

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA  
BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY

جامعة باجي مختار – عنابة



Année 2011

Faculté des Sciences  
Département de Physique

**MEMOIRE**

**Présenté en vue de l'obtention du diplôme de  
MAGISTER**

**Etude Expérimentale du Comportement Mécanique  
des Polymères**

**Option : Matériaux Avancés**

par

**Houria LADJABI**

**Directeur de thèse :**

**Nasser eddine ZEGHIB Pr. U. Badji Mokhtar (Annaba)**

**Devant le jury :**

**Président :**

**Abdelhamid SOUABI M.C. U. Badji Mokhtar (Annaba)**

**Examineurs :**

**Farid GHELDANE M.C. U. Badji Mokhtar (Annaba)**

**Rabia KHELIF M.C. U. Badji Mokhtar (Annaba)**

## *Dédicace*

*Je dédie ce travail à la mémoire de mon père.*

*A ma mère pour les leçons de vie et de courage qu'elle m'a enseignées.*

*A Hichem et Houdaifa qui sont mon trésor à moi.*

*A mon frère Charaf-Eddine et surtout à ma sœur Rizlene qui m'a beaucoup soutenu.*

*A mon oncle Mamoune qui a toujours cru en moi.*

## *Remerciements*

Ce travail a été réalisé au **Laboratoire des systèmes et Matériaux Avancés (LASMA)**, département de physique, Université Badji Mokhtar, Annaba.

A mon directeur de thèse Monsieur le Professeur **Nasser-Eddine ZEGHIB** à qui j'adresse mes sincères remerciements, vous m'avez fait un très grand plaisir en acceptant de m'encadrer pour cette thèse.

Votre expérience est un enseignement quotidien pour moi.

La bienveillance que vous m'avez toujours manifestée, vos conseils précieux et votre aide tout le long de cette thèse m'autorise à vous exprimer ma gratitude et mon fidèle attachement à votre personne.

Veillez trouver ici l'expression de mon profond respect.

A mon Président de jury, Monsieur le M.C **Abdelhamid SOUABI** j'adresse mes chaleureux remerciements car j'ai eu à apprécier vos qualités humaines exceptionnelles votre savoir encyclopédique, votre rigueur scientifique, votre richesse culturelle, votre humilité et votre modestie.

Vous m'avez constamment aidé,

Je suis fidèle à vos enseignements,

Croyez cher maître en ma profonde admiration

sincère et indéfectible attachement.

Je remercie Monsieur le M.C **Rabia KHELIF** qui a accepté de faire part du jury et de participer à cette thèse de m'avoir fait l'honneur d'examiner ce travail.

Je remercie également Monsieur le M.C **Farid GHELDANE** qui a accepté de faire part du jury et de juger ce travail de m'avoir fait l'honneur d'examiner ce travail.

Je tiens aussi à exprimer mes remerciements à Madame **TLILI** et **MEJDA** et à Monsieur **LOUDJANI** responsables à l'unité de recherche appliquée en sidérurgie métallique (URASM) El Hadjar, pour leur aide à la réalisation de ce travail.

Mes remerciements s'adressent enfin à tous les collègues de ma promotion pour leurs soutiens et encouragements.

## Résumé

Nous avons étudié le comportement mécanique d'un polymère amorphe, l'Acrylonitrile Butadiène Styrène (ABS) et ceci par des essais de traction uni axiale. La caractérisation est faite avec prise en compte de l'effet de la température qui varie de 40°C à 75°C et dans une gamme de vitesse d'étirage allant de 50mm/min à 1000 mm/min avec un pas relativement constant.

Un dispositif de chauffage a été adapté sur la machine de traction permettant d'une part de contrôler la température à plus ou moins deux degrés et de protéger la cellule de charge de la machine d'autre part.

L'approche proposée consiste à analyser l'évolution de la géométrie globale des courbes contrainte déformation obtenues et ceci en considérant les zones et les points caractéristiques de ces courbes. Nous avons montré que l'effet inverse de la température par rapport à la vitesse de déformation est mis en évidence. L'approximation polynomiale proposée est bien justifiée et ceci par un coefficient de corrélation très acceptable. Les résultats obtenus s'accordent bien avec des études précédentes.

## الملخص

درسنا السلوك الميكانيكية للبوليمر الفوضوي، أكريلونتريل بيوتادايين ستايرين (ABS) ، وذلك من خلال اختبارات الشد أحادي المحور. وتم التوصيف مع الأخذ في الاعتبار تأثير درجة الحرارة التي تتراوح بين 20 درجة إلى 75 درجة مئوية وتتراوح سرعة التمدد من 50 إلى 1000 مم في دقيقة مع خطوة ثابتة نسبيا. و قد تم تركيب سخان على آلة الشد للتحكم في درجة الحرارة من ناحية وذلك بدقة تتراوح بين زائد أو ناقص درجتين وحماية خلية قياس القوة للآلة من ناحية أخرى. المقاربة المقترحة تتمثل في تحليل تطور الهندسة الشاملة لمنحنيات الإجهاد والانفعال، وهذا من خلال النظر في تغير المناطق والنقاط المميزة لهذه المنحنيات. لقد تم إظهار و تسليط الضوء على التأثير المعاكس لدرجات الحرارة بالنسبة للسرعة و قد تم بيان أن المعادلة المقترحة بمتعدد الحدود مبررة و ذلك بالنظر أن قيمة معامل الارتباط مقبولة جدا. النتائج المتحصل عليها تتفق تماما مع دراسات سابقة.

## *Abstract*

We studied the mechanical behavior of amorphous polymer, Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) by uniaxial tensile tests. The characterization is done taking into account the effect of temperature ranging from 20 ° to 75 ° C and a speed range stretching from 50mm/min to 1000 mm / min with a step relatively constant. A heater was fitted to the machine to pull the one hand to control the temperature to plus or minus two degrees and protect the load cell of the machine on the other. The proposed approach is to analyze the evolution of the overall geometry of the stress-strain curves obtained and this by considering the areas and the characteristic points of these curves. We have shown that the opposite effect of temperature over the strain rate is highlighted. The polynomial approximation is proposed and justified this by a correlation coefficient very acceptable. The results agree well with previous studies .

## *Liste des abréviations*

ADN	Acide désoxyribonucléique
PE	Polyéthylène
PS	Polystyrène
ABS	Acrylonitrile butadiène styrène
PP	Polypropylène
PVC	Polychlorure de vinyle
PA	Polyamide
PB	Polybutadiene
SAN	Styrene Acrylonitrile

## *Liste des tableaux*

<i>Tableau</i>	<i>Titre</i>	<i>Page</i>
<b><i>Chapitre I</i></b>		
<b><i>1</i></b>	Quelques propriétés d'un Acrylonitrile Butadiène Styrène ABS (* : à la température ambiante) [11].	<b>14</b>
<b><i>Chapitre II</i></b>		
<b><i>1</i></b>	Identification du matériau [9].	<b>27</b>
<b><i>2</i></b>	Quelques propriétés d'un Acrylonitrile Butadiène Styrène ABS (* : à la température ambiante) [9].	<b>28</b>
<b><i>Chapitre III</i></b>		
<b><i>1</i></b>	différentes valeurs expérimentales des propriétés mécaniques des quatre éprouvettes (Influence de la température vitesse de déformation constante $\epsilon=13,02^{-3}s^{-1}$ ).	<b>57</b>
<b><i>2</i></b>	différentes valeurs expérimentales des propriétés mécaniques des onze éprouvettes (Influence de la vitesse de déformation, température constante T=20°C).	<b>57</b>

## *Liste des figures*

<i>Figure</i>	<i>Titre</i>	<i>Page</i>
<b><i>Chapitre I</i></b>		
<b>1</b>	Nodules de polybutadiène (PB) finement distribués dans un copolymère styrène-acrylonitrile (SAN) = copolymère acrylonitrile-butadiène-styrène (ABS) (cliché MET d'un film ultra mince [9]).	<b>8</b>
<b>2</b>	Structure styrène/acrylonitrile (SAN).	<b>9</b>
<b>3</b>	Structure d'acrylonitrile/butadiène/ styrène (ABS).	<b>10</b>
<b>4</b>	Vue d'un ABS au microscope électronique à transmission [11].	<b>13</b>
<b>5</b>	Caractéristiques des ABS en choc multiaxial selon la méthode ISO 6603-[11].	<b>14</b>
<b>6</b>	Imprimante en3D (Vue de la machine ) [12].	<b>16</b>
<b>7</b>	Vue de face du guide [12].	<b>16</b>
<b>8</b>	Vue de profil du guide [12].	<b>16</b>
<b>9</b>	Agrafeuse électrique (système commercialisé) [12].	<b>16</b>
<b>10</b>	Brique de base Lego. La première, datant d'avant 1958 est en acétate de cellulose, les deux autres en ABS .	<b>19</b>
<b>11</b>	Lego bricks.	<b>19</b>

<b>12</b>	Courbe contrainte-allongement de différents polymères.	<b>20</b>
<b>13</b>	Machine de traction.	<b>21</b>
<b>14</b>	courbe contrainte-déformation pour une traction uniaxiale d'un matériau ductile.	<b>21</b>
<b>15</b>	courbe brute (nominale) et vraie d'un matériau ductile pour une traction uniaxiale.	<b>23</b>
<b>16</b>	Système vidéo de traction.	<b>24</b>
<b>Chapitre II</b>		
<b>1</b>	bobine de file en ABS.	<b>27</b>
<b>2</b>	Eprouvette en forme de cylindre.	<b>29</b>
<b>3</b>	Photo de la machine de traction : ZWICK/Materiaprüfung.	<b>30</b>
<b>4</b>	Dispositif expérimental.	<b>30</b>
<b>5</b>	Thermocouple 666 193 Sonde de température NiCrNi.	<b>31</b>
<b>6</b>	Photo de la machine de traction ZWICK /Roell.	<b>32</b>
<b>7</b>	Mesure des dimensions de l'éprouvette.	<b>33</b>
<b>8</b>	Eprouvette d'essai mises en place dans la machine de traction.	<b>33</b>
<b>9</b>	Eprouvette d'essai sur un montage de poulies.	<b>34</b>
<b>10</b>	Essai de traction avec testXpert.	<b>35</b>

<b>11</b>	Essai de traction à l'aide de marques de mesure placées sur l'éprouvette.	<b>35</b>
<b>Chapitre III</b>		
<b>1</b>	Influence de la température (T=40°C) et la vitesse de déformation constante d'un ABS ( $\dot{\epsilon}$ )= 13,02.10 <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> : a) courbe expérimentale de traction contrainte déformation. b) photo de l'éprouvette à la fin de l'expérience.	<b>37</b>
<b>2</b>	Influence de la température (T=50°C) et la vitesse de déformation constante d'un ABS ( $\dot{\epsilon}$ )= 13,02.10 <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> : a) courbe expérimentale de traction contrainte déformation. b) photo de l'éprouvette à la fin de l'expérience.	<b>38</b>
<b>3</b>	Influence de la température (T=60°C) et la vitesse de déformation constante d'un ABS ( $\dot{\epsilon}$ )= 13,02.10 <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> : a) courbe expérimentale de traction contrainte déformation. b) photo de l'éprouvette à la fin de l'expérience.	<b>39</b>
<b>4</b>	Influence de la température (T=75°C) et la vitesse de déformation constante d'un ABS ( $\dot{\epsilon}$ )= 13,02.10 <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> : a) courbe expérimentale de traction contrainte déformation. b) photo de l'éprouvette à la fin de l'expérience.	<b>40</b>
<b>5</b>	Comportement en traction d'un ABS à 20°C pour une vitesse de déformation égale à 13,02.10 <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> : a) courbe expérimentale de traction contrainte déformation. b) photo de l'éprouvette à la fin de l'expérience.	<b>42</b>
<b>6</b>	Comportement en traction d'un ABS à 20°C pour une vitesse de déformation égale à 26,04.10 <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> : a) courbe expérimentale de traction contrainte déformation. b) photo de l'éprouvette à la fin de l'expérience.	<b>43</b>
<b>7</b>	Comportement en traction d'un ABS à 20°C pour une vitesse de déformation égale à 52,08.10 <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> : a) courbe expérimentale de traction contrainte	<b>44</b>

	déformation. b) photo de l'éprouvette à la fin de l'expérience.	
<b>8</b>	Comportement en traction d'un ABS à 20°C pour une vitesse de déformation égale à $78,12 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ : a) courbe expérimentale de traction contrainte déformation. b) photo de l'éprouvette à la fin de l'expérience.	<b>45</b>
<b>9</b>	Comportement en traction d'un ABS à 20°C pour une vitesse de déformation égale à $104,16 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ : a) courbe expérimentale de traction contrainte déformation. b) photo de l'éprouvette à la fin de l'expérience.	<b>46</b>
<b>10</b>	Comportement en traction d'un ABS à 20°C pour une vitesse de déformation égale à $130,20 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ : a) courbe expérimentale de traction contrainte déformation. b) photo de l'éprouvette à la fin de l'expérience.	<b>47</b>
<b>11</b>	Comportement en traction d'un ABS à 20°C pour une vitesse de déformation égale à $156,25 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ : a) courbe expérimentale de traction contrainte déformation. b) photo de l'éprouvette à la fin de l'expérience.	<b>48</b>
<b>12</b>	Comportement en traction d'un ABS à 20°C pour une vitesse de déformation égale à $182,29 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ : a) courbe expérimentale de traction contrainte déformation. b) photo de l'éprouvette à la fin de l'expérience.	<b>49</b>
<b>13</b>	Comportement en traction d'un ABS à 20°C pour une vitesse de déformation égale à $208,33 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ : a) courbe expérimentale de traction contrainte déformation. b) photo de l'éprouvette à la fin de l'expérience.	<b>50</b>
<b>14</b>	Comportement en traction d'un ABS à 20°C pour une vitesse de déformation égale à $234,37 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ : a) courbe expérimentale de traction contrainte déformation. b) photo de l'éprouvette à la fin de l'expérience.	<b>51</b>

<b>15</b>	Comportement en traction d'un ABS à 20°C pour une vitesse de déformation égale à $260,41.10^{-3} \text{ s}^{-1}$ : a) courbe expérimentale de traction contrainte déformation. b) photo de l'éprouvette à la fin de l'expérience.	<b>52</b>
<b>16</b>	Comportement en traction de l'ABS entre 40°C et 75°C pour une vitesse de déformation constante $\dot{\epsilon} = 13,02.10^{-3} \text{ s}^{-1}$ .	<b>53</b>
<b>17</b>	Comportement en traction de l'ABS à différentes vitesses de déformation entre $13,02.10^{-3} \text{ s}^{-1}$ et $260,41.10^{-3} \text{ s}^{-1}$ pour une température constante $T=20^\circ\text{C}$ .	<b>53</b>
<b>18</b>	courbe contrainte déformation pour un essai de traction d'un Acrylonitrile Butadiène Styrene (ABS) : à la température ambiante.	<b>54</b>
<b>19</b>	forme géométrique globale d'une courbe contrainte-déformation pour un essai de traction d'un polymère.	<b>55</b>
<b>20</b>	variation de la Résistance à la limite élastique $R_e$ : (a) : en fonction de la température T. (b): en fonction de la vitesse de déformation $\dot{\epsilon}$ .	<b>59</b>
<b>21</b>	variation de la Resistance à la traction $R_m$ : (a) : en fonction de la température T. (b): en fonction de la vitesse de déformation $\dot{\epsilon}$ .	<b>60</b>
<b>22</b>	variation de module d' Young E : (a) : en fonction de la température T. (b): en fonction de la vitesse de déformation $\dot{\epsilon}$ .	<b>60</b>
<b>23</b>	variation de la résistance à la rupture $R_p$ : (a) : en fonction de la température T. (b): en fonction de la vitesse de déformation $\dot{\epsilon}$ .	<b>62</b>

## *Table des matières*

Introduction Générale	01
-----------------------	----

### *Chapitre I* *Etude bibliographique*

I-1 Importance des matières plastiques	03
I-2 Caractéristiques des plastiques	03
I-3 Généralités sur les polymères	03
I-4 Type des polymères	04
I-4-1 Les thermoplastiques	04
I-4-1-1 Thermoplastiques techniques : Acrylonitrile Butadiène Styène	05
I-4-2 Les thermodurcissables	05
I-4-3 Les élastomères	06
I- 5 Polymères homogènes et hétérogènes	06
I- 5-1 Polymères homogènes	06
I- 5-2 Polymères hétérogènes	07
I- 5-3 Polystyrène modifié par une phase élastomère	07
I- 5-3-1 Structure	07
I-6 L'Acrylonitrile Butadiène Styène (ABS)	08
I- 6-1 Introduction	08
I- 6-2 Identification du matériau	09
I-6-2-1 Le styrène/acrylonitrile (SAN)	09
I-6-3 Monomères constitutifs	10
I-6-3-1 Proportion des Monomères constitutifs	11
I- 6-4 Copolymérisation: Mélange	12
I- 6-5 Structure des ABS	12
I-6-6 Propriétés	14
I-6-7 Applications	15
1.7 Notions sur l'essai de traction	19

1.7 .1 Essais Mécaniques	19
1.7 .2 Essais de traction	19
1.7 .3 Rappel théorique	20
1.7 .4 Principe de l'essai de traction	21

## *Chapitre II*

### *Matériau étudié et technique expérimentale*

II-1 Introduction	26
II-2 Présentation du matériau étudié	26
II-2-1 Choix du matériau	26
II-2-2 Caractéristiques du matériau	27
II-3 Méthode d'essais mécaniques	28
II-3-1 Essais de traction	28
II-3-1-1 Eprouvettes de traction	29
II-3-2 Dispositif expérimental	29
II-3-2-1. Description des machines de traction	29
II-3-2-1-1 Machines Zwick/Materiaprüfung	29
II-3-2-1-2 Machines Zwick/Roell	31
II-3-2-1-3 Logiciel de pilotage	32
II-3-3 Etapes de l'essai	32
II-4 Essais expérimentaux	33
II-4-1 Essais à plusieurs températures	34
II-4-2 Essais à plusieurs vitesses de déformation	34

## *Chapitre III*

### *Résultats expérimentaux*

III-1 Essais expérimentaux	36
III-2 Résultats des expériences	36
III-2-1-Résultats sous l'influence de la température	36
III-2-2 Essais sous l'effet de la vitesse de déformation	41
III-3 Analyse géométrique des courbes	54
III-4 Variation des paramètres mécaniques	58

## *Chapitre IV*

### *Discussion*

IV-1 Introduction	64
IV-2 Explication de l'effet de la température et de la vitesse de déformation sur le comportement mécanique de l'ABS	64
<b>Conclusion générale</b>	
<b>Perspectives</b>	67
<b>Références bibliographiques</b>	69

## Introduction Générale

Les matériaux thermoplastiques amorphes suscitent un vif intérêt grâce à leurs importantes applications industrielles. Cet attrait est concrétisé par de nombreux travaux concernant leurs réponses mécaniques.

En effet, leurs lois de comportement présentent un intérêt fondamental et contrôlent les procédés de mise en forme.

Parmi ces polymères, l'Acrylonitrile Butadiène Styène (ABS) a connu un développement industriel important, en raison de l'ensemble de ces propriétés : bonne tenue à la chaleur, résistance au choc élevée et rigidité, sa stabilité dimensionnelle et son aptitude à la décoration. La combinaison des trois monomères qui le constitue de nature chimique et de propriétés physiques différentes, permet d'avoir un matériau d'intérêt avec des performances supérieures à celles de départ.

Cette technique a été employée durant les dernières décennies pour améliorer les propriétés physiques comme la résistance aux chocs, la flexibilité et la stabilité thermique. C'est le matériau privilégié pour le prototypage rapide, il s'agit des pièces moulées pour fabriquer les appareils électroménagers, les jouets, les pièces automobiles et le matériel informatiques. Le prototypage rapide intègre trois notions essentielles : le temps, le coût et la complexité des formes.

Et c'est l'imprimante 3D qui permet d'"imprimer en quelques minutes par dépôts de fils en ABS des modèles numériques 3 dimensions à partir d'un logiciel ou scanner 3D, c'est-à-dire en générer un modèle physique en plastique ABS, précis, à des fins de validation fonctionnelle. Le tout sans moule, ni cire ou poudre, ni manipulation particulière.

Cependant notre travail consiste à étudier le comportement mécanique de l'ABS soumis à une traction sous l'effet de la température et la vitesse d'étirage et analyser l'évolution de la géométrie des courbes contrainte déformation obtenue afin de montrer que l'effet inverse de la température par rapport à la vitesse de déformation est mis en évidence.

Ce travail se compose de quatre chapitres :

- Le premier chapitre comporte une étude bibliographique dans laquelle nous présentons le matériau choisi avec quelques notions de la mécanique uniaxiale de la rupture.

- Le deuxième chapitre présente les propriétés principales du matériau étudié, l'essai de traction, ainsi que l'exposition de l'éprouvette utilisée.
- Dans le troisième chapitre nous présentons une étude expérimentale sur les éprouvettes d'ABS lors de la traction sous l'influence des deux paramètres cités précédemment.
- Le quatrième chapitre consacré à la présentation des résultats obtenus et leur interprétation.

### 1-1 Importance des matières plastiques

Dans le passé, des matériaux de base durable, comme la pierre, le bronze et le fer, ont déterminé la culture humaine mais également des matières plus éphémères telles que le bois, le cuir, le lin ou la laine, ont joué un rôle important dans notre société. Pour répondre à la demande croissante de certains de ces matériaux et améliorer par la même occasion leurs précieuses propriétés, la science et l'industrie ont développé de nouveaux produits dont les matières plastiques qui présentent de nombreuses propriétés uniques, parfois inégalables.

Elles sont légères mais robustes, ne rouillent pas, se brisent moins vite que d'autres matériaux et n'ont pas besoin d'être peintes. Elles sont résistantes aux intempéries et faciles à travailler, peuvent prendre n'importe quelle forme, faite sur mesure, et assurent une bonne isolation.

L'industrie de la construction et de l'automobile, l'industrie alimentaire et le monde médical sont parmi les plus grands consommateurs de ces nouveaux matériaux. Les matières plastiques ont remplacé avantageusement quantité de 'produits naturels' dans diverses applications, ce qui représente souvent un avantage pour l'environnement [1].

