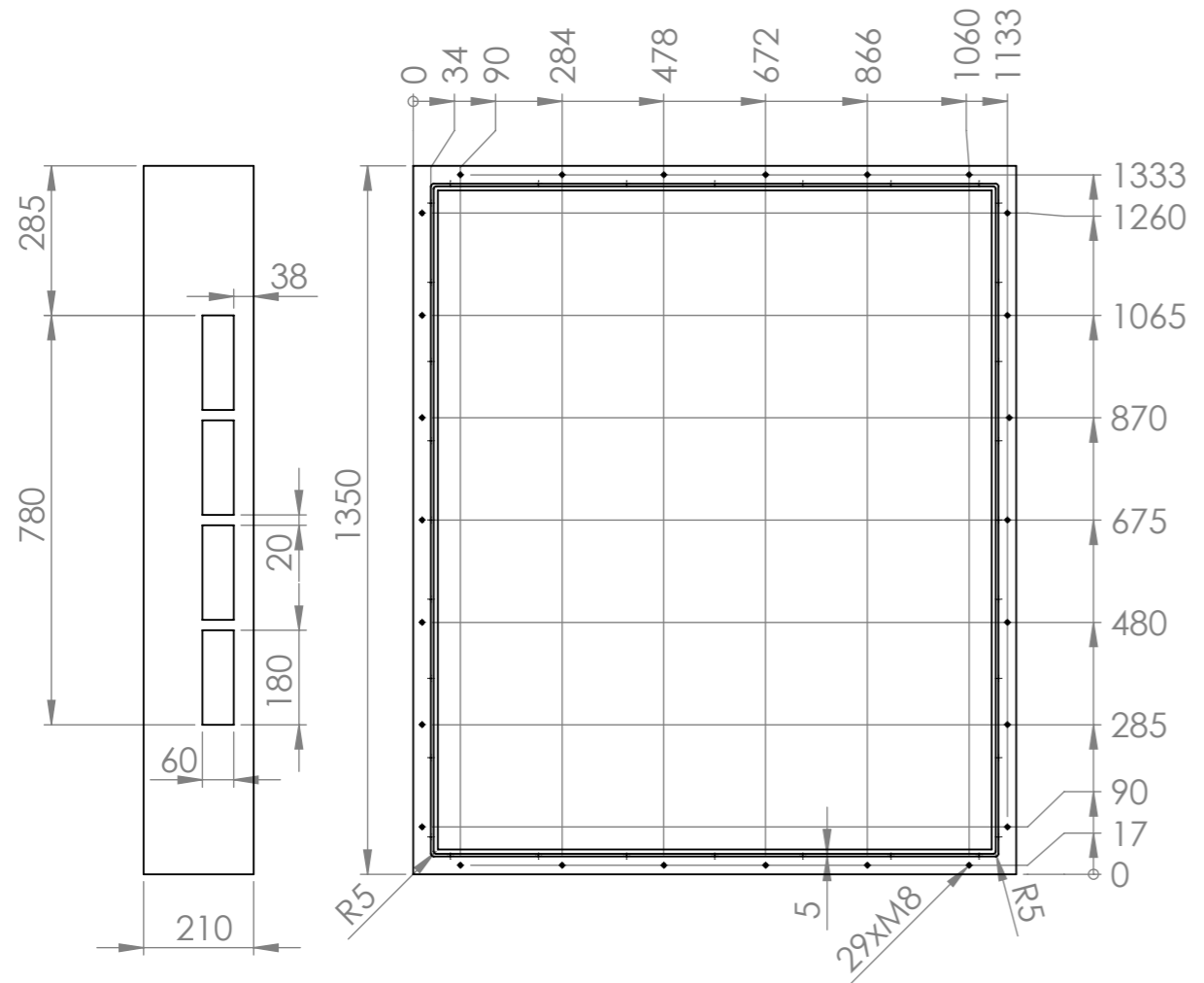
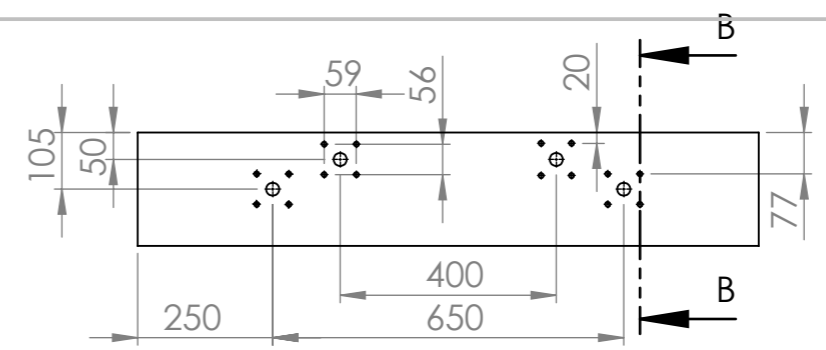
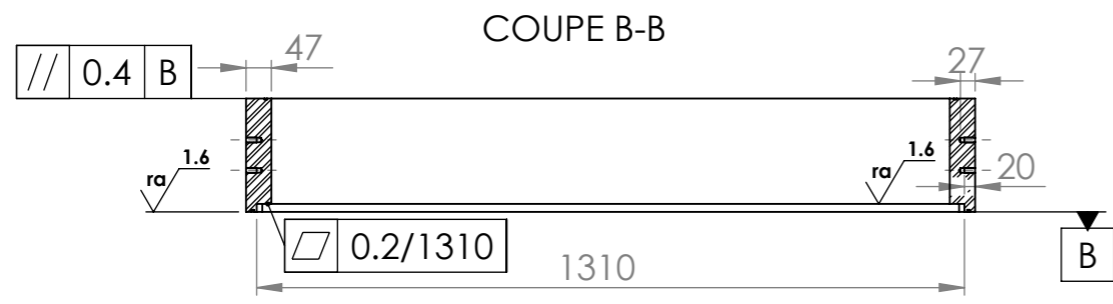
|    |    |                                                                 |         |                                                     |
|----|----|-----------------------------------------------------------------|---------|-----------------------------------------------------|
| 26 | 01 | cadre partie mobile                                             | Al Mg 5 |                                                     |
| RF | NB | DESIGNATION                                                     | MATIERE | OBSERVATION                                         |
|    |    | MOULE A EXPANSION D' UNE PALETTE<br>POUR UN REFRIGIRATEUR 350 S |         | REALISE PAR:<br>AIT GANA LOUNES<br>MEHANI ABDERAHIM |
|    |    |                                                                 |         | 2016-2017                                           |
|    |    | FGC-GM-UMMTO                                                    |         | MASTER 2                                            |