### 1-2 Caractéristiques des plastiques

Le "plastique" est un terme générique qui désigne une famille de matières fabriquées à partir du pétrole ou de gaz naturel. Le pétrole est raffiné et distillé. La fraction d'essence légère ou "naphta" est isolée puis "craquée" (distillée) à la vapeur, ce qui permet d'obtenir des molécules chimiques de base, " les monomères", qui sont constitués principalement d'atomes de carbone et d'hydrogène.

Les molécules sont assemblées entre elles sous formes de chaînes, linéaires ou en réseau, qu'on appelle **les polymères**. D'autres éléments interviennent dans la composition des polymères pour donner des caractéristiques spécifiques au produit, tels que : Oxygène, chlore, azote, etc [2].

Pour comprendre la nature des plastiques, il est nécessaire d'examiner les substances qui en constituent la base, c'est-à-dire, **les polymères**.

### 1-3 Généralités sur les polymères

Les polymères sont des matériaux à molécules géantes résultant de l'assemblage de molécules élémentaires appelées monomères. Les chaînes obtenues par la répétition de ces monomères vont avoir des tailles et des masses molaires très importantes, typiquement supérieures à  $10000 \text{ g.mol}^{-1}$ , masse à partir de laquelle les polymères vont donner un matériau

au sens mécanique du terme. Les polymères sont dans l'ensemble peu denses, compte tenu de leur origine organique et, par la suite, de la présence d'éléments constitutifs légers (Carbone, Oxygène, Hydrogène, Azote). La liaison covalente des carbones est à la base de la notion de polymère. Il s'agit d'une liaison forte d'environ 100 à 450 kJ/mol (438 kJ/mol pour la liaison carbone-carbone). Par conséquent, les polymères possèdent une élasticité élevée dans le sens de la chaîne macromoléculaire.

Les polymères diffèrent des simples macromolécules parce qu'ils résultent de l'enchaînement aléatoire de monomères alors que les macromolécules (ADN, protéines) sont issues d'une succession codifiée d'éléments précis [3].

Parmi les matières plastiques, on distingue les homopolymères, répétition d'une unique structure moléculaire, et les copolymères, succession de plusieurs structures différentes.

Les homopolymères désignent donc des polymères fabriqués à partir d'un seul type de monomère, comme par exemple les polyéthylène PE et polystyrène PS. Dès qu'au moins deux types de monomère participent à la formation des macromolécules, on parlera de copolymères. C'est le cas du styrène-butadiène. La variété des copolymères est très importante. Ces matériaux possèdent des propriétés physico-chimiques et mécaniques intermédiaires avec celles obtenues sur les homopolymères correspondants.

#### **1-4 Type des polymères**

On peut classer les polymères en trois types, en fonction de leur réaction à la chaleur :

- Les thermoplastiques.
- Les thermodurcissables.
- Les élastomères.

Dans ce qui suit, nous nous intéressons aux thermoplastiques et, plus exactement, aux thermoplastiques techniques dont l'Acrylonitrile Butadiène Styrène, ABS, qui fait objet de cette étude.

##### **1-4-1 Les thermoplastiques**

A température ambiante, ces matériaux sont solides. Leurs particularités structurales sont une taille des molécules limitée et une structure linéaire ou ramifiée. C'est ce qui leur confère de très bonnes propriétés mécaniques comme la ductilité. Sous l'effet de la chaleur, ils

deviennent souples jusqu'à fondre : L'énergie thermique est suffisante pour vaincre les liaisons intermoléculaires et les molécules peuvent glisser les unes sur les autres. En revanche, l'avantage est qu'à l'état fondu on peut les mouler dans la forme que l'on veut. C'est un procédé industriel employé pour fabriquer des objets à la pièce, en discontinu, et on peut les déformés car ils sont façonnables sous l'effet de la chaleur, gardant cette forme en refroidissant. Ce phénomène réversible permet le recyclage : Les objets sont broyés et fondus pour élaborer d'autres. Les techniques employées dans leur mise en forme sont pour l'essentiel le coulage, l'injection et l'extrusion.

Parmi les principaux thermoplastiques, on cite le polyéthylène PE, le polypropylène PP, le polystyrène PS, le polychlorure de vinyle PVC, les polyamides PA, etc [4].

#### **I-4-1-1 Thermoplastiques techniques : Acrylonitrile Butadiène Styrène(ABS)**

Daly fût le premier à déposer un brevet sur les **ABS** en 1948 [5]. Ce dernier a pour formule chimique :  $(C_8H_8)_x (C_4H_6)_y (C_3H_3N)_z$ , c'est un thermoplastique employé par l'industrie pour des produits rigides et moulés.

Il est opaque du fait de sa structure à deux phases styréniques. En raison de ses bonnes qualités d'aspect de surface, de sa stabilité dimensionnelle et de son aptitude à la décoration, l'ABS est beaucoup utilisé pour des applications de capotage dans des secteurs comme l'électroménager, la téléphonie, le matériel informatique, le jouet, ...

Il a une bonne résistance aux chocs et détient une bonne rigidité, ce qui explique sa large utilisation dans le domaine des transports, automobiles, sport et loisir, comme on l'a vu précédemment.

Donc, pour résumer ses propriétés exceptionnelles :

- Bon compromis choc/rigidité.
- Légèreté.
- Bonne stabilité dimensionnelle.
- Facilité d'usinage.
- Excellent isolant électrique.
- Facilité de soudage ou de collage.
- Se prête bien à la décoration.

#### **1-4-2 Les thermodurcissables**

Les thermodurcissables sont des plastiques qui prennent une forme définitive au premier refroidissement. La réversibilité de forme est impossible car ils ne se ramollissent

plus, une fois moulés. Sous de trop fortes températures, ils se dégradent et brûlent (carbonisation). Les molécules de ces polymères sont organisées en de longues chaînes dans lesquelles un grand nombre de liaisons chimiques solides et tridimensionnelles ne peuvent pas être rompues et se renforcent quand le plastique est chauffé. La matière thermodurcissable garde toujours sa forme en raison de ces liaisons croisées et des pontages très résistants qui empêchent tout glissement entre les chaînes. Les thermodurcissables représentent 20%, pourcentage volumique, de matières plastiques [6].

Ce sont des matériaux amorphes et infusibles, il ne peut y avoir aucun déplacement des chaînes les unes par rapport aux autres. Lorsque la température augmente, le matériau ne devient pas visqueux, mais conserve sa rigidité jusqu'au moment où il se dégrade. Enfin, on appelle ces plastiques thermodurcissables car, en général, une élévation de température favorise la réaction de polymérisation et le degré de réticulation, donc la rigidité [7].

### **1-4-3 Les élastomères**

Les élastomères sont des matériaux aux propriétés bien particulières. Ce sont des polymères de haute masse moléculaire et à chaînes linéaires. Le déplacement de leurs chaînes, les unes par rapport aux autres, n'étant limité que par une légère réticulation due aux enchevêtrements, on peut obtenir de grandes déformations élastiques totalement réversibles. Lorsque la contrainte est nulle, ces matériaux sont amorphes. Leurs chaînes tendent toutefois à s'aligner au cours de la déformation, il se produit une augmentation de la rigidité, ou durcissement structural. Pour obtenir un tel comportement, il faut utiliser ces matériaux à une température supérieure à leur température de transition vitreuse.

Exemples : Caoutchouc naturel, polybutadiène, polyisoprène [8,7].

## **1-5 Polymères homogènes et hétérogènes**

### **1-5-1 Polymères homogènes**

Les matériaux polymères sont définis comme homogènes lorsque leurs propriétés sont macroscopiquement identiques en tout point, c'est-à-dire qu'aucune différence de propriétés, même due aux différents types de macromolécules constitutives, n'est macroscopiquement détectée. Ceci ne signifie pas que le matériau se trouve dans un seul état physique (vitreux, caoutchoutique ou fondu).

Les macromolécules d'un thermoplastique peuvent être simultanément dans un état solide, sous forme de cristallites, et un état caoutchoutique ou vitreux, en tant que zones

amorphes désordonnées entre les cristallites. On parle dans ce cas d'un matériau polymère homogène biphasique [9].

### **I-5-2 Polymères hétérogènes**

Les matériaux polymères hétérogènes sont constitués au minimum de deux composés organiques de nature chimique différente, dont l'un au moins est un matériau polymère qui assure la cohésion du système. Les différents constituants sont liés entre eux, soit chimiquement, soit physiquement.

Les propriétés des matériaux polymères hétérogènes sont déterminées à partir de celles de leurs constituants. Les mélanges de polymères représentent le groupe le plus important des matériaux polymères hétérogènes et donnent naissance à des matériaux polymères à plusieurs composants, dont les propriétés peuvent être macroscopiquement différenciées [9].

Lorsque deux polymères différents sont mélangés, les propriétés du produit résultant ne sont pas identiques à celle des matières de départ et peuvent être, soit intermédiaires (interpolation linéaire, lois des mélanges), soit réduites (altération) ou encore améliorées par rapport aux propriétés de chacun des polymères d'origine.

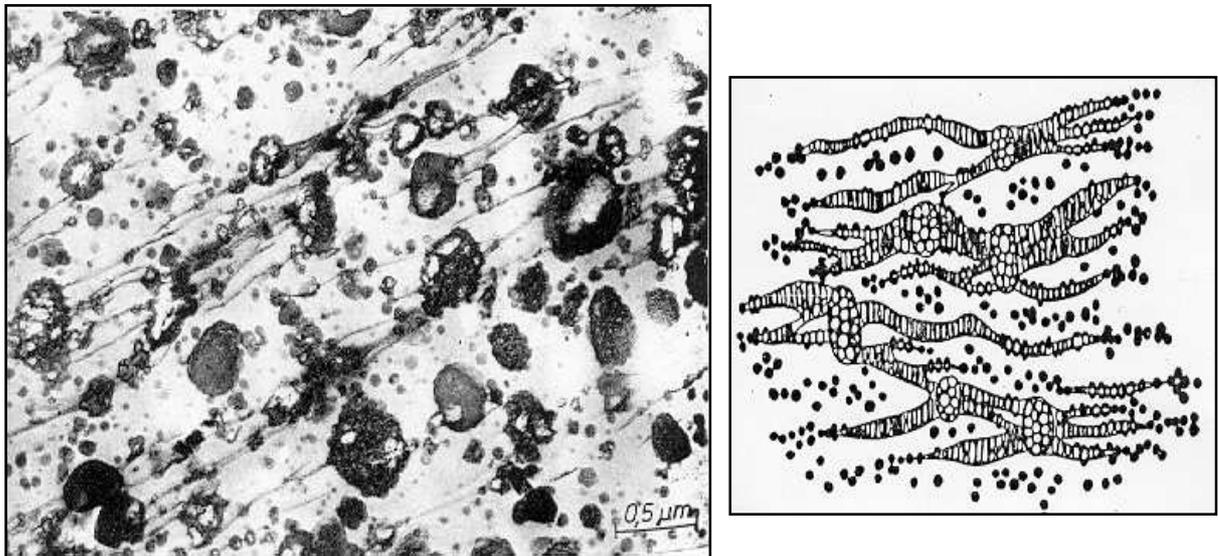
Approximativement, 10 % des thermoplastiques et 75 % des élastomères sont utilisés sous forme de mélanges. Initialement, les mélanges de polymères étaient principalement destinés à améliorer la ténacité et la processabilité des matériaux. D'autres améliorations sont toutefois possibles, à savoir l'augmentation de la température de déformation à chaud, de la résistance à la fissuration sous contrainte, de l'aptitude à l'induction et à la galvanisation, mais aussi une amélioration du comportement au feu. Les mélanges de polymères les plus importants sont, du point de vue application, ceux préparés par modification d'un polymère à base de styrène par une phase élastomère (caoutchouc).

### **I-5-3 Polystyrène modifié par une phase élastomère**

#### **I-5-3-1 Structure**

La capacité d'absorption et de restitution de l'énergie mécanique, résistance au choc ou résilience, des copolymères et des homopolymères à base de styrène est augmentée par modification de la matrice d'origine, par ajout de 5 à 20 % d'une phase élastomère. Il peut, par exemple, s'agir de polybutadiène PB ou d'un copolymère à base d'acrylate. Il est important que la distribution de la phase élastomère soit aussi uniforme que possible dans la matrice polymère. La figure 1.1 montre un copolymère styrène-acrylonitrile (SAN) modifié par une dispersion de nodules de polybutadiène. Il s'agit du copolymère acrylonitrile-butadiène-

styrène, plus communément appelé ABS. Ce terpolymère est l'un des représentants les plus importants de cette famille de matériaux.



**Figure I-1** : Nodules de polybutadiène (PB) finement distribués dans un copolymère styrène-acrylonitrile (SAN) = copolymère acrylonitrile-butadiène-styrène (ABS) (cliché MET d'un film ultra mince [9]).

## I-6 Acrylonitrile Butadiène Styrene (ABS)

### I-6-1 Introduction

Pour être en mesure de répondre à la demande croissante de ces matériaux plastiques, tout en continuant à améliorer leurs précieuses propriétés, la science et l'industrie ont développé une série de nouveaux polymères qui sont les copolymères.

La combinaison de deux ou plusieurs polymères de natures chimiques et de propriétés physiques différentes, permet d'avoir dans certains cas des matériaux d'intérêt pratique avec des performances supérieures aux produits de départ. Cette technique a été employée durant les dernières décennies pour améliorer les propriétés physiques comme la résistance aux chocs, la flexibilité et la stabilité thermique.

Il existe aussi un gros marché des copolymères de l'acrylonitrile comme le styrène/acrylonitrile (SAN), et l'acrylonitrile-butadiène-styrène (ABS), qui sont utilisés comme thermoplastiques. Ce marché du terpolymère d'acrylonitrile, de butadiène et de styrène (ABS) enregistre actuellement une forte croissance de la demande notamment en raison de la multiplication de ses applications dans des secteurs tels que l'automobile, l'électronique, le jouet ...

Par conséquent, les principaux producteurs d'ABS, tels que Sabic Innovative Plastics, Lanxess et Ineos ont annoncé des augmentations de leur capacité de production notamment en Inde et en Chine, marchés qui représentent les plus fortes croissances. L'auteur présente également les capacités de production européennes d'ABS en 2007 [10].

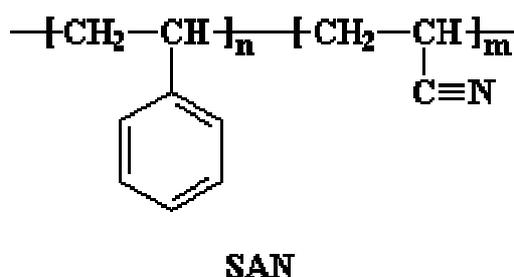
### 1-6-2 Identification du matériau

Chimiquement, ce thermoplastique de la famille des matières plastiques est donc appelé "terpolymère", dans la mesure où il est la combinaison de trois différents monomères pour former un seul matériau qui puise dans les propriétés des trois. L'ABS possède une remarquable résistance aux chocs et à haute résistance mécanique. En outre, l'ABS a une bonne stabilité dimensionnelle et des propriétés d'isolation électrique.

L'ABS, constitue une famille de copolymères à usage technique du fait de ses propriétés physiques et chimiques élevées : rigidité, résistance à de nombreux agents chimiques, très utilisé dans les véhicules qui nécessitent un faible poids et une résistance élevée aux chocs.

D'abord on parle du styrène/acrylonitrile (SAN) puis d'acrylonitrile-butadiène-styrène (ABS), du fait que l'ABS est fabriqué à partir de branches de SAN greffée sur la chaîne principale du polybutadiène.

#### 1-6-2-1 Le styrène/acrylonitrile (SAN)



**Figure I-2** : Structure styrène/acrylonitrile (SAN).

Le SAN est un copolymère statistique du styrène et de l'acrylonitrile. Mais l'ABS est plus compliqué. Il est fabriqué par polymérisation du styrène et de l'acrylonitrile en présence du polybutadiène. Le polybutadiène a des doubles liaisons carbone-carbone, qui peuvent polymériser aussi. Donc on termine avec une chaîne de polybutadiène avec des chaînes de SAN greffées dessus, comme vous pouvez le voir sur la figure I-4.

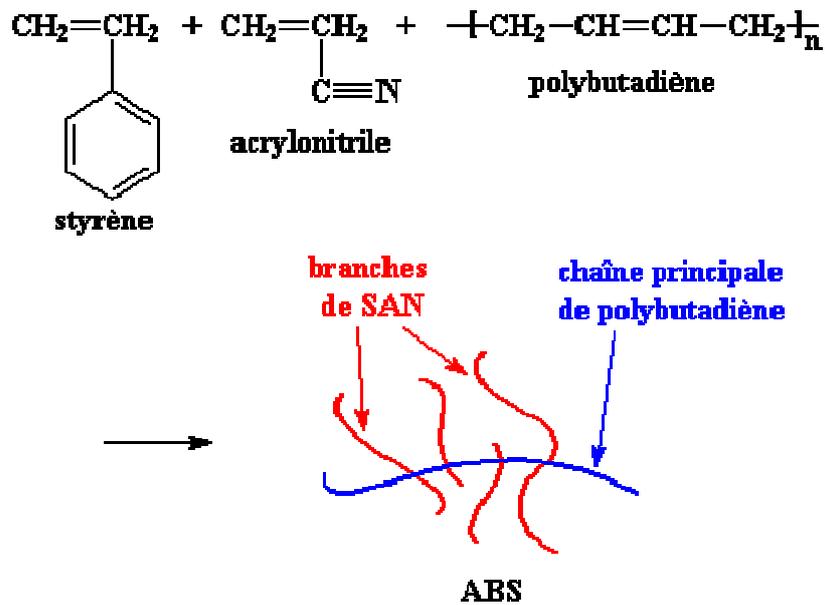


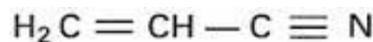
Figure I-3 : Structure d'acrylonitrile/butadiène/ styrène (ABS).

### 1-6-3 Monomères constitutifs

Les polymères ABS sont une famille unique de technopolymère. Leur nom est représenté par les initiales des trois monomères qui le constituent. L'Acrylonitrile qui apporte la résistance thermique au vieillissement, le Butadiène qui contribue à la conservation des propriétés aux basses températures, à la ténacité et à la résistance aux coup ; le Styrène donne la luminosité, la rigidité et la facilité au travail.

L'ABS est fait à partir des monomères suivants :

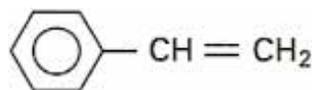
- Acrylonitrile:



- Butadiène:

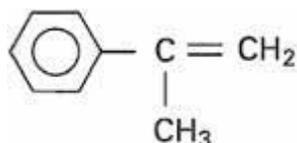


- Styrène :



Pour améliorer sa tenue thermique, un quatrième monomère l'alpha-methylstyrène est incorporé. On parle alors de d'ABS Chaleur [11].

•  $\alpha$ -Méthylstyrène :



### I-6-3-1 Proportion des Monomères constitutifs

Les ABS sont obtenus par copolymérisation de styrène (comonomère majoritaire), de butadiène et d'acrylonitrile, avec éventuellement un quatrième comonomère conférant des propriétés particulières.

Les proportions des -différents monomères varient d'un ABS à l'autre :

**Acrylonitrile** de **15** à **35%**.

**Butadiène** de **5** à **30%**.

**Styrène** de **40** à **60%**.

Un ABS est essentiellement caractérisé par trois propriétés physiques liés à sa composition initiale (nature et proportions des différents monomères) :

a) la **résistance au choc** est principalement fonction du taux de caoutchouc :

- ABS « mi-choc » : 10 à 14 % de butadiène ;
- ABS « choc » : 14 à 18 % de butadiène ;
- ABS « très haut choc » ou « superchoc » : 18 à 25 % de butadiène.

b) La **tenue à la chaleur** est fonction de la composition de la matrice (si le taux de caoutchouc n'excède pas 15 %) :

- ABS « standard » : matrice en poly(styrène/acrylonitrile) SAN.
- ABS « mi-chaleur » : matrice SAN + 10 % d'  $\alpha$ -méthylstyrène.
- ABS « super-chaleur » : matrice SAN + 40 % d'  $\alpha$  méthylstyrène.

c) La **fluidité** est fonction du taux de butadiène et de la fluidité intrinsèque de la matrice, elle-même directement déterminée par la masse molaire de la matrice.

Chaque type d'ABS correspond à un compromis entre ces trois propriétés auxquelles on ajoute la brillance et la rigidité [11].

### 1-6-4 Copolymérisation : Mélange

L'ABS est composé de deux éléments essentiels : la matrice, qui est généralement un copolymère d'acrylonitrile/styrène (ou/et  $\alpha$ -méthylstyrène), et un caoutchouc copolymère de butadiène/styrène/acrylonitrile dispersé dans la matrice.

- La matrice est obtenue le plus couramment par polymérisation en suspension ou par polymérisation continue en solution.
- La phase élastomérique (caoutchouc) est en général synthétisée par polymérisation en émulsion, ou éventuellement par polymérisation en suspension en deux étapes : on fabrique d'abord des « nodules » de polybutadiène ayant une granulométrie et un taux de réticulation bien définis, qui sont ensuite greffés avec des copolymères styrène/acrylonitrile. Le résultat est un latex qui est ensuite stabilisé avant *coagulation* (séparation de la phase aqueuse), lavage et séchage. Le produit final est une poudre ou bien des billes dans le cas d'une polymérisation en suspension.

Pendant l'étape suivante de compoundage, le caoutchouc greffé et la matrice ainsi que divers additifs sont mélangés à l'état fondu pour obtenir le produit fini avec les propriétés nécessaires à l'utilisation finale. Les additifs conférant des propriétés particulières sont des lubrifiants, des pigments, des charges renforçantes, des agents antistatiques, des stabilisants, des ignifugeants, des agents porogènes [11].

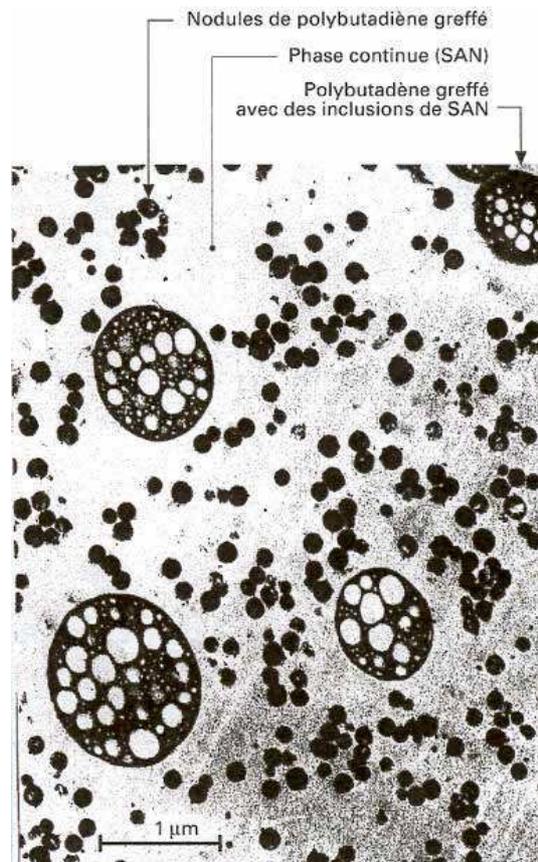
#### ❖ Autre procédé

Depuis quelques années, certains producteurs ont développé un procédé où la matrice et le caoutchouc sont produits en une seule étape par polymérisation continue en solution.

Le produit final est un ABS « plus propre » (c'est-à-dire contenant moins d'impuretés de polymérisation), éventuellement utilisable tel quel à la sortie du réacteur. Ce type de procédé offre un *écobilan* plus favorable vis-à-vis de l'environnement que ceux des procédés classiques [11].

### 1-6-5 Structure des ABS

Les ABS sont des polymères amorphes biphasiques, constitués d'une phase continue ou matrice (copolymère de styrène/acrylonitrile ou SAN) et d'une phase discontinue (nodules de polybutadiène greffés de copolymères de styrène/acrylonitrile). Les greffons assurent la compatibilité matrice-nodule et confèrent de bonnes propriétés mécaniques au polymère final. La taille de ces occlusions de caoutchouc est comprise entre 0,1 et 1  $\mu\text{m}$ , voire au-delà, suivant la qualité de l'aspect de surface et la résistance au choc requises (figure 1.5).



**Figure I-4 :** Vue d'un ABS au microscope électronique à transmission [11].

Cette structure biphasique confère au matériau une très bonne tenue au choc car les nodules initient alors de multiples microcraquelures, ce qui consomme de l'énergie, de plus la propagation d'éventuelles fissures (microcraquelures devenues macrocraquelures) est ralentie voir stoppée par ces mêmes nodules [11].

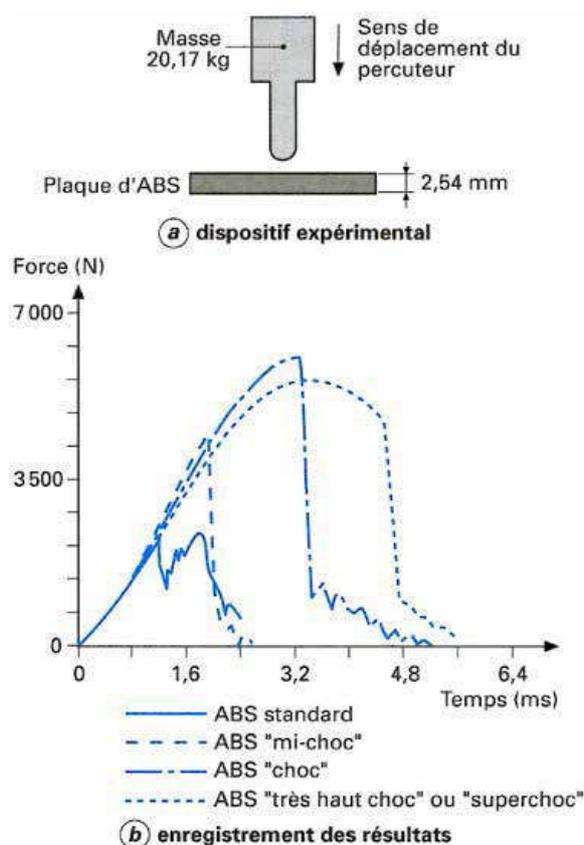


Figure I-5 : Caractéristiques des ABS en choc multiaxial selon la méthode ISO 6603-[11].

### 1-6-6 Propriétés

L'ABS a été fourni par la firme STATASYS au laboratoire de Metz et ces principales caractéristiques sont mentionnées dans le tableau ci-dessous.

Propriétés	ABS
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	1,03/1,07
Module d'Young (MPa)	2200/3000
Résistance en traction (MPa)	45/65
Conductivité thermique (W/M°K)	0,18
Température de fusion Tf (°C)	
Température de transition vitreuse Tg (°C)	-85°C/95-105°C

Tableau I-1 : Quelques propriétés d'un Acrylonitrile Butadiène Styrène ABS (\* : à la température ambiante) [11].

### **I-6-7 Applications**

Les applications des ABS sont très variées en raison de l'ensemble des propriétés de ces thermoplastiques : bonne tenue à la chaleur, résistance au choc élevée et rigidité, sa stabilité dimensionnelle et son aptitude à la décoration. C'est surtout le matériau privilégié pour le prototypage rapide, les appareils électroménagers, la téléphonie, le matériel informatique, le jouet, les carters d'aspirateurs. Dans ce cas il s'agit le plus souvent de pièces moulées.

#### **a) Prototypage**

L'ABS matériau pour prototypage rapide intègre trois notions essentielles : le temps, le coût et la complexité des formes.

\* Temps : l'objectif du prototypage rapide est de réaliser rapidement les modèles, dans un but de réduction des temps de développement des produits.

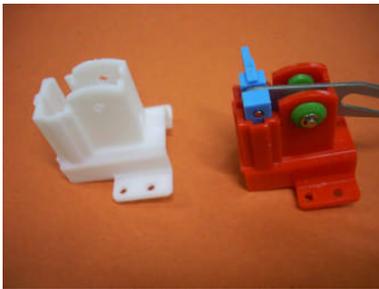
\* Coût : le prototypage rapide permet de réaliser des prototypes sans qu'il soit nécessaire de recourir à des outillages coûteux, tout en garantissant les performances du produit final. On est donc en mesure d'explorer différentes variantes du produit en cours d'élaboration afin de retenir la solution la plus appropriée.

\* Complexité des formes : les machines procédant par ajout de matière sont capables de réaliser des formes extrêmement complexes (inclusion, cavité...), irréalisables par des procédés tels que l'usinage par exemple.

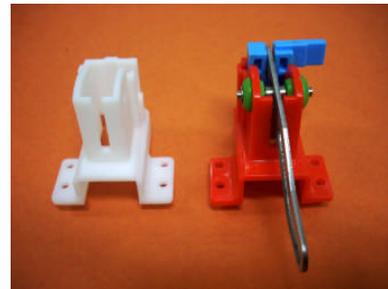
L'imprimante 3D permet littéralement d' "imprimer en quelques minutes ou quelques heures par dépôts de fils des modèles numériques 3 dimensions à partir de n'importe quelle logiciel CAO ou scanner 3D, c'est-à-dire en générer un modèle physique en plastique ABS, précis, à des fins de validation fonctionnelle. Le tout sans moule, ni cire ou poudre, ni manipulation particulière (figure I-6).



**Figure I-6 :** Imprimante en 3D  
Vue de la machine [12].



**Figure I-7 :** Vue de face du guide. [12]



**Figure I-8 :** Vue de profil du guide[12].



**Figure I-9 :** Agrafeuse électrique (système commercialisé) [12].

### **b) Automobile**

Dans le domaine de l'automobile, très utilisé dans les véhicules qui nécessitent un faible poids et une résistance élevée aux chocs, suffisamment résistant pour être utilisé pour la fabrication de certaines parties de la carrosserie des voitures.

Il y a en moyenne 9 à 10 kg d'ABS par automobile produite actuellement en Europe. Les principales pièces en ABS se trouvent dans les parties du tableau de bord telle la console d'instruments de bord, ainsi que dans les orifices de ventilation, les consoles inférieures, les éléments du système de chauffage ou d'air conditionné, les poignées de porte, les grilles de calandre éventuellement chromées, les rétroviseurs interne et externe, les boîtiers des phares arrière, etc [11].

#### ❖ À l'intérieur de la voiture

Les pièces sont généralement d'aspect mat, ce qui fait appel à des techniques particulières de polymérisation. On privilégie la résistance à la chaleur si la pièce est placée en haut de l'habitacle, soumis à l'exposition solaire, les surfaces vitrées des voitures ayant fortement augmenté ces dernières années.

#### ❖ À l'extérieur

On peut citer à titre d'exemple les grilles de radiateur, qui doivent combiner une excellente tenue thermique à une résistance au choc élevée.

Ces dernières années, les ABS se sont trouvés concurrencés par les polypropylènes, meilleur marché. La quantité d'ABS par voiture est cependant restée stable en raison de meilleures propriétés de celui-ci, en particulier sa résistance à la rayure.

Dans l'industrie automobile, la recyclabilité est de plus en plus un critère primordial pour le choix d'un matériau. L'ABS est l'un des plastiques le plus facilement recyclables utilisés dans l'automobile. De plus, le rapport du coût de la matière recyclée au coût de la matière vierge est nettement plus bas que pour d'autres polymères (par exemple, le polypropylène.

#### **c)Électroménager**

Pour ce marché particulier, les propriétés recherchées sont diverses et dépendent de l'application. Par exemple, on privilégie la tenue thermique pour les fers à repasser, la résistance au choc et la brillance pour les aspirateurs, la rigidité pour les machines à coudre.

#### **Exemples d'applications**

- pièces frontales ou internes de réfrigérateurs, de machines à laver, etc.
- machines à coudre.
- aspirateurs.

- robots de cuisine.
- fers à repasser.
- percolateurs et moulins à café.

En cas de contact avec les aliments, les taux de monomères résiduels dans les ABS doivent être contrôlés et les adjuvants (pigment, stabilisant, lubrifiant) correctement choisis pour être conformes à la législation européenne.

#### **d) Machines de jardinage et outillages divers**

En plus des tondeuses à gazon qui nécessitent une excellente tenue au choc, on peut citer différents outils, tels que perceuses, meuleuses, ponceuses, pour lesquels on privilégie la rigidité, la tenue à la chaleur, et parfois la couleur qui peut être un véritable label pour certains fabricants [11].

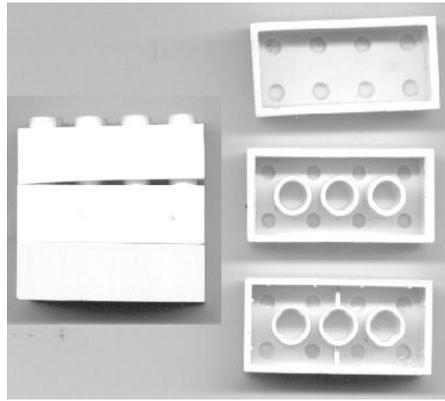
#### **e) Machines de bureau et support de données**

Ce marché s'est considérablement développé ces dernières années. On peut citer les boîtiers d'ordinateur, les claviers, les imprimantes, les souris, les dictaphones, les machines à calculer, pour lesquels l'aspect, la résistance à la rayure et à la tenue thermique des ABS sont déterminants. Les disquettes d'ordinateur sont également en ABS, le polystyrène, moins coûteux, prenant progressivement la partie *bas de gamme* de ce marché très concurrentiel

#### **f) Jouets, sports et loisirs**

Le caractère incassable et inaltérable de l'ABS est un atout pour le marché du jouet de qualité. En sport et loisirs, voici quelques exemples d'applications : revêtement de skis, bateaux, casques de sportif, etc.

Le fabricant de jouets danois Lego l'utilise pour fabriquer ses fameuses briques de construction. Ceci est une des particularités qui leur confèrent d'ailleurs leur qualité.



**Figure I-10** : Brique de base Lego. La première, datant d'avant 1958 est en acétate de cellulose, les deux autres en ABS.



**Figure I-11** : Lego bricks.

## 1-7 Notions sur l'essai de traction

### 1-7-1 Essais Mécaniques

Les essais mécaniques constituent la plus ancienne discipline des essais de matériaux et leur importance n'a cessé de croître. D'ailleurs certaines caractéristiques peuvent être déterminées par ces essais et notre présent travail sera consacré aux essais de traction.

### 1-7-2 Essais de traction

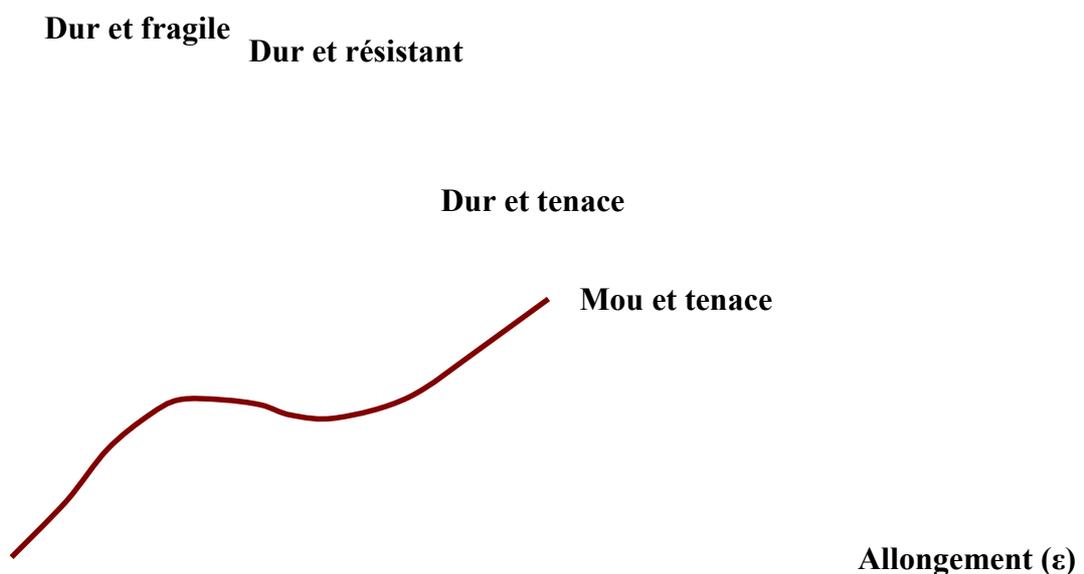
La traction offre l'avantage de proposer un système de contrainte simple. Cependant, dans la plupart des conditions, l'éprouvette testée présente une instabilité géométrique qui conduit à une striction après la limite élastique  $\sigma_e$ . Néanmoins, nous avons utilisé cette technique pour étudier le comportement de notre matériau aux différentes températures et aux différentes vitesses de déformation.

L'essai de traction uniaxiale permet la détermination des caractéristiques mécaniques telles que la contrainte à rupture des échantillons, la déformation à rupture ou bien encore le module d'Young des matériaux .

### 1-7-3 Rappel théorique

Les propriétés mécaniques des matériaux sont d'un grand intérêt, puisqu'elles conditionnent non seulement les problèmes de mise en forme des matériaux, mais également leur comportement en service dans des applications industrielles extrêmement diversifiées. Le choix du matériau d'une pièce industrielle dépendra des propriétés mécaniques comme la résistance, la dureté et la ductilité. Il est donc nécessaire de mesurer ces grandeurs physiques, par des essais mécaniques. L'essai de traction est le procédé expérimental le plus largement utilisé dans l'étude du comportement mécanique des matériaux, il permet de déterminer qualitativement si un matériau est fragile ou ductile rigide ou souple. Il aide aussi à quantifier certaines propriétés mécaniques, telles que le module d'élasticité, la résistance maximale ou la contrainte et l'allongement à la rupture en traction, suivant la nature du matériau [KERGUIGNAS M, CAIGNAERT G ; 1977] [4]. (Figure I- 12).

**Contrainte ( $\sigma$ )**



**Figure I-12** : Courbe contrainte-allongement de différents polymères.

#### 1-7-4 Principe de l'essai de traction

L'essai de traction est réalisé sur une machine de traction (Figure I.13) consiste à exercer sur l'éprouvette étudiée une force de traction et mesurer son allongement.



Figure I-13 : Machine de traction.

Une simple courbe contrainte-déformation constituera un bon élément de base pour connaître le comportement mécanique d'un matériau donné.

Pour une éprouvette ductile de longueur initiale  $l_0$  et de section initiale  $S_0$ , la courbe contrainte-déformation pour une expérience de traction uniaxiale est donnée sous la forme suivante (figure I.14) :

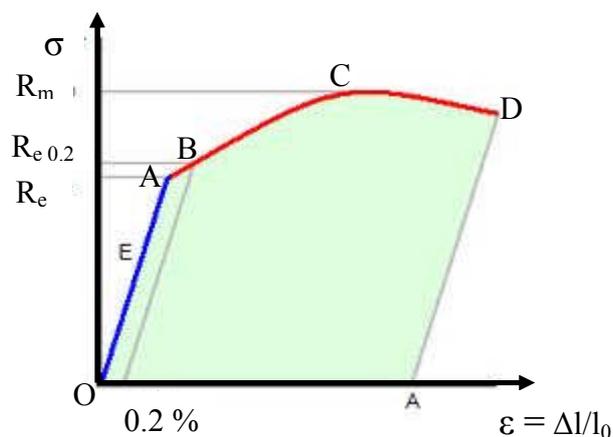


Figure I-14 : Courbe contrainte-déformation pour une traction uniaxiale d'un matériau ductile.

$\sigma$  : contrainte, MPA  $\sigma$  contrainte = F Force / S Surface.

F : force, N.

$\varepsilon$  : déformation =  $\Delta l / l_0$  ;  $\Delta l$  est l'allongement.

$R_e$ : limite apparente d'élasticité.

La droite OA correspond à la déformation élastique totalement réversible: quand les forces sont appliquées sur le corps, celui-ci change sa forme, mais retrouve sa forme initiale quand les formes extérieures sont retirées.

La relation entre la contrainte et la déformation (loi de Hooke), est définie par la théorie d'élasticité linéaire des milieux continus; les deux principales hypothèses de cette théorie sont:

1. Les propriétés du corps sont homogènes et ne varient pas d'un point à l'autre
2. Elles sont les mêmes dans toutes les directions, cette deuxième hypothèse implique que le matériau est isotrope.

D'où cette relation est :  $E = \sigma / \varepsilon$  ; E est le module d'Young (module d'élasticité), il représente la pente de la droite OA.

$R_e$  : contrainte à la limite élastique, correspond au seuil d'écoulement plastique (MPa). Quand OA n'est pas rectiligne, on doit utiliser la limite conventionnelle d'élasticité  $R_{e0.2}$  qui correspond à un allongement plastique de 0.2%.

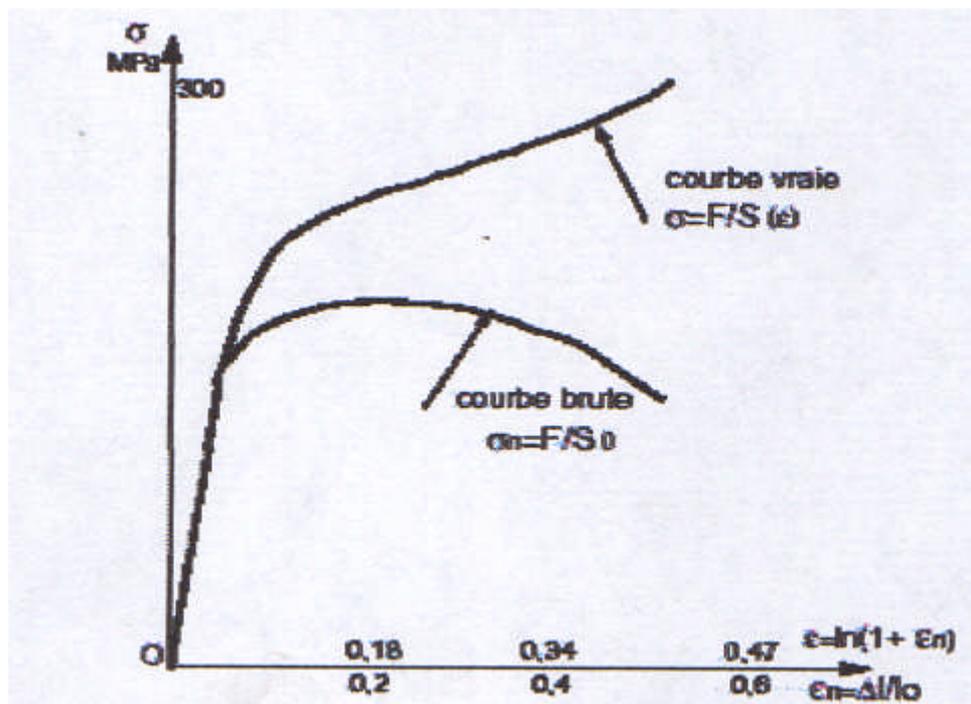
La courbe AC est le domaine de déformation plastique homogène (déformation visqueuse): si on supprime la force de traction, il y a un retour élastique suivant une parallèle à OA et il reste une déformation permanente contrairement à la déformation élastique, elle est irréversible et dépend du temps et l'état d'origine n'est pas retrouvé.

$R_e$ : la résistance à limite de traction, cette valeur est utilisée la limite d'endurance à la fatigue.

Pour CD domaine de striction: la déformation n'est pas homogène et la force nécessaire pour déformer le matériau diminue alors que l'allongement continue d'augmenter: cette instabilité est appelé instabilité plastique. La striction paraît. En D il y a rupture de l'éprouvette.

Dans la réalité, la section varie à chaque instant et s'éloigne de sa valeur initiale, il en va de même pour l'allongement relatif réel. Pour une déformation homogène, il existe des relations entre les contraintes et les déformations vraies et nominales :

$\sigma_v = \sigma_n(1 + \varepsilon_n)$  ;  $\varepsilon_v = \ln(1 + \varepsilon_n)$ . La figure I.15 montre les deux courbes vraie et nominale



**Figure I-15 :** Courbe brute (nominale) et vraie d'un matériau ductile pour une traction uniaxiale.

Le système vidéo de traction (figure I.16), à base d'un logiciel permet de visualiser sur l'écran les deux courbes vraie et nominale de la relation contrainte-déformation.