tolérances générales:  $\pm 0.1$   
sauf indications

|                |    |                                                                 |                                     |             |
|----------------|----|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------|
| 28             | 01 | PALETTE                                                         | PSE                                 |             |
| RF             | NB | DESIGNATION                                                     | MATIERE                             | OBSERVATION |
| ECHELLE<br>1/6 |    | MOULE A EXPANSION D' UNE PALETTE<br>POUR UN REFRIGIRATEUR 350 S | REALISE PAR:                        |             |
| A3             |    |                                                                 | AIT GANA LOUNES<br>MEHANI ABDERAHIM |             |
|                |    | FGC-GM-UMMTO                                                    | 2016-2017                           |             |
|                |    |                                                                 | MASTER 2                            |             |

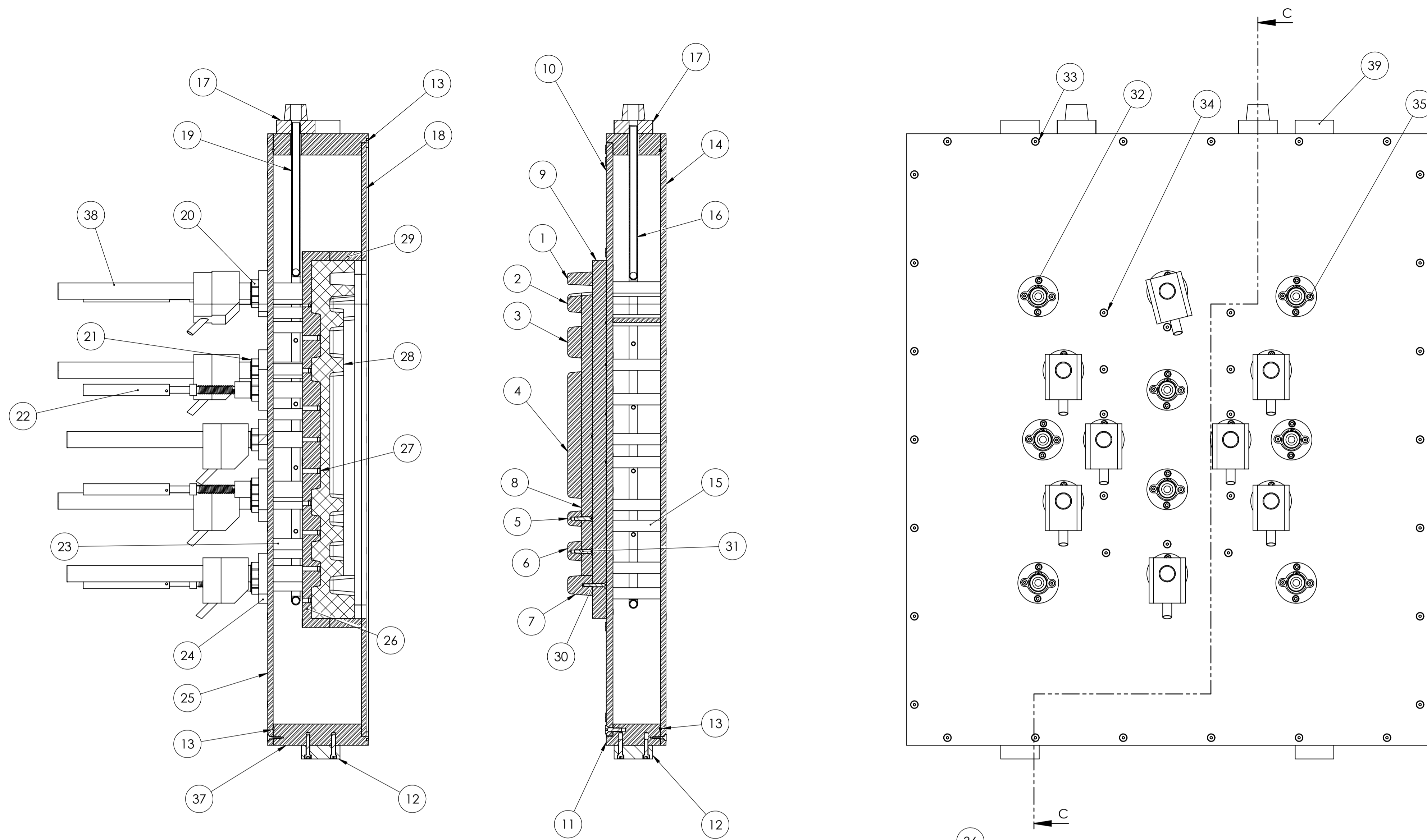