L'éprouvette est soumise à une traction avec la possibilité de faire varier la vitesse de déformation ou la température du milieu, l'existence d'un four, l'expérience permet de savoir à chaque instant les valeurs de l'allongement  $\Delta l$ , la force appliquée  $F$ , et la largeur de l'échantillon  $b$ .

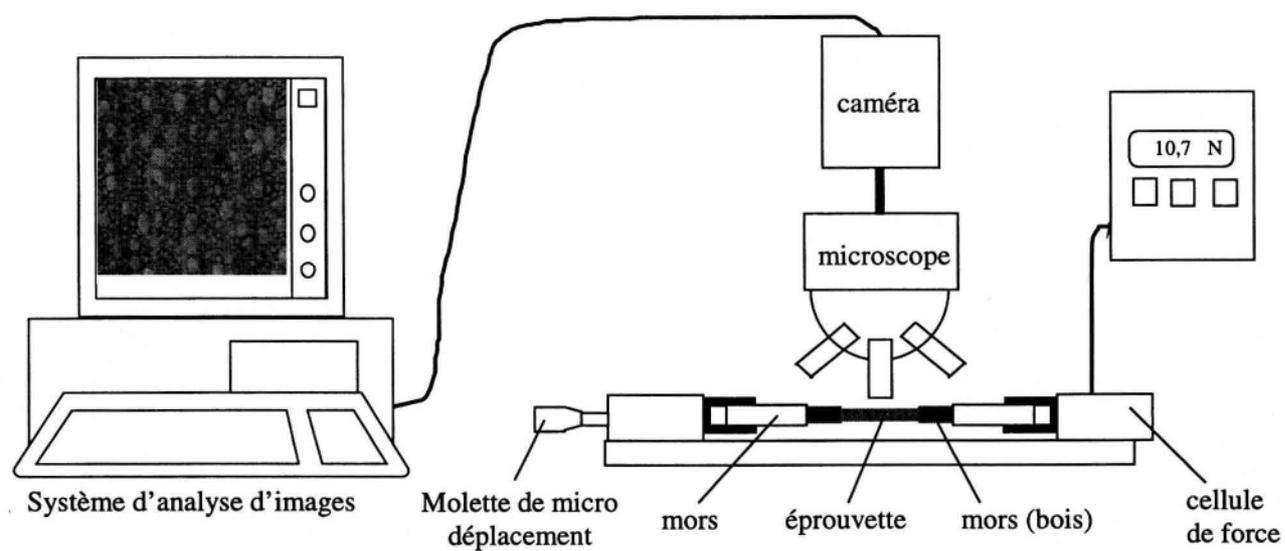


Figure I-16 : Système vidéo de traction.

## II-1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous attacherons à présenter, dans un premier temps, le matériau objet de notre étude et décrire les caractéristiques principales de nos échantillons tout en le plaçant dans son contexte industriel. Enfin, nous verrons également la technique expérimentale adoptée qui consiste en des essais de traction que nous avons faits subir aux éprouvettes d'ABS et nous allons présenter un peu plus loin. Dans le but de voir et d'étudier les effets de la température  $T$  puis ceux de la vitesse de déformation  $\dot{\epsilon}$  sur le comportement du matériau, ces étirages ont été établis selon deux protocoles. D'abord, à 50 mm/mn, nous allons faire changer la température 40°C à 75°C, puis à 20 °C la vitesse de déformation variera de 50 mm/mn à 1000 mm/mn.

Ces deux séries d'expériences ont été respectivement réalisées, d'abord, à l'Unité de Recherche Appliquée en Sidérurgie Métallurgie (URASM) et au Centre de recherche scientifique et technique en Soudage et Contrôle d'Annaba (CSC, ex DRA), puis ensuite au Laboratoire de Physique et de Mécanique des Matériaux (LPMM) de l'université de Metz (France).

## II-2 Présentation du matériau étudié

### II-2-1 Choix du matériau

Le matériau choisit pour la réalisation de nos travaux est un terpolymère : l'Acrylonitrile Butadiène Styrène (ABS). Il est utilisé généralement comme filament par le fournisseur qui est Stratasys Inc. Commande Minneapolis et porte comme référence manganese55344-2020 Etats-Unis de 14950 Martin [13]. Le matériau étudié dans ce travail est destiné pour le prototypage rapide, les appareils électroménagers, la téléphonie, le matériel informatique, le jouet, les carters d'aspirateurs dans ce cas il s'agit le plus souvent de pièces moulées.

Le produit est identifié au tableau ci-dessous :

Nom du produit	P400 ABS
Famille chimique	Styrène Terpolymer
Utilisation générale	Filament d'utilisation générale pour Stratasys ® FDM Inc. <sup>TM</sup> Modeleur
Fabricant et adresse	Stratasys Inc. 14950 Martin Drive Minneapolis, MN 55344-2020 USA

**Tableau II-1** : Identification du matériau [13].



**Figure II-1** : bobine de file en ABS.

### II-2-2 Caractéristique du matériau étudié

L'ABS a été choisi préférentiellement à d'autres polymères en raison de ces propriétés mécaniques, physiques et chimiques élevées. D'un autre côté, l'ABS est doté d'une bonne stabilité dimensionnelle, il démontre une tenue à la chaleur élevée, résiste à la rayure, et à de nombreux agents chimiques et présente surtout une très bonne résistance aux chocs. On le retrouve actuellement dans de nombreuses applications.

Le matériau étudié l'ABS se présente sous la forme d'un cylindre de longueur  $L_0 = 64\text{mm}$ , de diamètre  $d = 2.46\text{mm}$ , de densité  $1.05\text{g/cm}^3$ .

Les propriétés utilisées sont indiquées dans le tableau II-2.

Propriétés	ABS
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	1,05
Module D'élasticité par traction (N/mm <sup>2</sup> )	2000
Résistance à la rupture par traction (N/mm <sup>2</sup> )	6.1
Allongement à la rupture par traction %	20 à60
Conductivité thermique (W/M°K)	0,14
Température de fusion Tf (°C)	-85°C/95-105°C
Température de transition vitreuse Tg (°C)	-

**Tableau II-2** : Quelques propriétés d'un Acrylonitrile Butadiène Styrène ABS (\* : à la température ambiante) [14].

### II-3 Méthode d'essais mécaniques

#### II-3-1 Essais de traction

L'essai de traction est la méthode expérimentale qui est utilisée couramment pour la détermination des comportements mécaniques des matériaux. Ces comportements sont décrits par un ensemble de relations entre les contraintes, les déformations et leur évolution au cours du temps. Dans cet essai, on exerce une force de traction sur un cylindre de longueur

$L_0 = 64$  mm, qu'on a déterminé, Car les résultats d'essai sont influencés par la précision de mesure des dimensions de l'éprouvette, Jusqu'à sa rupture.

En enregistrant la force  $F$  appliquée à l'éprouvette par la machine de traction et son allongement progressif, on remarque que l'effort fourni augmente avec l'allongement puis atteint un maximum et commence à décroître.

### II-3-1-1 Eprouvettes de traction

Nous avons utilisé des épreuves en forme d'un cylindre (figure II-2) ayant une section  $S_0=2.46\text{mm}^2$  et une longueur  $L_0=64\text{mm}$ . La figure II.2 illustre la géométrie de ces épreuves qui présente les deux caractéristiques définies précédemment.

Si on veut que ce cylindre devienne un fil il faut que sa longueur  $L$  soit supérieur au diamètre  $D$  ( $L \gg D$ ).

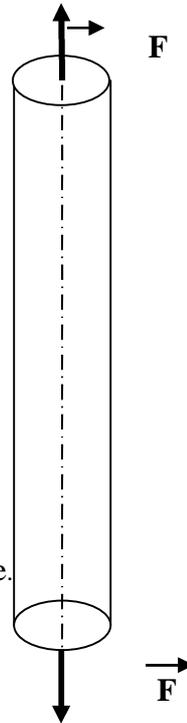


Figure II-2 : Epreuve en forme de cylindre.

### II-3-2 Dispositif expérimental

Nos deux séries d'essais de traction ont été effectuées avec des machines Zwick. La première sur une machine de type Zwick/Materiaprüfung 10 Tonnes à base d'un logiciel TestXpert, et équipée d'un four de chauffage (au niveau de la DRA, effet de T) et la deuxième Zwick/Roell fonctionnant à base d'un logiciel Testxpert (au niveau du laboratoire LPMM, effet de  $\varepsilon$ ). Elles sont pilotées par ordinateur. La figure II.1 montre la machine utilisée.

#### II-3-2-1 Description des machines des essais ou Machines de traction

##### II-3-2-1-1 Machines Zwick/Materiaprüfung

L'essai de traction a été réalisé au sein de la (DRA) sur une machine de type Zwick/Materiaprüfung 10 Tonnes, c'est une machine universelle et flexible, vu à sa longueur 1.12m et son poids, elle est pilotée par ordinateur. Le Pc et le logiciel correspondant assurent le traitement des valeurs mesurées et le contrôle du déroulement des essais.



**Figure II-3 :** Photo de la machine de traction  
ZWICK /Materiaprüfung.

Pour chauffer notre éprouvette nous avons mis un dispositif de chauffage adéquat (figure II-4) ou la température est repérée, à son contact, par un thermocouple, la sonde de température NiCrNi Livrée avec câble de raccordement (1,5 m) et connecteur mâle. Plage de mesure:  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $+1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  (figure II-5).



**Figure II-4 :** Dispositif expérimentale.



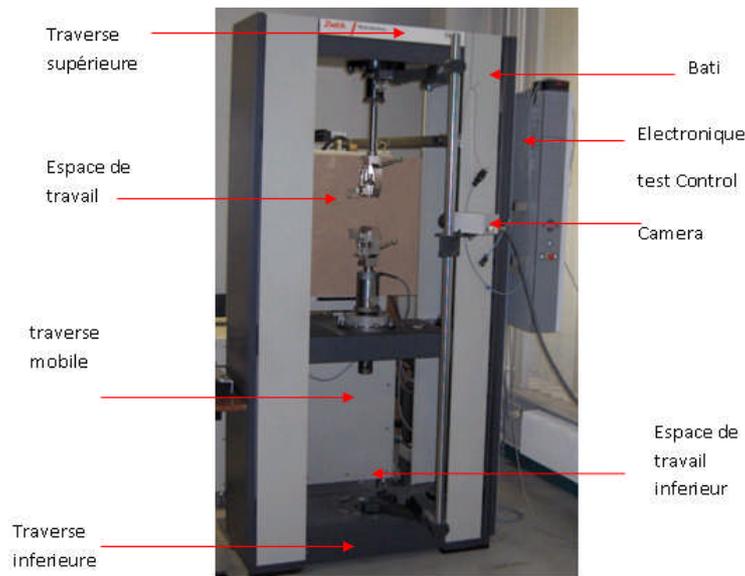
**Figure II-5 :** Thermocouple 666 193 Sonde de température NiCrNi [15].

### II-3-2-1-2 Machines Zwick/Roell

La machine d'essai ZWICKI Z2.5, est une machine universelle récente d'utilisation facile et flexible, grâce à sa compacité (longueur 1073 mm) et à son poids (moins de 40 Kg) on peut l'installer sur n'importe quelle table. La Zwick n'est pas seulement une machine universelle, c'est aussi un système d'essai modulaire. La machine contient une cellule de déplacement et une cellule de force, celle-ci est montée avec les amarrages supérieurs sur la traverse mobile (en forme de col de cygne) qui se déplace selon un guidage sans jeu. Avec un extensomètre à grande course mécanique permet de mesurer des déformations importantes sur les plastiques, caoutchoucs et élastomères, mousses, films et feuilles fines, dont la résistance est supérieure à 20 N. Système robuste et insensible, particulièrement adapté aux éprouvettes caoutchouc et élastomère, susceptibles de s'enrouler autour des bras du palpeur après la rupture de l'éprouvette, leurs avantages sont :

- robustesse et simplicité d'utilisation, spécialement développé pour les caoutchoucs et élastomères.
- mesure de la déformation jusqu'à rupture, reconnaissance automatique par prise intelligente.
- bras de palpeur interchangeable , mesures en enceintes thermiques et climatiques.

La Zwick peut être commandée manuellement grâce au perpêtre de commande manuelle ou par ordinateur (utilisation du logiciel TestXpert). Le Pc et le logiciel correspondant assurent le traitement des valeurs mesurées et le contrôle du déroulement des essais [16].



**Figure II-6 :** Photo de la machine de traction ZWICK /Roell.

### II-3-2-1-3 Logiciel de pilotage

TestXpert est un logiciel d'essai universel pour tests, utilisé depuis 1996 sur matériaux, composants ou pièces fines .La plage d'utilisation du logiciel TestXpert couvre les machines d'essais traditionnelles de la gamme ZWICK (machine de traction, compression, flexion et machines universelles) [16].

### II-3-3 Etapes de l'essai

La méthode de traction nécessite les étapes suivantes qui sont:

a)-il faut d'abord introduire les données relatives de l'éprouvette à tester dont : la surface  $S_0$  longueur initiale  $L_0$ , sa forme (cylindrique dans notre étude).

b)-Placer l'éprouvette dans la machine d'essai après avoir mesuré sa longueur  $L_0$ .



**Figure II-7** : Mesure des dimensions de l'éprouvette.



**Figure II-8** : Epreuve d'essai mise en place dans la machine de traction.

c)-Introduire les conditions de l'expérience (la vitesse de déformation ou la température d'essai).

d)-Démarrer la machine et la courbe s'affiche progressivement sur l'écran.

#### II-4 Essais expérimentaux

Puisque l'étude bibliographique n'est pas riche sur les caractéristiques mécaniques de l'Acrylonitrile butadiène styrène alors l'essai expérimental nous offre un choix plus détaillé pour connaître les caractéristiques mécaniques de ce matériau.

Nos essais ont été effectués en deux étapes, la première étape été de réaliser des essais à plusieurs températures et une vitesse d'étirage constante et la deuxième étape à plusieurs vitesses de déformation et a une température constante, sur des éprouvettes en ABS provenant d'une bobine qui nous a été offerte par le laboratoire de l'INSAM paris

Ce matériau ABS est le numéro un mondialement dans le prototypage.

Notre fournisseur est STRATASYS américain.

### II-4-1 Essais à plusieurs températures

Les essais ont été réalisés à l'URASM.

La traction a été exercée sur quatre éprouvettes d'ABS de section et de longueur initiale identiques, soient  $S_0 = 2,46 \text{ mm}^2$  et  $L_0 = 64 \text{ mm}$ , à des températures d'essais différentes allant de  $40^\circ\text{C}$ ,  $50^\circ\text{C}$ ,  $60^\circ\text{C}$ ,  $70^\circ\text{C}$  à un pas de  $10^\circ\text{C}$ .

Durant les essais, les éprouvettes ont été étirées à la même vitesse  $v = 50 \text{ mm/mn}$ . Par conséquent, la vitesse de déformation  $\dot{\varepsilon}$  est égale à  $13,02 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ .

Les éprouvettes ont été soumises à un dispositif de chaleur à différentes températures.

### II-4-2 Essais à plusieurs vitesses de déformation

Afin d'effectuer les essais sur la machine Zwick 1476 au niveau de l'URASM ex DRA. Nous avons effectué un essai témoin sur la machine de traction afin de s'assurer de la reproductibilité des essais.

Le PV de traction obtenu par la machine Zwick 1476 de l'URASM piloté par un logiciel testXpert II est compatible avec le PV obtenu à l'INSMA de Paris ce qui nous a permis de compléter nos essais sur cette machine.

Les expériences ont été effectuées sur onze éprouvettes d'ABS de longueurs et de surfaces identiques aux précédentes. Le matériau a subi plusieurs vitesses d'étirage correspondantes donc à différentes vitesses de déformation, cette étape s'est déroulée à l'INSMA de Paris.

La température des essais est constante  $T = 20^\circ\text{C}$ .

Ces vitesses sont quasi statiques dans une gamme avec un pas relativement constant de 100.

Pour une vitesse d'étirage choisie lors de l'essai, il est possible de calculer la vitesse de déformation suivant la relation :  $\dot{\varepsilon} = v / L_0$  ( $v$  est la vitesse d'étirage,  $L_0$  est la longueur initiale de l'éprouvette).

Pour traiter la géométrie des courbes nous avons schématisé les principaux paramètres mécaniques en étudiant leur évolution en fonction de la température et de la vitesse de déformation.

### III-1 Essais expérimentaux

Ce chapitre porte sur l'étude de l'influence de la température  $T$  et la vitesse de déformation  $\dot{\epsilon}$  sur le comportement mécanique de l'ABS et ce, sur la base des courbes obtenues.

Nos essais ont été effectués en deux étapes, la première étape été de réaliser des essais à plusieurs températures et la deuxième à plusieurs vitesses de déformation.

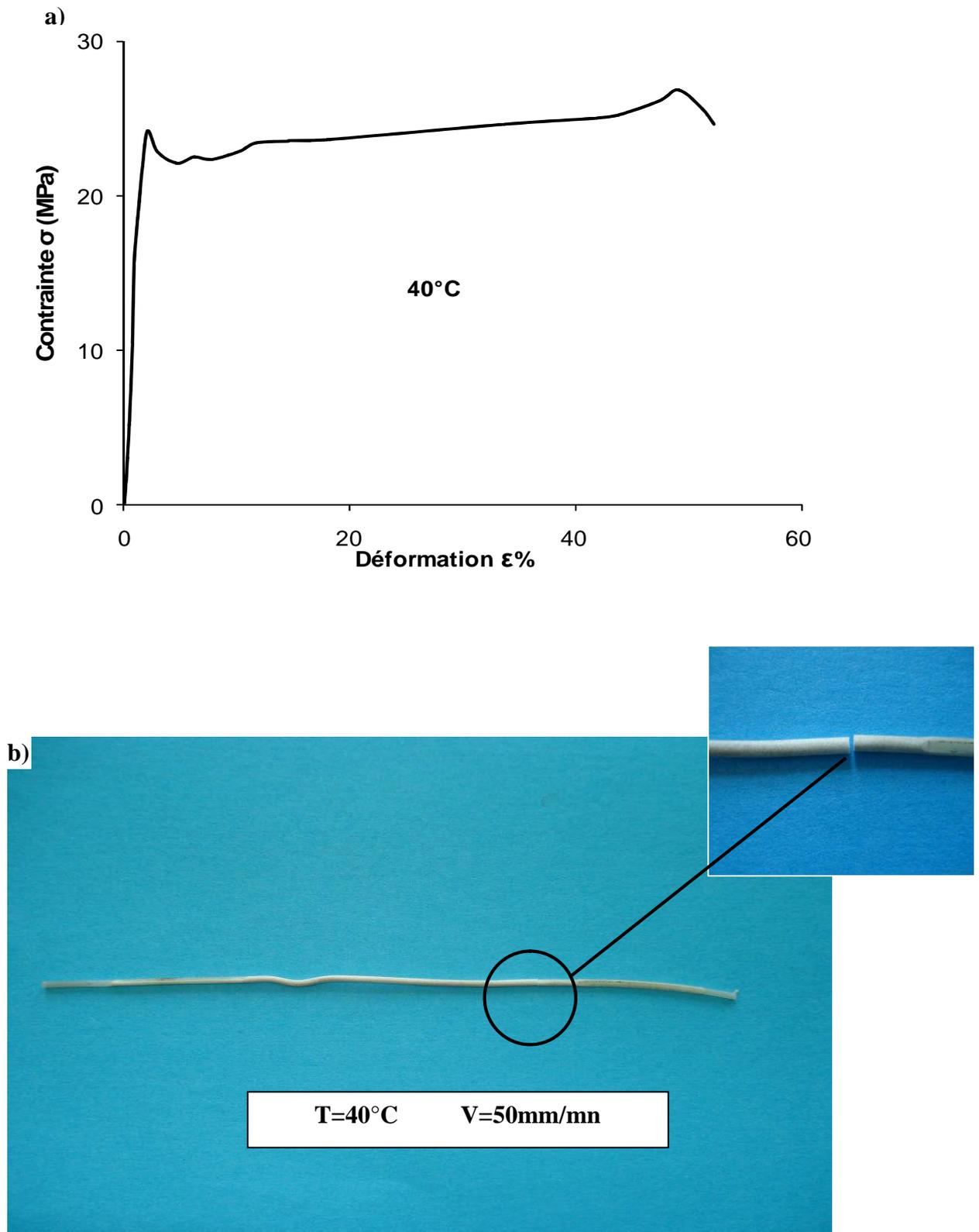
#### III-2-1 Résultats des expériences

L'ABS a montré des comportements mécaniques différents pour des variations de  $T$  et de  $\dot{\epsilon}$ , se traduisant par des courbes contrainte-déformation différentes.

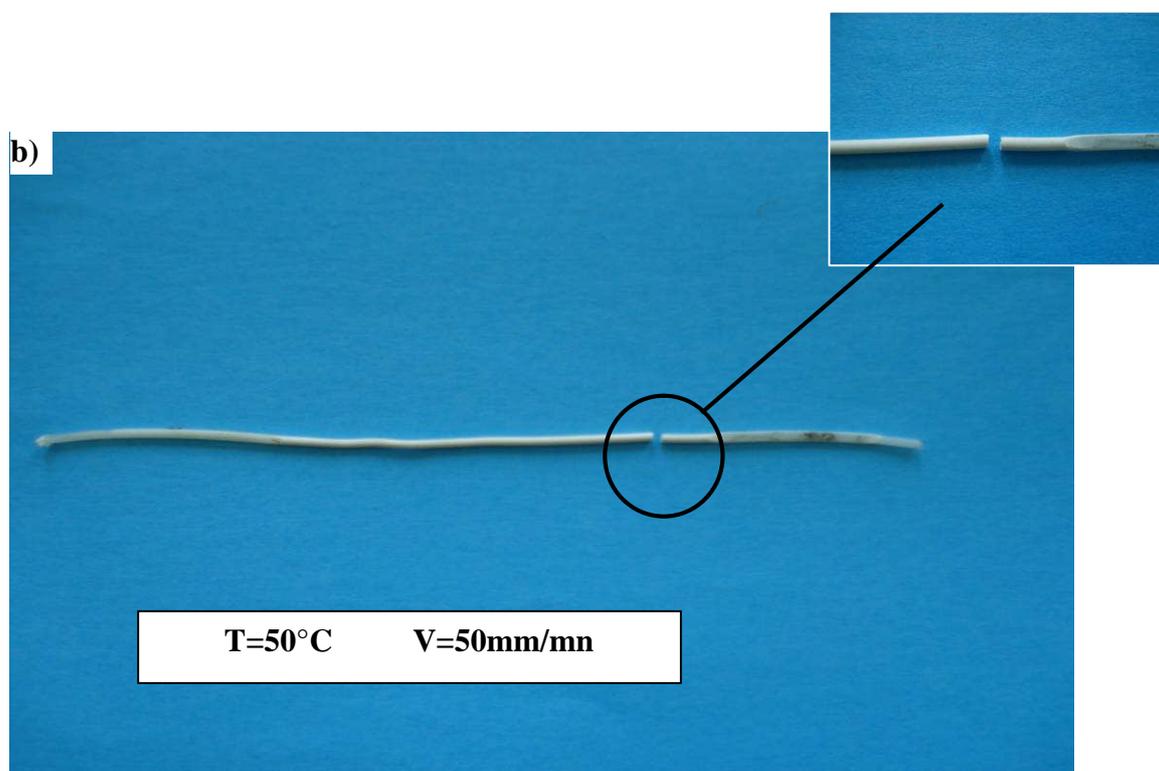
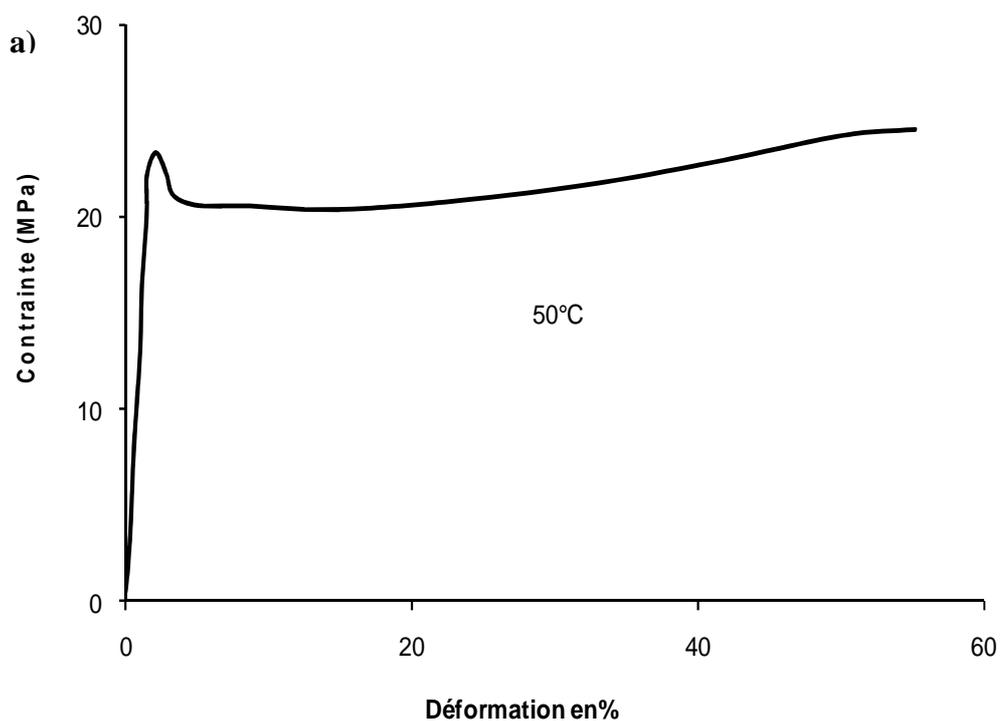
##### III-2-1-1 Résultats sous l'influence de la température

Sous l'influence de  $T$ , nous avons obtenu des résultats bruts. Les valeurs expérimentales ont été analysées en utilisant le logiciel Excel.

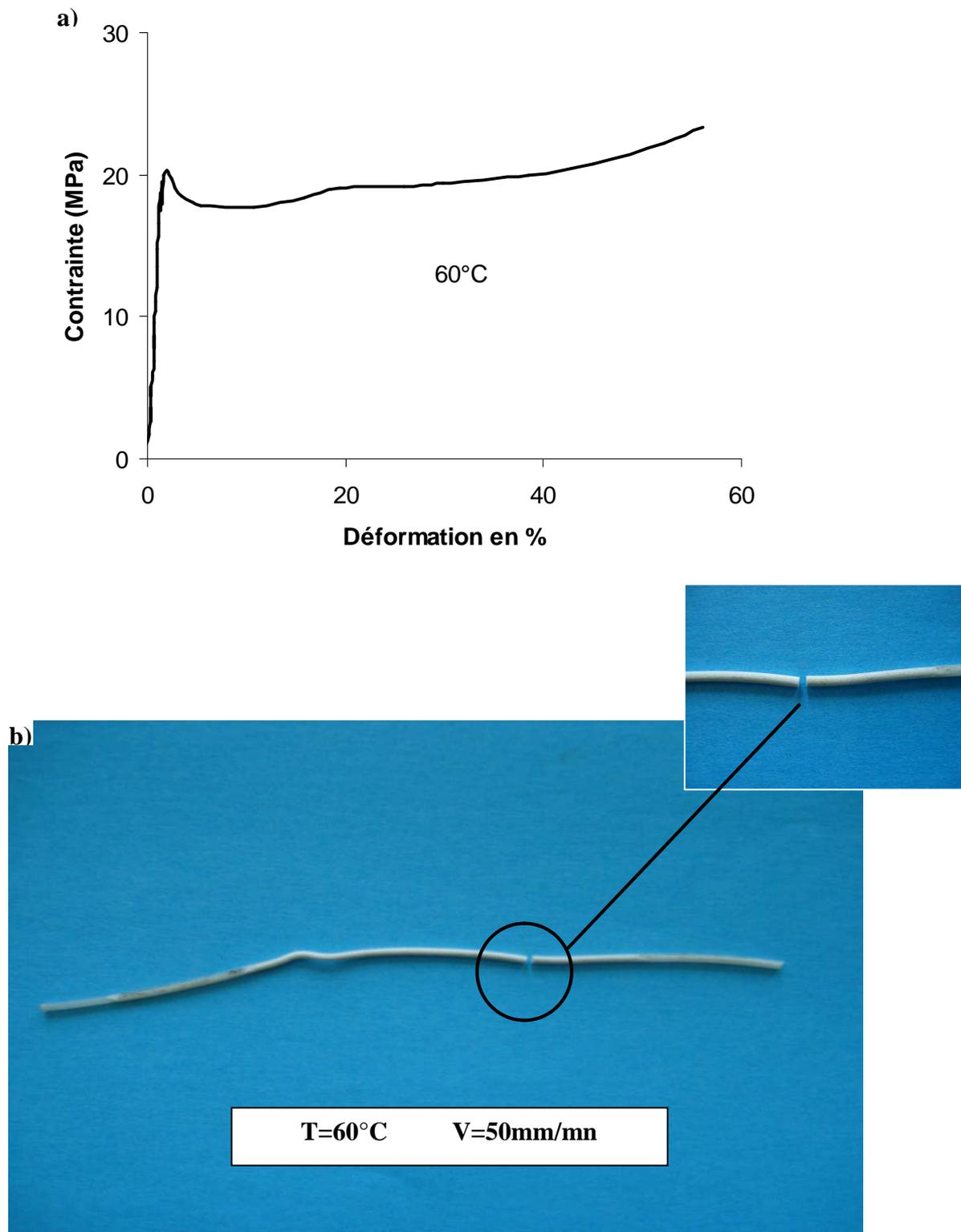
Les résultats des quatre essais aux différentes températures ou le domaine a été choisi compris entre 40 °C et 75 °C sont reportés aux figures III-1, III-2, III-3, III-4 ou nous montrons les variations de la contrainte en fonction de la déformation



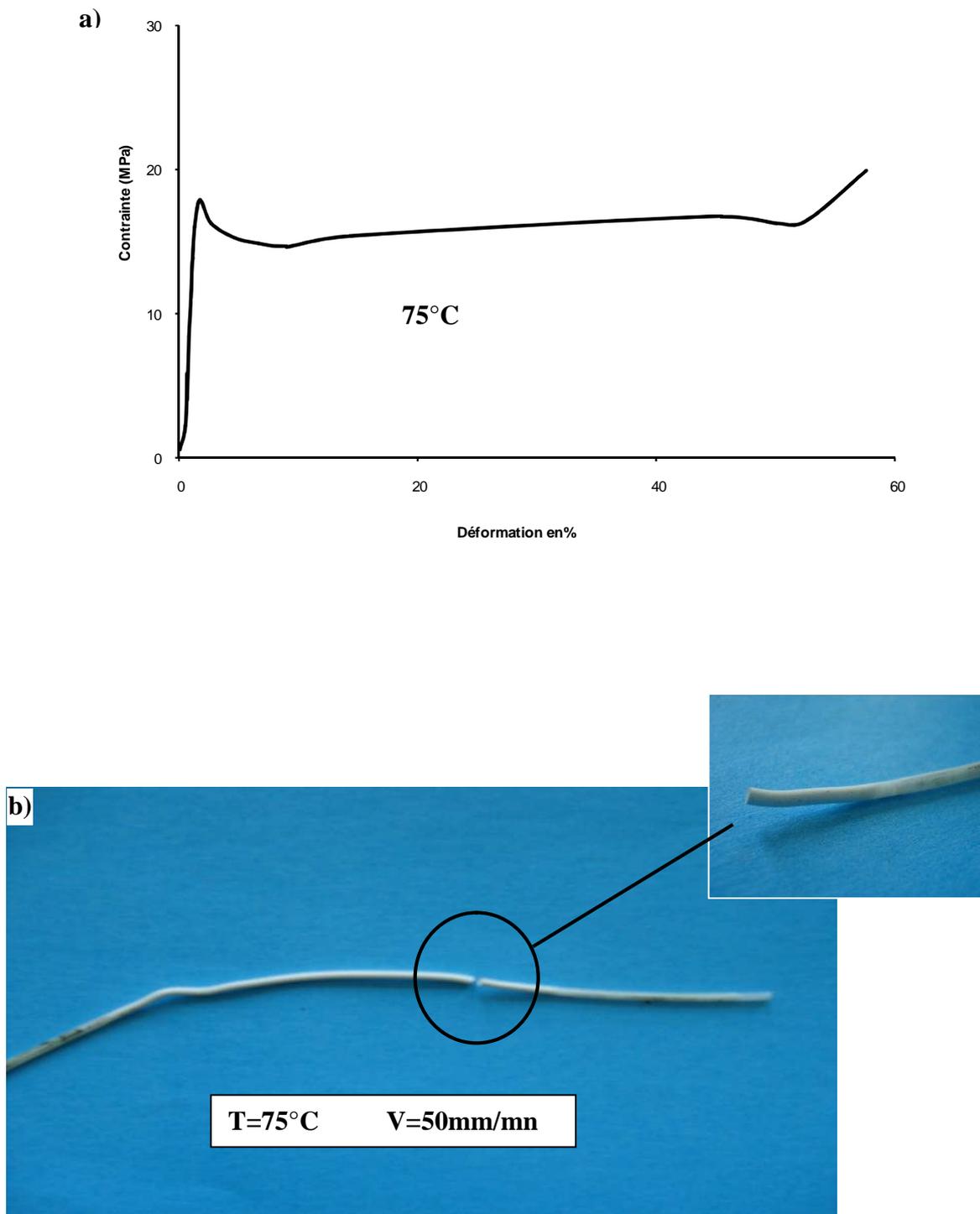
**Figure III-1:** Influence de la température ( $T=40^{\circ}\text{C}$ ) et la vitesse de déformation constante d'un ABS ( $\dot{\epsilon})= 13,02 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ : a) courbe expérimentale de traction contrainte-déformation. b) photo de l'éprouvette à la fin de l'expérience.



**Figure III-2:** Influence de la température ( $T=50^{\circ}\text{C}$ ) et la vitesse de déformation constante d'un ABS ( $\dot{\epsilon}=13,02 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ): a) courbe expérimentale de traction contrainte-déformation. b) photo de l'éprouvette à la fin de l'expérience.



**Figure III-3:** Influence de la température ( $T=60^{\circ}\text{C}$ ) et la vitesse de déformation constante d'un ABS ( $\dot{\epsilon}=13,02.10^3 \text{ s}^{-1}$ ): a) courbe expérimentale de traction contrainte-déformation. b) photo de l'éprouvette à la fin de l'expérience.



**Figure III-4:** Influence de la température ( $T=75^{\circ}\text{C}$ ) et la vitesse de déformation constante d'un ABS ( $\dot{\epsilon}=13,02 \cdot 10^{-3} \text{s}^{-1}$ ): a) courbe expérimentale de traction contrainte-déformation. b) photo de l'éprouvette à la fin de l'expérience.

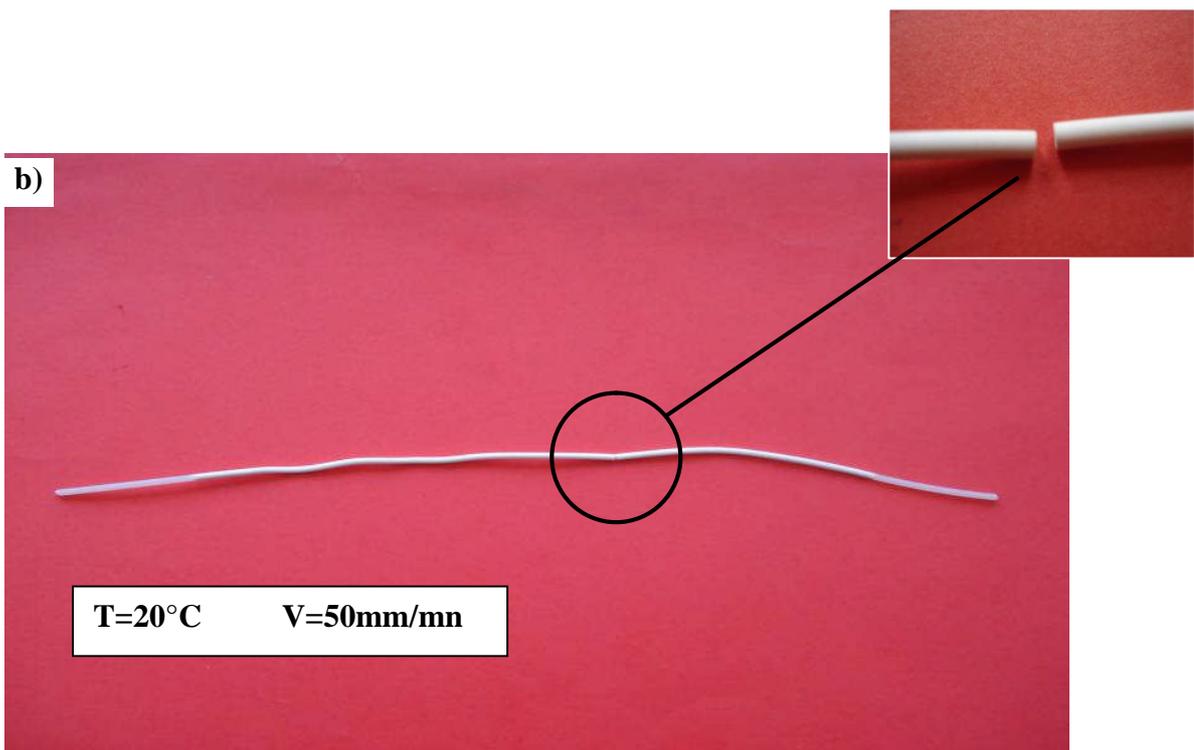
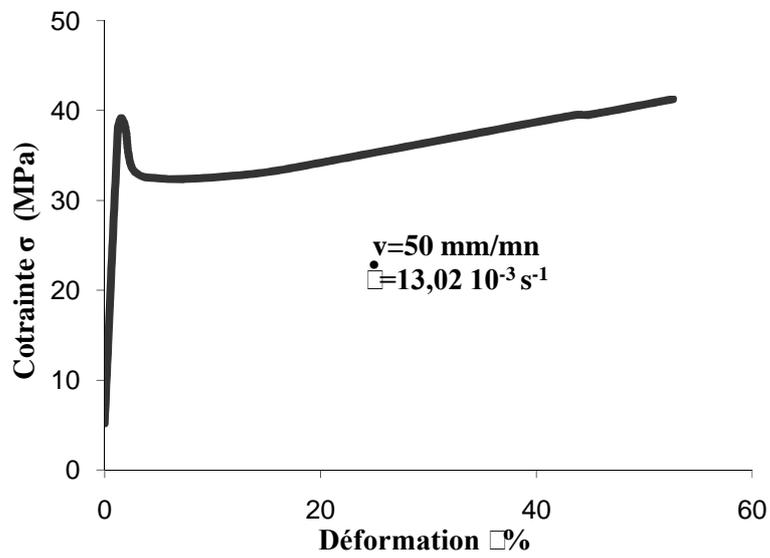
### II-1-2 Essais à plusieurs vitesses de déformation

Les expériences ont été effectuées sur onze éprouvettes de longueurs et de surfaces identiques aux précédentes. Le matériau a subi plusieurs vitesses d'étirage correspondantes donc à différentes vitesses de déformation. La température des essais est  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

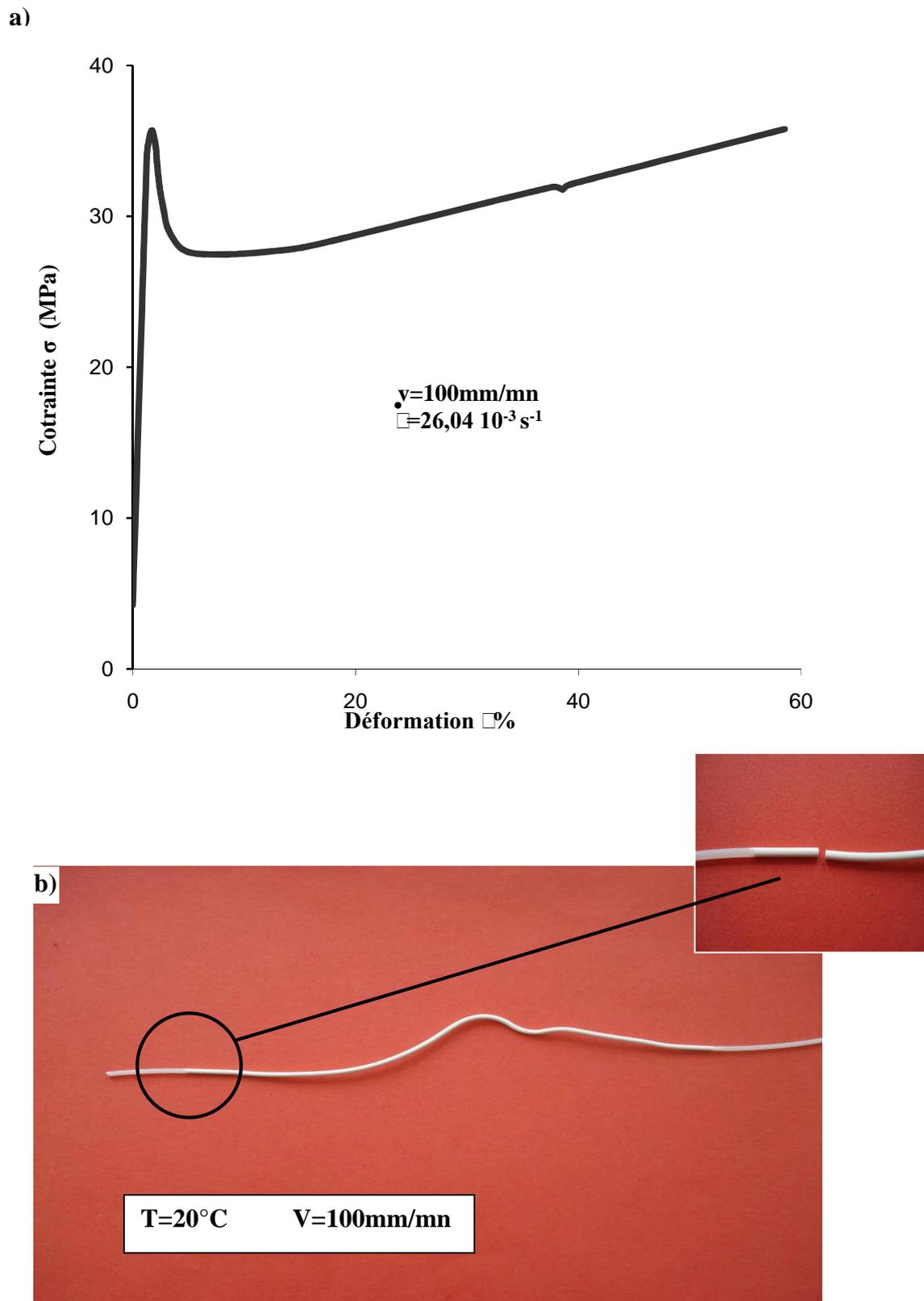
Pour une vitesse d'étirage choisie lors de l'essai, il est possible de calculer la vitesse de déformation suivant la relation  $\dot{\epsilon} = v / L_0$  ( $v$  est la vitesse d'étirage,  $L_0$  est la longueur initiale de l'éprouvette).

Nous avons représenté aux figures III-5, III-6, III-7, III-8, III-9, III-10, III-11, III-12, III-13, III-14, III-15, les résultats obtenus des essais de traction aux différentes vitesses de déformation à une température constante égale à  $20^{\circ}\text{C}$ . Où nous montrons les variations de la contrainte en fonction de la déformation.