tolérances générales =  $\pm 0.1$   
sauf indications

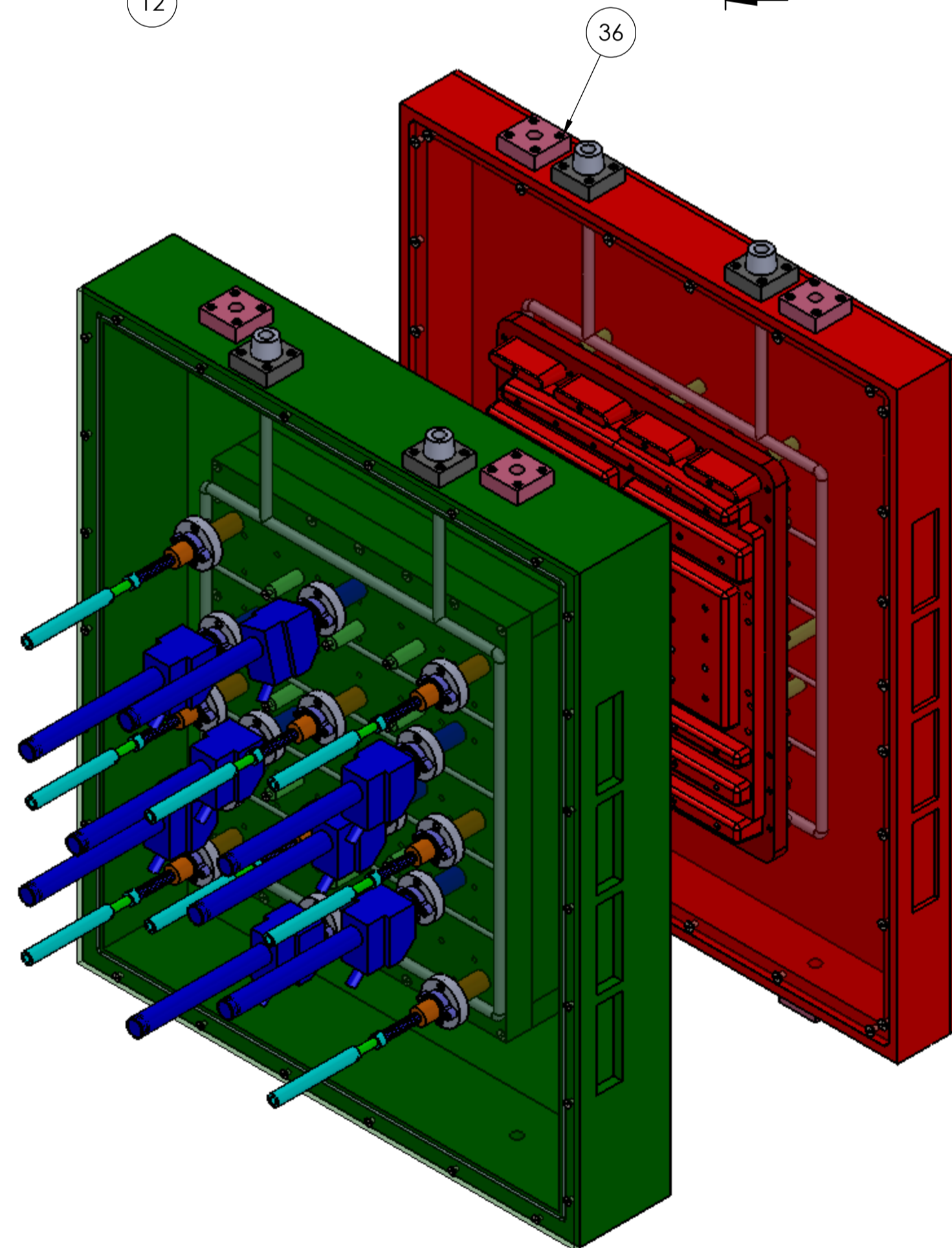
$ra \sqrt{3.2}$

|                 |    |                                                                |                                                     |             |
|-----------------|----|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------|
| 37              | 01 | cadre partie fixe                                              | Al Mg 5                                             |             |
| RF              | NB | DESIGNATION                                                    | MATIERE                                             | OBSERVATION |
| ECHELLE<br>1/14 |    | MOULE A EXPANSION D'UNE PALETTE<br>POUR UN REFRIGERATEUR 350 S | REALISE PAR:<br>AIT GANA LOUNES<br>MEHANI ABDERAHIM |             |
| A3              |    |                                                                | 2016-2017                                           |             |
|                 |    | FGC-GM-UMMTO                                                   | MASTER 2                                            |             |



COUPE C-C  
ECHELLE 1 : 6

Moule ACE 25AR  
 Dimension du moule:  
 Longueur: 1350 mm  
 Largeur: 1150 mm  
 Masse aproximativement du moule : 512kg  
 Matière: PSE  
 Rtrait: 0.4% à 0.7%  
 Masse de la moulée: 390g  
 Epaisseur de la pièce: 95 mm  
 Temps de cycle: 3 à 15 min



|    |     |                                       |                    |                   |
|----|-----|---------------------------------------|--------------------|-------------------|
| 39 | 04  | raccord d'air                         | bronze             |                   |
| 38 | 16  | Chargeuses                            | bronze             | pièces rapportées |
| 37 | 01  | Cadre partie fixe                     | Al Mg 5            |                   |
| 36 | 48  | Vis CHC M08x45                        | Cu Al 10 Ni Fe 4   |                   |
| 35 | 32  | Vis CHC M6x25                         | Cu Al 10 Ni 5 Fe 4 |                   |
| 34 | 12  | Vis CHC M8x25                         | Cu Al 10 Ni 5 Fe 4 |                   |
| 33 | 26  | Vis CHC M8x25                         | Cu Al 10 Ni 5 Fe 4 |                   |
| 32 | 32  | Vis CHC M8x20                         | Cu Al 10 Ni 5 Fe 4 |                   |
| 31 | 36  | Vis CHC M8x40                         | Cu Al 10 Ni 5 Fe 4 |                   |
| 30 | 39  | Vis CHC M8x50                         | Cu Al 10 Ni 5 Fe 4 |                   |
| 29 | 04  | Panneaux                              | Al Mg 5            |                   |
| 28 | 01  | Palette                               | PSE                |                   |
| 27 | 200 | Tuyères                               | bronze             |                   |
| 26 | 01  | Fond                                  | Al Mg 5            |                   |
| 25 | 01  | Plaque porte charcheuses et ejecteurs | Al Mg 5            |                   |
| 24 | 16  | Bague de centrage                     | bronze             |                   |
| 23 | 17  | Tasseaux partie fixe                  | Al Mg 5            |                   |
| 22 | 16  | éjecteurs                             | bronze             | pièces rapportées |
| 21 | 16  | Cerclips externe                      | acier trompé       | pièces rapportées |
| 20 | 16  | Bride                                 | bronze             |                   |
| 19 | 01  | Serpentin partie fixe                 | cuivre             |                   |
| 18 | 01  | Plaque porte empreinte partie fixe    | Al Mg 5            |                   |
| 17 | 04  | Raccord d'eau                         | bronze             |                   |
| 16 | 01  | Serpentin partie mobile               | cuivre             |                   |
| 15 | 12  | Tasseaux partie mobile                | Al Mg 5            |                   |
| 14 | 01  | Plaque arrière partie mobile          | Al Mg 5            |                   |
| 13 | 03  | Joint d'étanchete                     | EPDM               |                   |
| 12 | 04  | Raccord d'eau                         | bronze             |                   |
| 11 | 01  | Cadre partie mobile                   | Al Mg 5            |                   |
| 10 | 01  | Plaque porte empreinte partie mobile  | Al Mg 5            |                   |
| 09 | 01  | Plaque porte poinçons                 | Al Mg 5            |                   |
| 08 | 01  | Plaque secondaire                     | Al Mg 5            |                   |
| 07 | 01  | Poinçon 7                             | Al Mg 5            |                   |
| 06 | 01  | Poinçon 6                             | Al Mg 5            |                   |
| 05 | 01  | Poinçon 5                             | Al Mg 5            |                   |
| 04 | 02  | Poinçon 4                             | Al Mg 5            |                   |
| 03 | 02  | Poinçon 3                             | Al Mg 5            |                   |
| 02 | 01  | Poinçon 2                             | Al Mg 5            |                   |
| 01 | 04  | Poinçon 1                             | Al Mg 5            |                   |
| NR | NB  | Nom de la pièce                       | Matière            | OBSERVATION       |

|                |                                                                |                                                     |
|----------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| ECHELLE<br>1/6 | MOULE A EXPANSION D'UNE PALETTE<br>POUR UN REFRIGIRATEUR 350 S | REALISE PAR:<br>AIT GANA LOUNES<br>MEHANI ABDERAHIM |
|                |                                                                | 2016/2017                                           |
| A1             | FGC-GM-UMMTO                                                   | MASTER 2                                            |