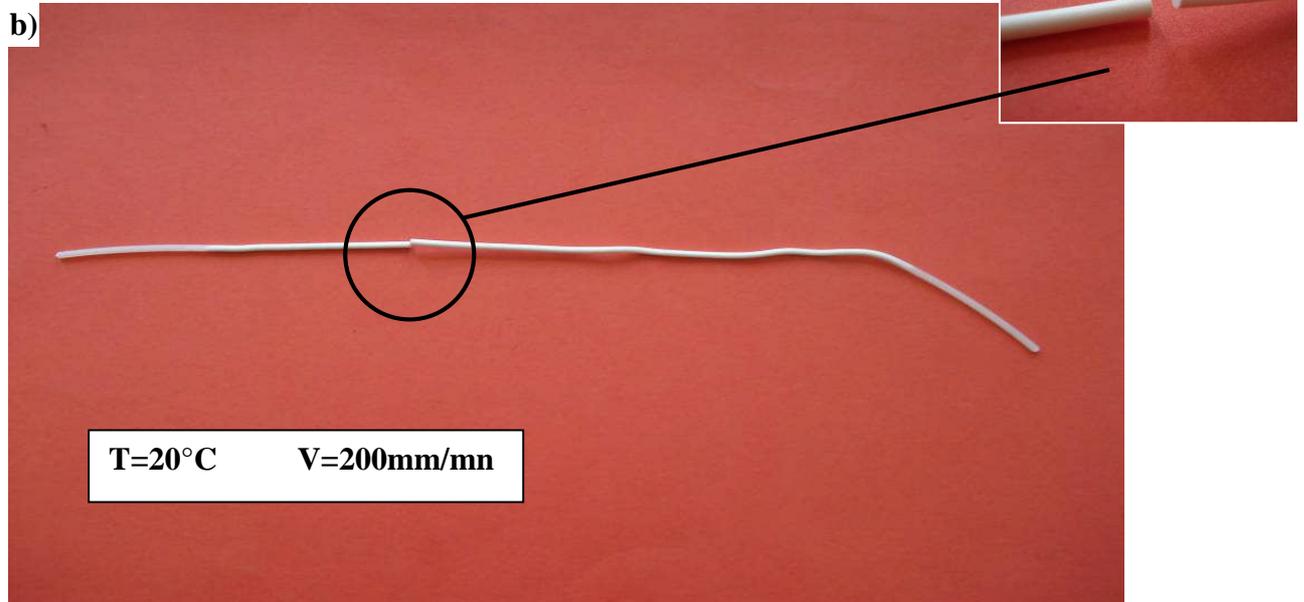
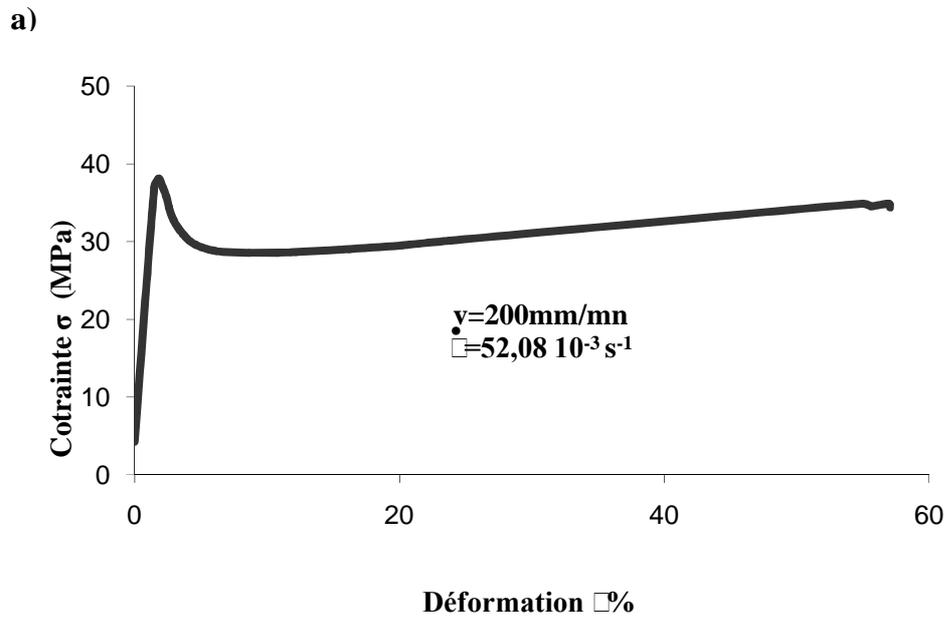
a)



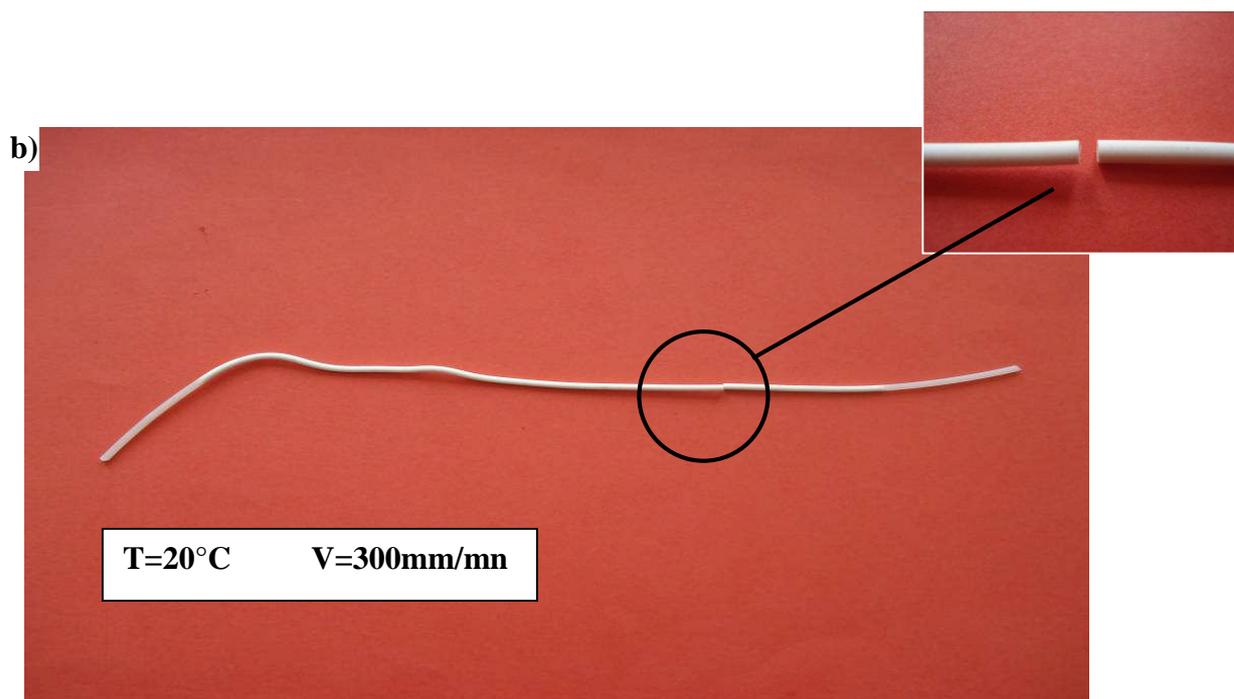
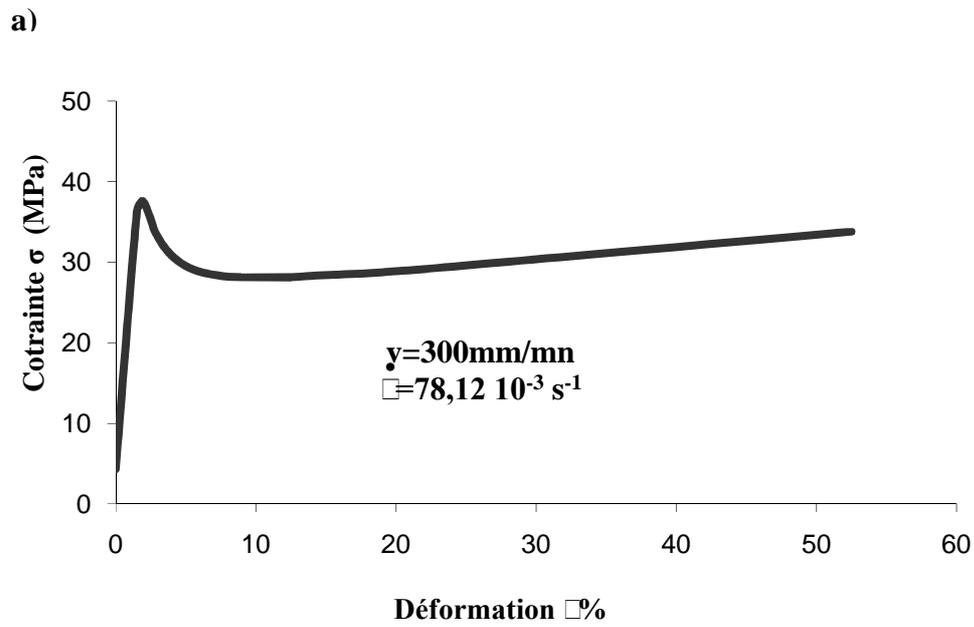
**Figure III-5:** Comportement en traction d'un ABS à 20°C pour une vitesse de déformation égale à  $13,02 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  : a) courbe expérimentale de traction contrainte-déformation. b) photo de l'éprouvette à la fin de l'expérience.



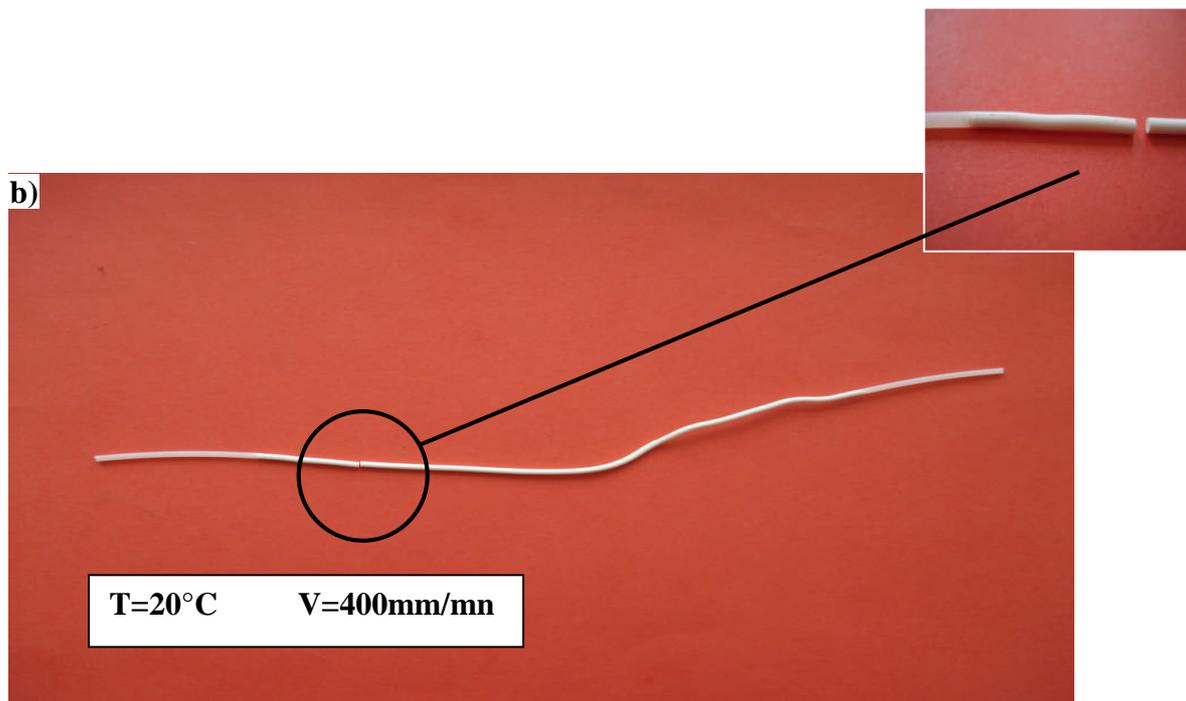
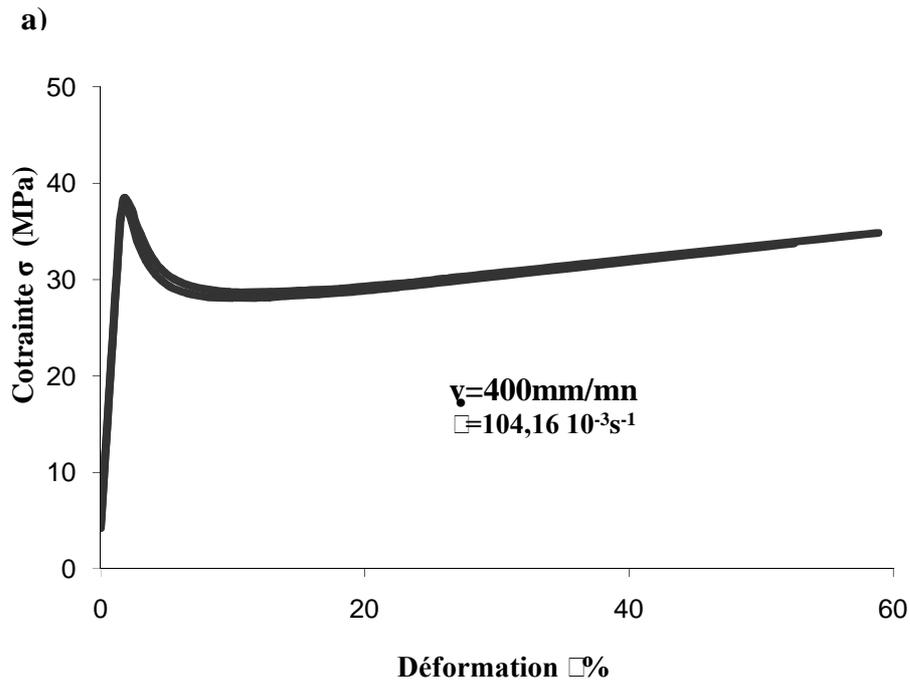
**Figure III-6:** Comportement en traction d'un ABS à 20°C pour une vitesse de déformation égale à  $26,04 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ : a) courbe expérimentale de traction contrainte-déformation. b) photo de l'éprouvette à la fin de l'expérience.



**Figure III-7:** Comportement en traction d'un ABS à 20°C pour une vitesse de déformation égale à  $52,08 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ : a) courbe expérimentale de traction contrainte-déformation. b) photo de l'éprouvette à la fin de l'expérience.

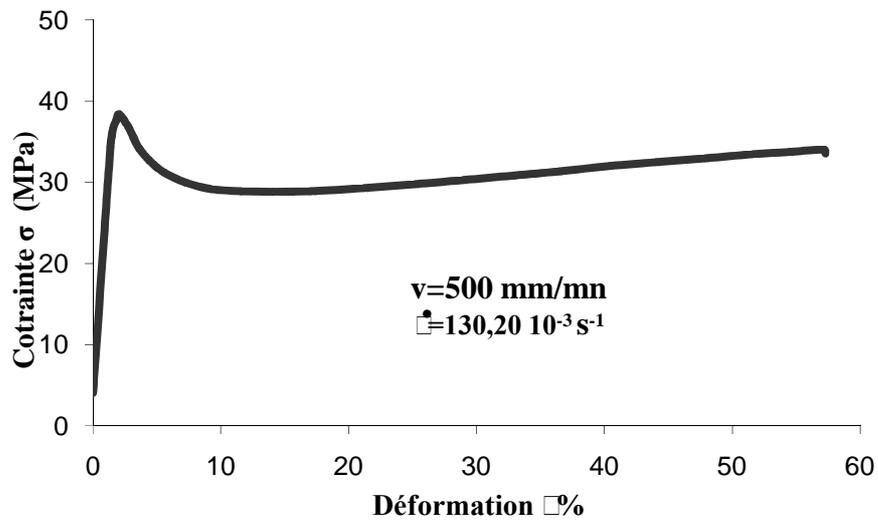


**Figure III-8:** Comportement en traction d'un ABS à 20°C pour une vitesse de déformation égale à  $78,12 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ : a) courbe expérimentale de traction contrainte-déformation. b) photo de l'éprouvette à la fin de l'expérience.

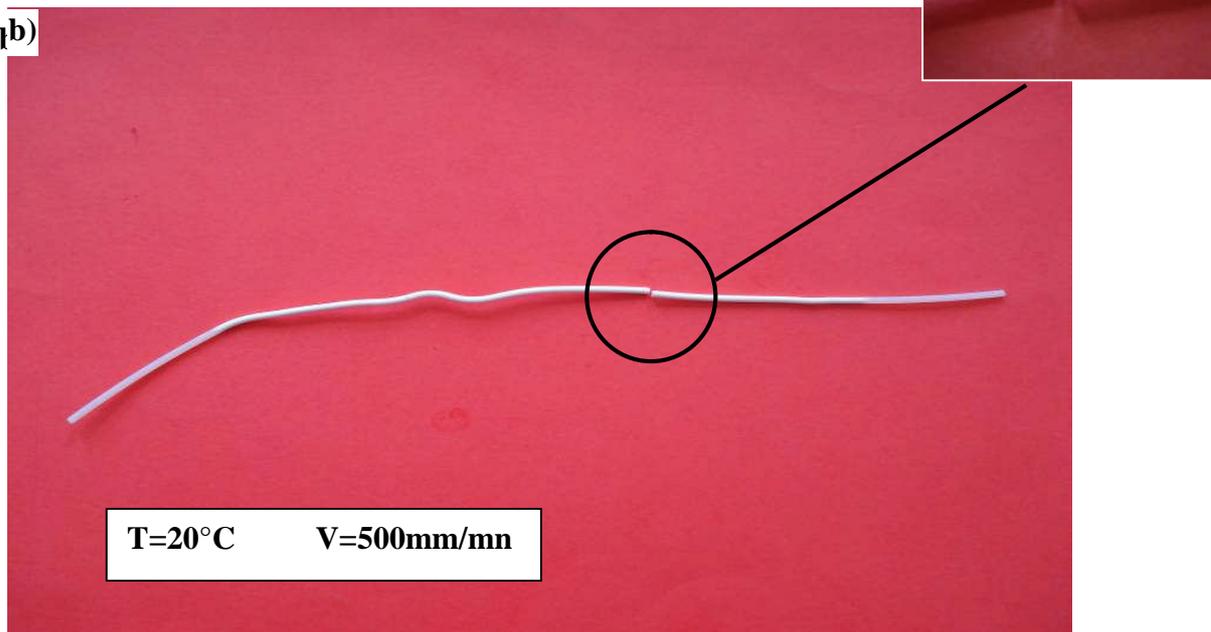


**Figure III-9:** Comportement en traction d'un ABS à 20°C pour une vitesse de déformation égale à  $104,16 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ : a) courbe expérimentale de traction contrainte-déformation. b) photo de l'éprouvette à la fin de l'expérience.

a)

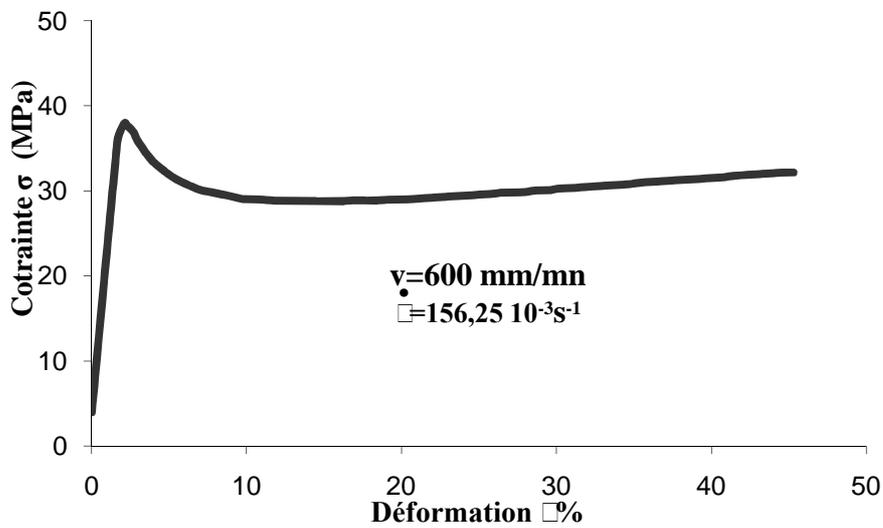


b)

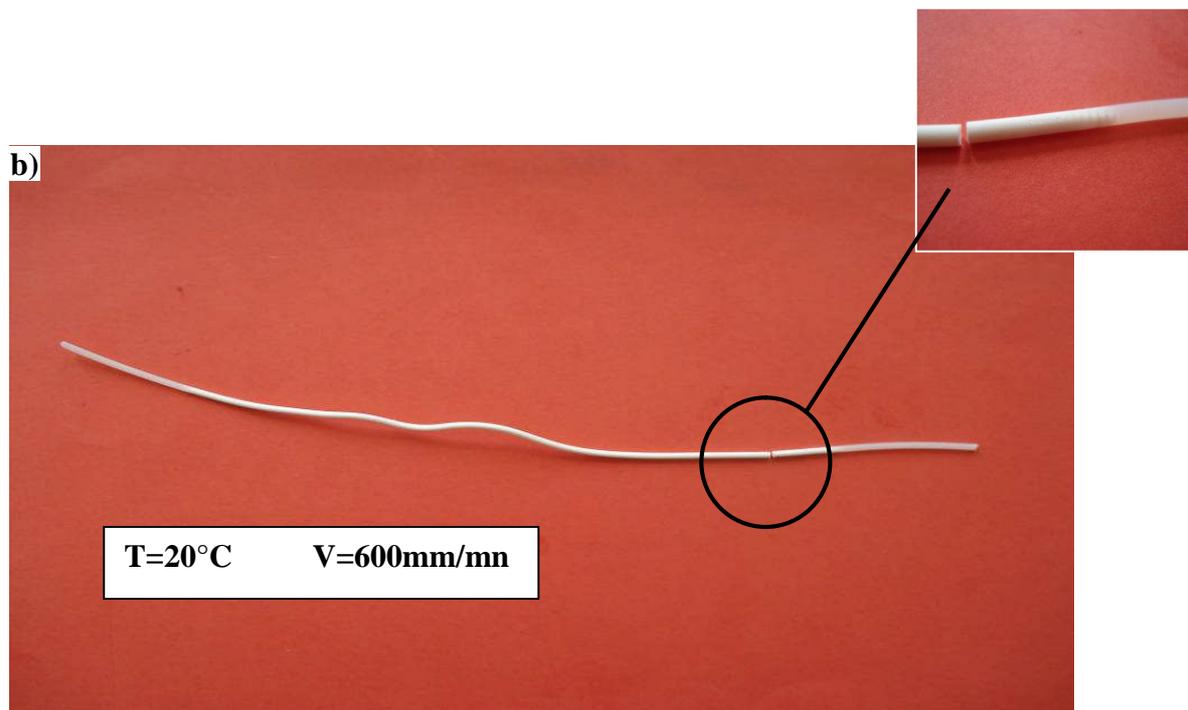


**Figure III-10:** Comportement en traction d'un ABS à 20°C pour une vitesse de déformation égale à  $130,20 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  a) courbe expérimentale de traction contrainte-déformation. b) photo de l'éprouvette à la fin de l'expérience.

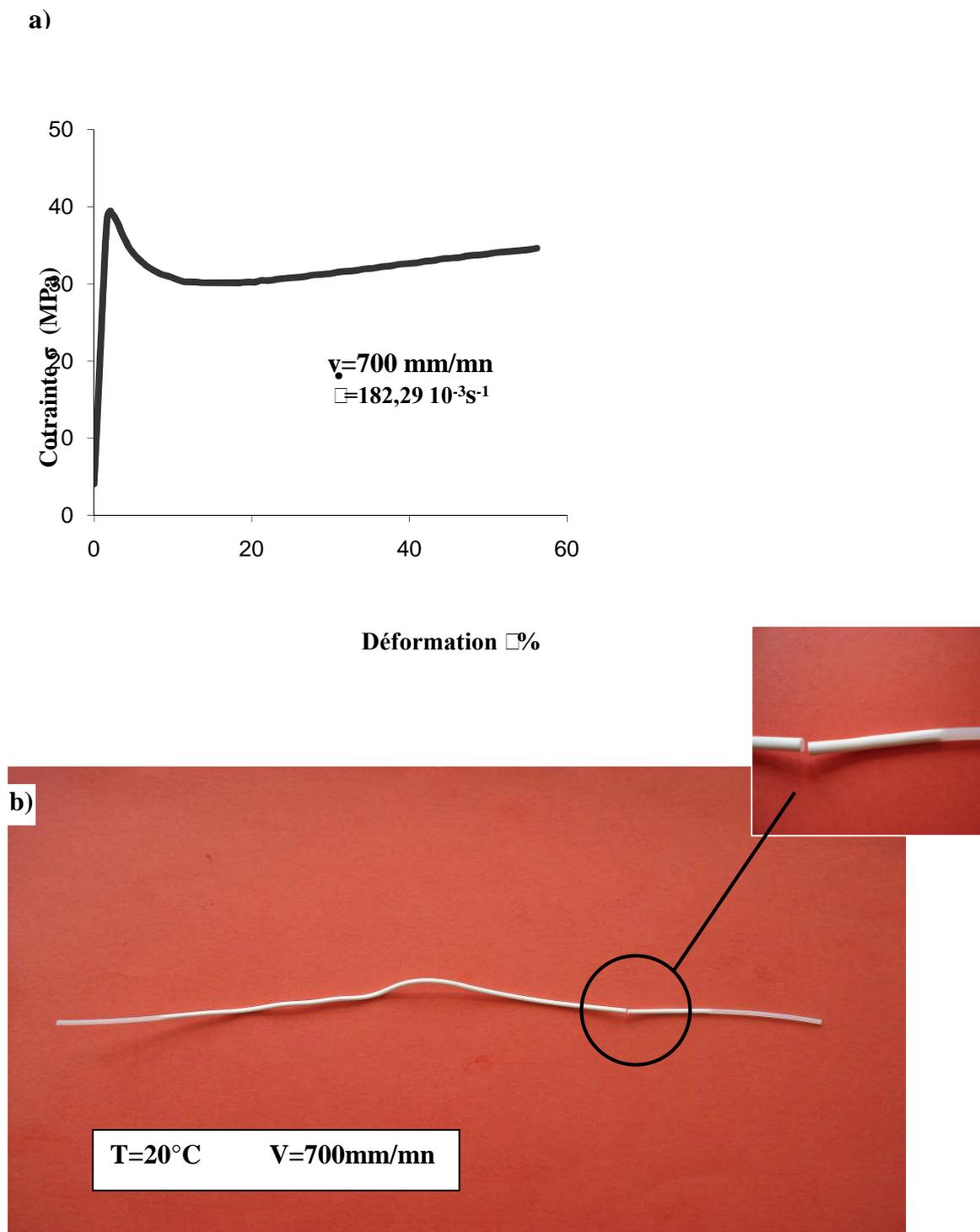
a)



b)

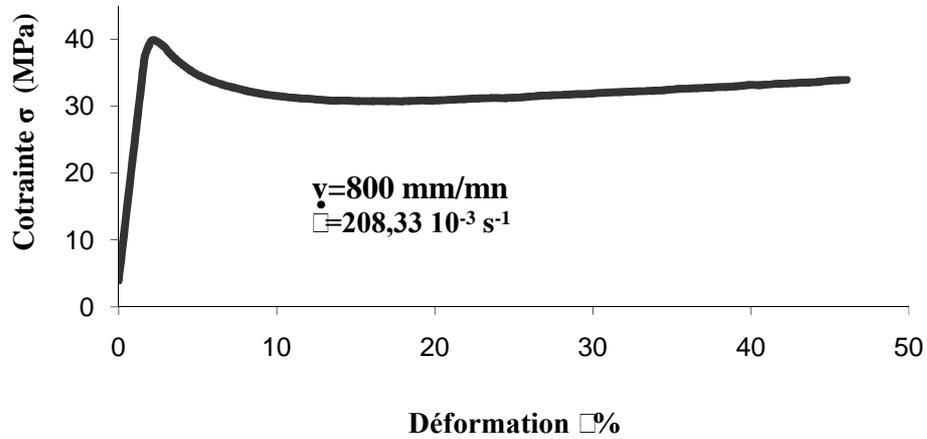


**Figure III-11:** Comportement en traction d'un ABS à 20°C pour une vitesse de déformation égale à  $156,25 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ : a) courbe expérimentale de traction contrainte-déformation. b) photo de l'éprouvette à la fin de l'expérience.

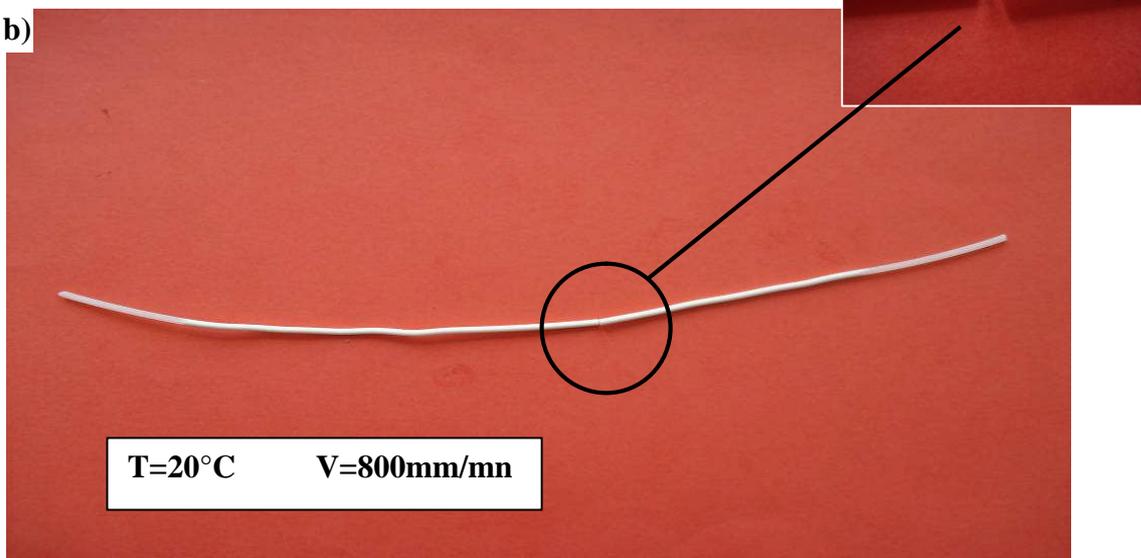


**Figure III-12:** Comportement en traction d'un ABS à 20°C pour une vitesse de déformation égale à  $182,29 \cdot 10^{-3} \text{s}^{-1}$ : a) courbe expérimentale de traction contrainte-déformation. b) photo de l'éprouvette à la fin de l'expérience.

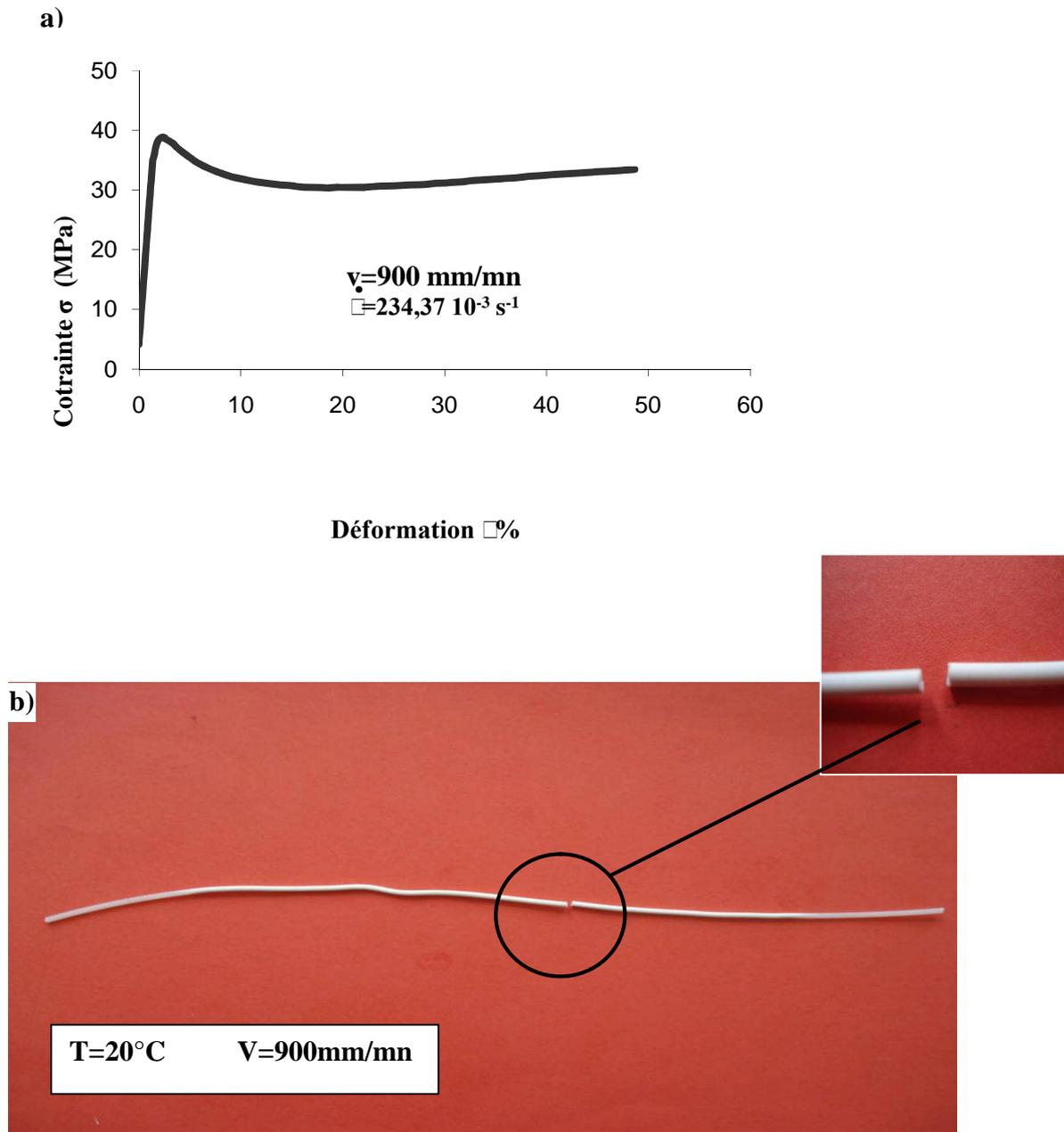
a)



b)

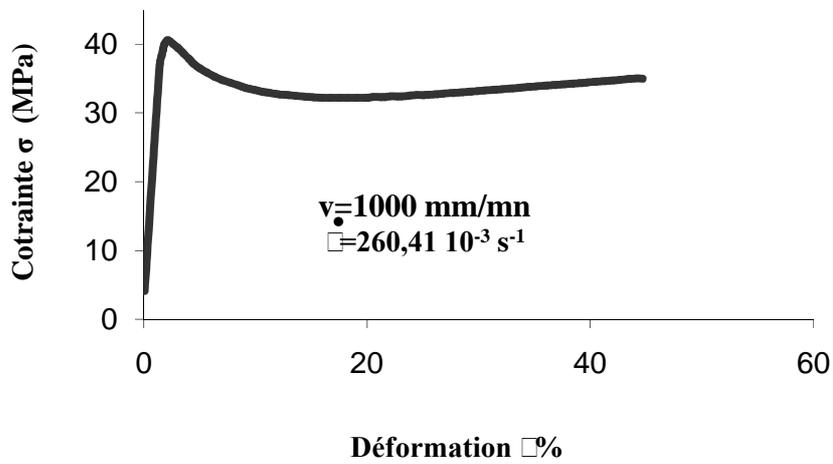


**Figure III-13:** Comportement en traction d'un ABS à 20°C pour une vitesse de déformation égale à  $208,33 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ : a) courbe expérimentale de traction contrainte-déformation. b) photo de l'éprouvette à la fin de l'expérience.

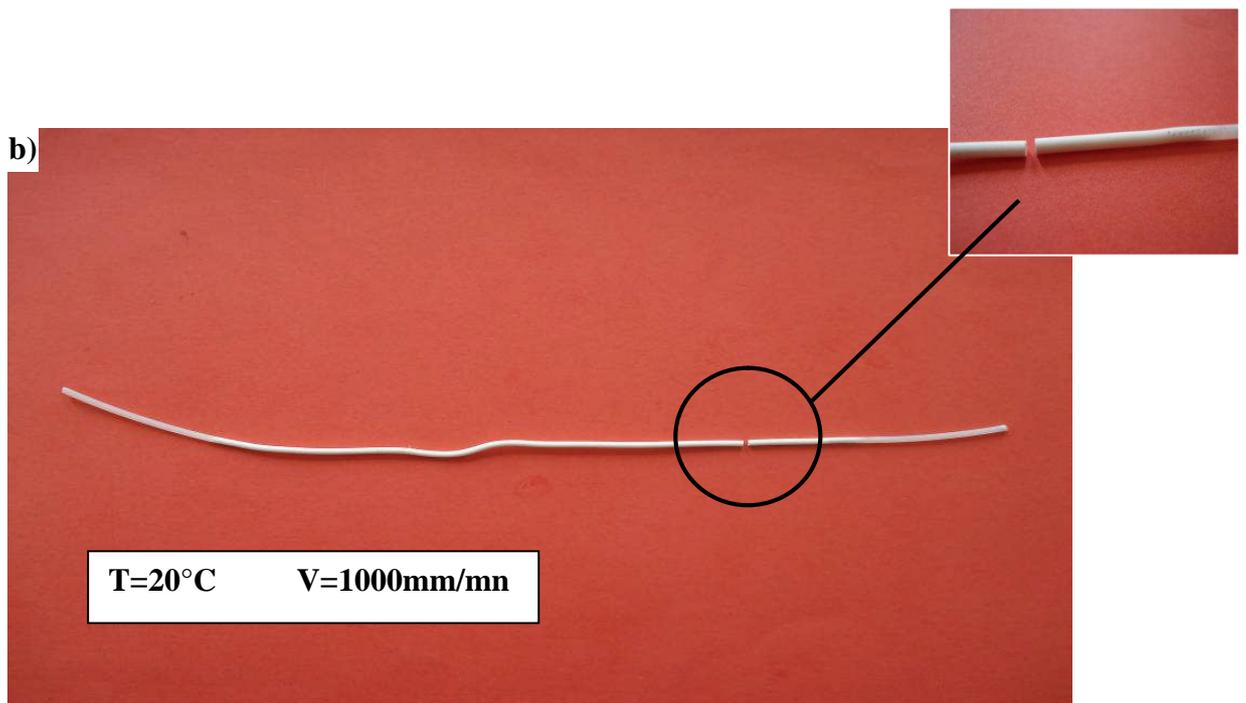


**Figure III-14:** Comportement en traction d'un ABS à 20°C pour une vitesse de déformation égale à  $234,37 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ : a) courbe expérimentale de traction contrainte-déformation. b) photo de l'éprouvette à la fin de l'expérience.

a)



b)



**Figure III-15:** Comportement en traction d'un ABS à 20°C pour une vitesse de déformation égale à  $260,41 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ : a) courbe expérimentale de traction contrainte-déformation. b) photo de l'éprouvette à la fin de l'expérience.

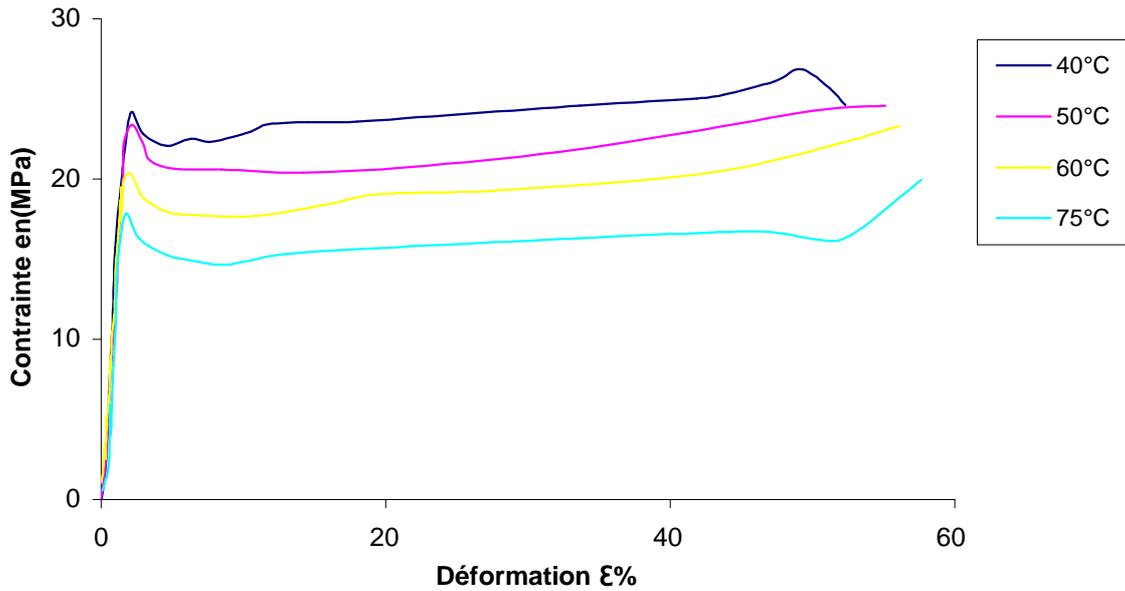


Figure III-16: Comportement en traction de l'ABS entre 40°C et 75°C pour une vitesse de déformation constante  $\dot{\epsilon} = 13,02 \cdot 10^{-3} \text{s}^{-1}$ .

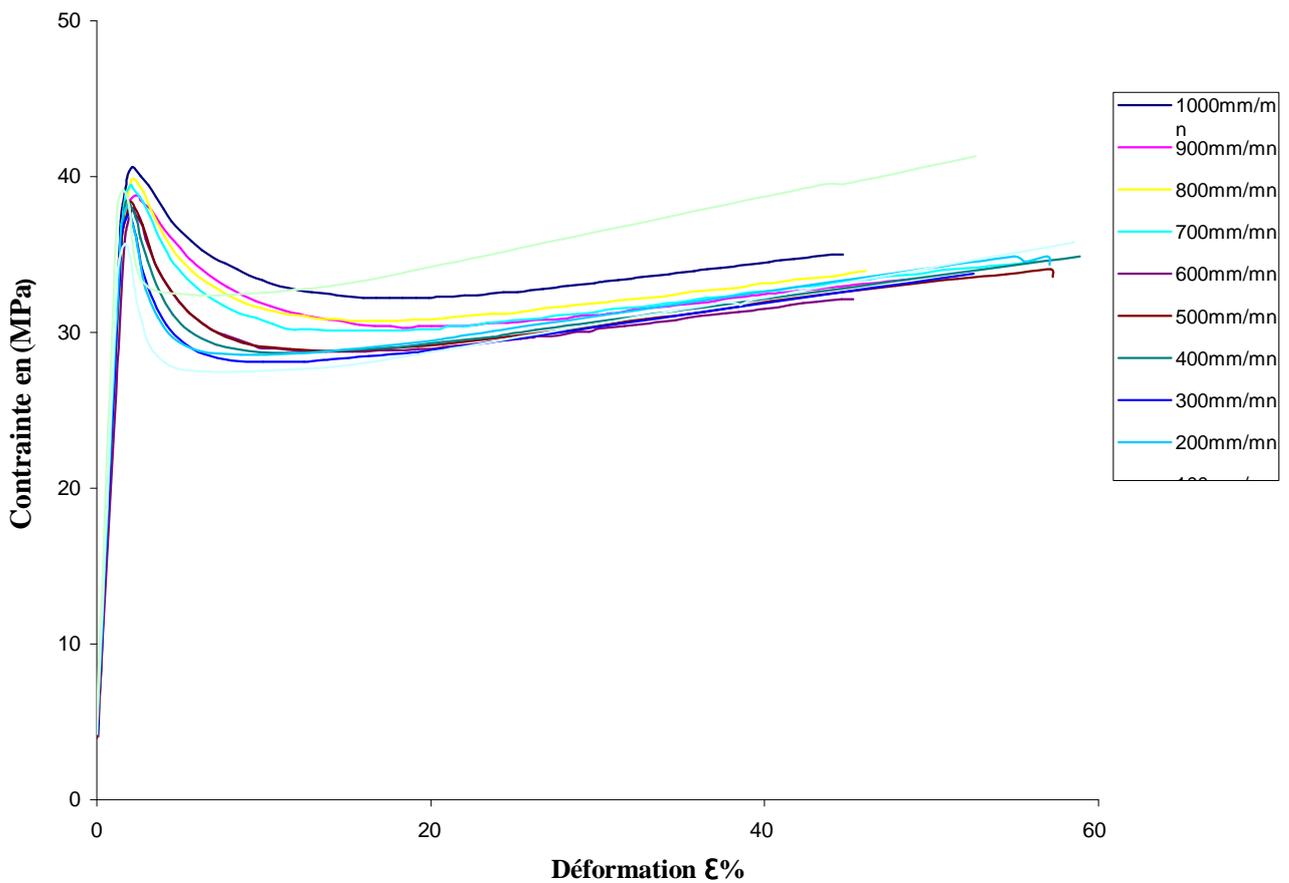


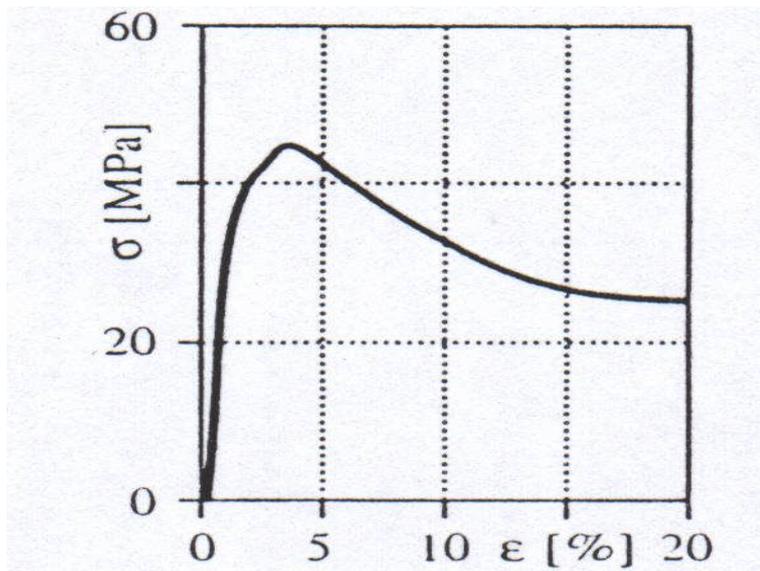
Figure III-17: Comportement en traction de l'ABS à différentes vitesses de déformation entre  $13,02 \cdot 10^{-3}$  et  $260,41 \cdot 10^{-3}$  pour une température constante  $T=20^\circ\text{C}$ .

On constate que l'ABS a montré des comportements mécaniques différents pour des variations de  $T$  et  $\dot{\epsilon}$ , se traduisant par des courbes contraintes-déformation différentes, que nous avons présenté à titre d'exemple aux figures III-18 III-19.

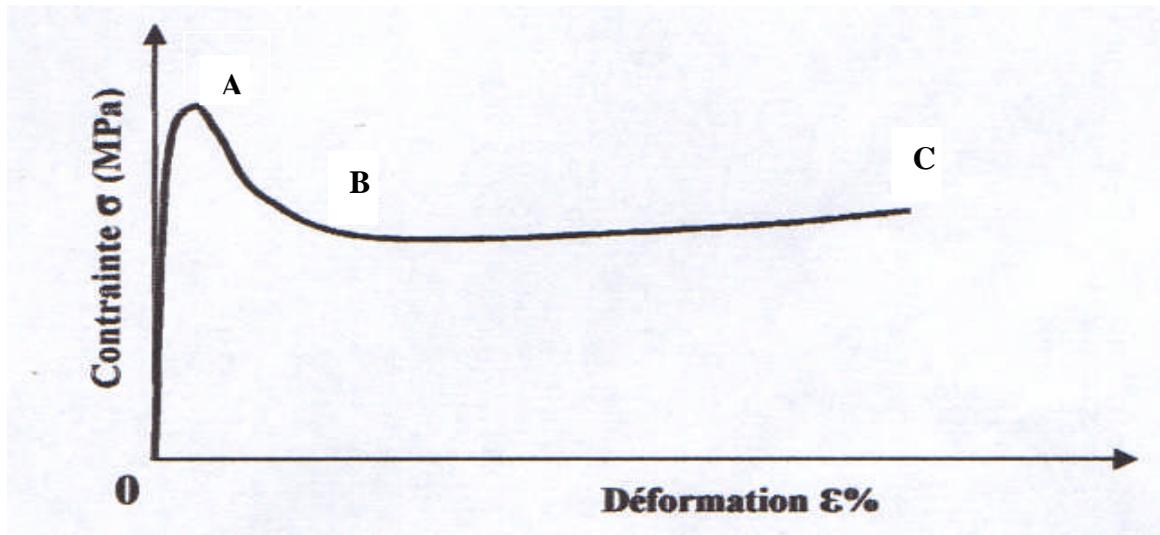
Ainsi nous avons constaté qu'une variation des couleurs des éprouvettes a eu lieu lors du déroulement des essais. En effet, sous l'influence de la température et la vitesse de déformation les échantillons deviennent opaque graduellement puis blanchissent avant rupture.

### III-3 Analyse géométrique des courbes

La courbe (III-18) représente un essai à une température ambiante d'un ABS, ses propriétés sont : la densité  $\rho = 1,03-1,07 \text{ g/cm}^3$ , module d'Young  $E = 2200-3000 \text{ MPa}$ , la température de transition vitreuse  $T_g = -85^\circ\text{C} / 95-105^\circ\text{C}$ .



**Figure-III-18:** courbe contrainte déformation pour un essai de traction d'un Acrylonitrile Butadiène Styrène (ABS) : à la température ambiante.



**Figure-III-19:** allure globale d'une courbe contrainte-déformation pour un essai de traction d'un polymère.

On peut analyser la courbe géométrique globale (III-19) par des divisions des domaines :

- ❖ **Du point 0 à A :** la courbe représente d'abord une droite due à une déformation élastique, le retour au point zéro de la contrainte se fait selon la même droite : le matériau a un comportement hookeen. Il est possible de calculer le module d'Young selon la formule  $E = \sigma / \epsilon$ .  
Au-delà, la pente de la courbe diminue, le module d'élasticité pour cette déformation est plus faible, le retour élastique se superpose à la courbe des contraintes croissantes.
- ❖ **Au point A :** la courbe présente un maximum considère comme un seuil d'écoulement ou une limite à la traction. Suivant l'axe Y, ce point représente la résistance à la traction  $R_m$ .
- ❖ **De A à B :** la contrainte nominale diminue, car on ne tient pas compte de la diminution de la section de l'éprouvette lors de la traction.  
Dans ce domaine, la section de l'éprouvette n'est plus homogène. La section s'amincit sans rupture, la partie amincie augmente de longueur jusqu'à occuper tout l'espace entre les mors de la machine de traction, une striction s'est propagée.

L'écoulement de la matière se produit aux deux extrémités de la zone de striction se fait avec orientation moléculaire importante du polymère.

- ❖ **Au point B** : on peut assister à une remontée de la courbe due à un durcissement avec augmentation progressive de la contrainte d'écoulement.
- ❖ **Au point C** : la rupture de l'éprouvette, (n'est pas effectuée sous l'influence de la température pour certains échantillons). Suivant l'axe Y, pour une effectuation de la rupture, le point C représente la résistance à la rupture  $R_p$ .

Alors qu'il est possible de déterminer avec une bonne précision la limite d'élasticité des métaux, le comportement viscoélastique des matières plastiques interdit souvent d'évaluer avec précision leur limite d'élasticité. En faisant des pentes dans les domaines élastiques des courbes obtenues, les valeurs suivant l'axe Y, qui correspondent au tronçon linéaire présentent des valeurs approximatives de la résistance à la limite de l'élasticité  $R_e$ . Ainsi, dans le domaine élastique, les courbes ont présentées une linéaire entre la contrainte  $\sigma$  et la déformation  $\epsilon$ , le module d'Young E a été calculé suivant la relation de Hooke. Les tableaux III-1, III-2 représentent respectivement des valeurs expérimentales des propriétés mécaniques de l'ABS sous l'influence de la température T et la vitesse de déformation  $\dot{\epsilon}$ .

Numéro de l'éprouvette	T (°C)	R <sub>e</sub> (MPa)	R <sub>m</sub> (MPa)	E (MPa)	R <sub>p</sub> (MPa)
1	40	21,91	24,19	15,75	24,63
2	50	20,07	23,38	13,50	24,3
3	60	17,94	20,35	12,48	23,59
4	75	16,03	17,86	12,3	19,96

**Tableau III-1** : différentes valeurs expérimentales des propriétés mécaniques des quatre éprouvettes (Influence de la température, vitesse de déformation constante  $\dot{\epsilon}=13,02.10^{-3}s^{-1}$ ).

Numéro de l'éprouvette	$\dot{\epsilon}$ (s <sup>-1</sup> )	R <sub>e</sub> (MPa)	R <sub>m</sub> (MPa)	E (MPa)	R <sub>p</sub> (MPa)
1	13,02.10 <sup>-3</sup>	35,19	40,60	26,52	41.29
2	26,04. 10 <sup>-3</sup>	37,68	38,5	23,89	35.76
3	52,08.10 <sup>-3</sup>	38,11	38,98	22,21	34.87
4	78,12.10 <sup>-3</sup>	37,58	39,24	21,17	33.77
5	104,16.10 <sup>-3</sup>	38.48	37,95	21,65	34.86
6	130,20.10 <sup>-3</sup>	38.39	38,39	22,25	33.55
7	156,25.10 <sup>-3</sup>	37.95	38,48	19,35	32.13
8	182,29.10 <sup>-3</sup>	39.44	35,58	21,60	34.39
9	208,33.10 <sup>-3</sup>	39.87	38,11	20,45	33.91
10	234,37.10 <sup>-3</sup>	38.87	35,68	22,73	33.4
11	260,41.10 <sup>-3</sup>	40.60	39.19	31 ,16	34.98

**Tableau III-2** : différentes valeurs expérimentales des propriétés mécaniques des onze éprouvettes (Influence de la vitesse d'étirage, température constante T=20°C).

T (°C) : température d'essai.

$\dot{\epsilon}$  (s<sup>-1</sup>) : vitesse de déformation.

R<sub>e</sub> (MPa) : résistance à la limite élastique.

R<sub>m</sub> (MPa) : Résistance à la traction.

E (MPa) : Module d'Young.

R<sub>p</sub> (MPa) : Résistance à la rupture.

**III-4 Variations des paramètres mécaniques :**

Nous avons obtenue l'évolution des propriétés mécaniques en fonction des paramètres extérieurs  $T$  et  $\epsilon$ . On a déterminé leurs équations les plus proches en veillant au passage maximum des points. Nous avons choisis les courbes de tendances (linéaire, logarithmique, polynomiale, exponentielle.... Elles sont représentées comme suit :

Résistances à la limite élastique  $R_e$  :

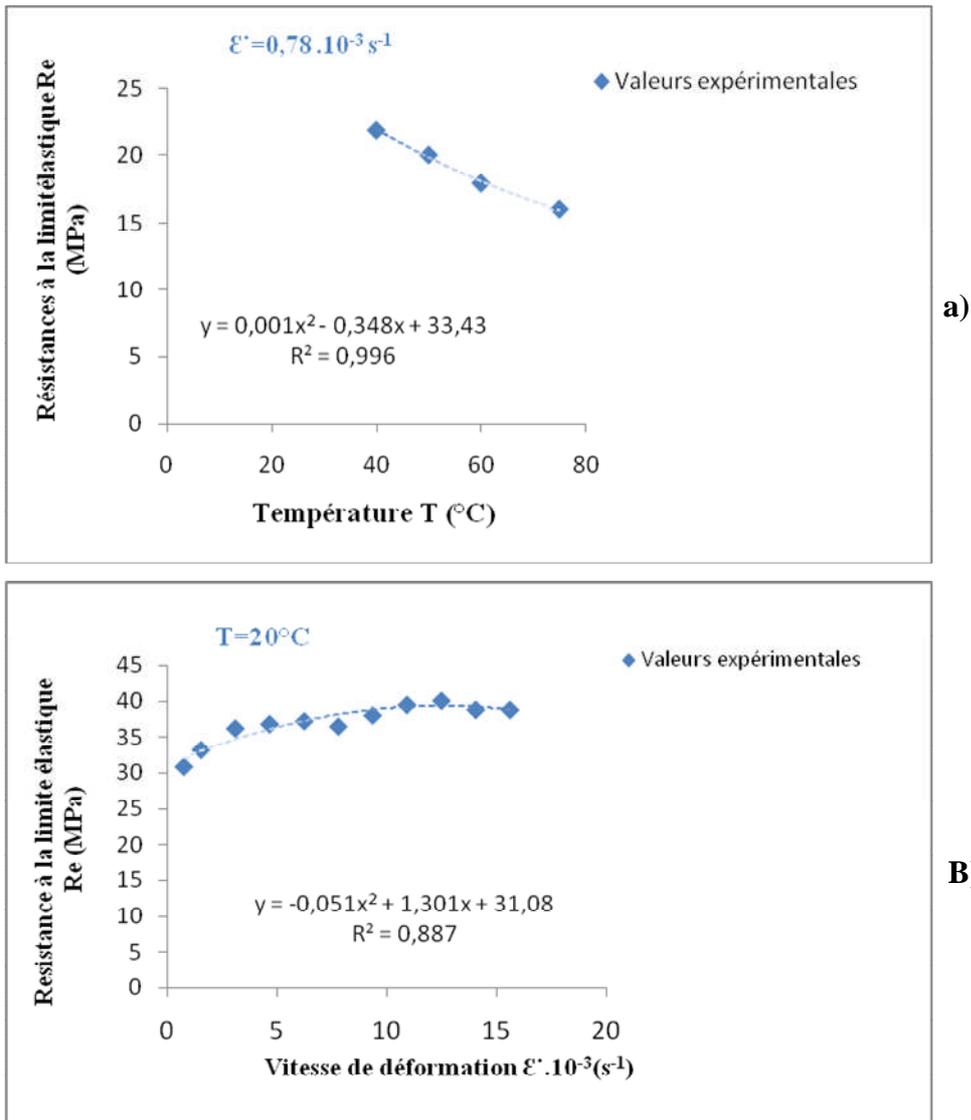


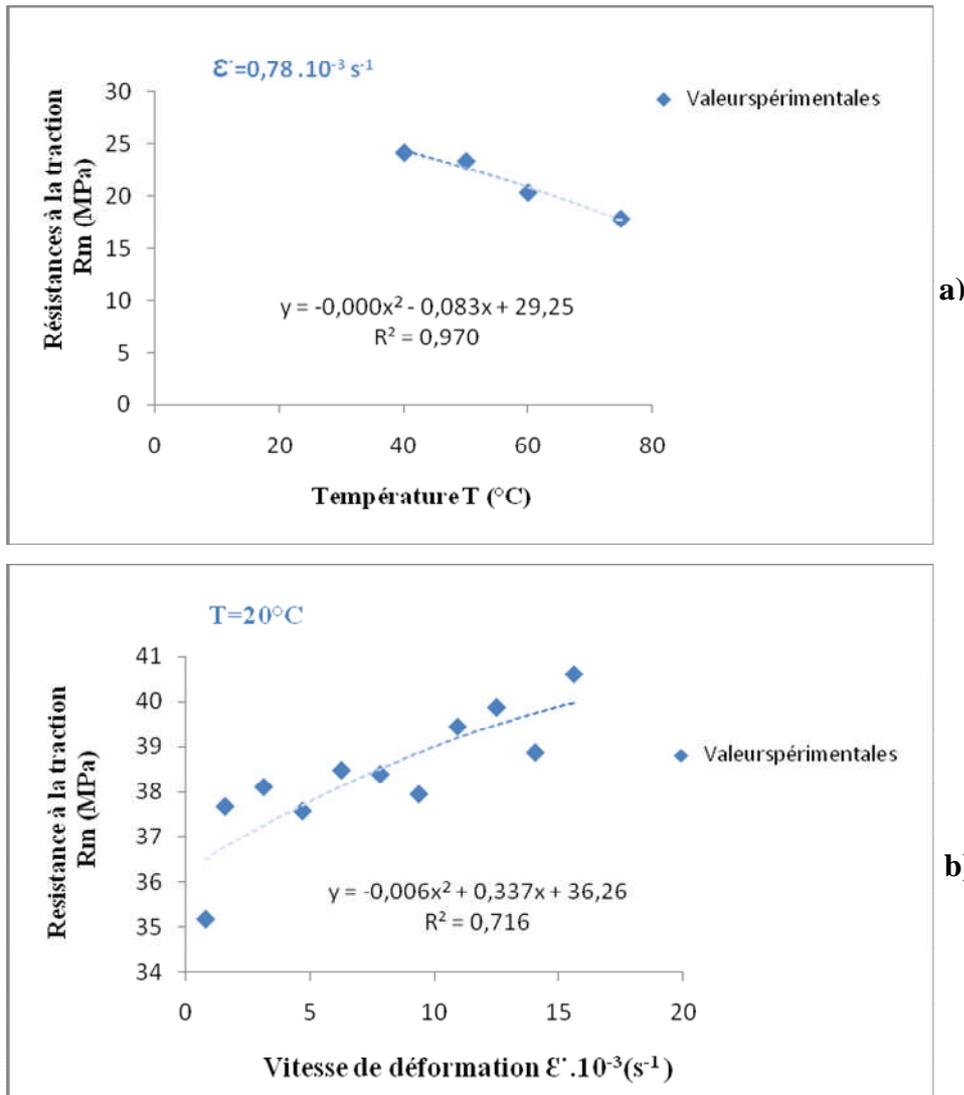
Figure-III-20 : variation de la Résistance à la limite élastique  $R_e$  :

- (a) : en fonction de la température T.
- (b): en fonction de la vitesse de déformation  $\dot{\epsilon}$ .

Sous l'influence de la température, les valeurs expérimentales de la résistance à la limite élastique  $R_e$  diminuent pour une augmentation de température.

Sous l'influence de la vitesse de déformation, les valeurs expérimentales de la résistance à la limite élastique  $R_e$  augmentent pour une élévation de  $\dot{\epsilon}$ .

### Résistances à la traction $R_m$ :



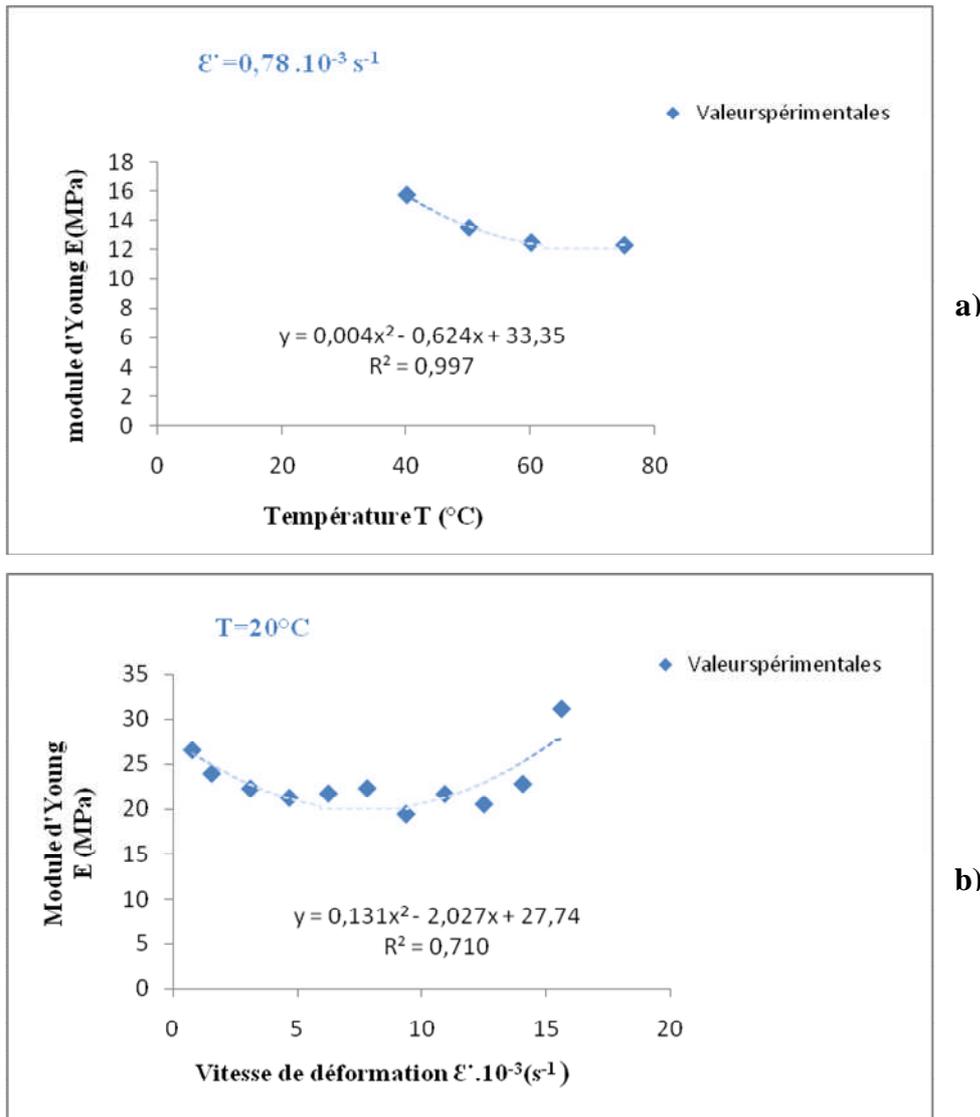
**Figure-III-21** : variation de la Resistance à la traction  $R_m$  :

(a) : en fonction de la température T.

(b): en fonction de la vitesse de déformation  $\dot{\epsilon}$ .

D'après la figure III-21, les valeurs expérimentales de la résistance à la traction  $R_m$  diminuent pour une élévation de la température T et augmentent pour une élévation de la vitesse de déformation  $\dot{\epsilon}$ .

**Module d'Young E :**



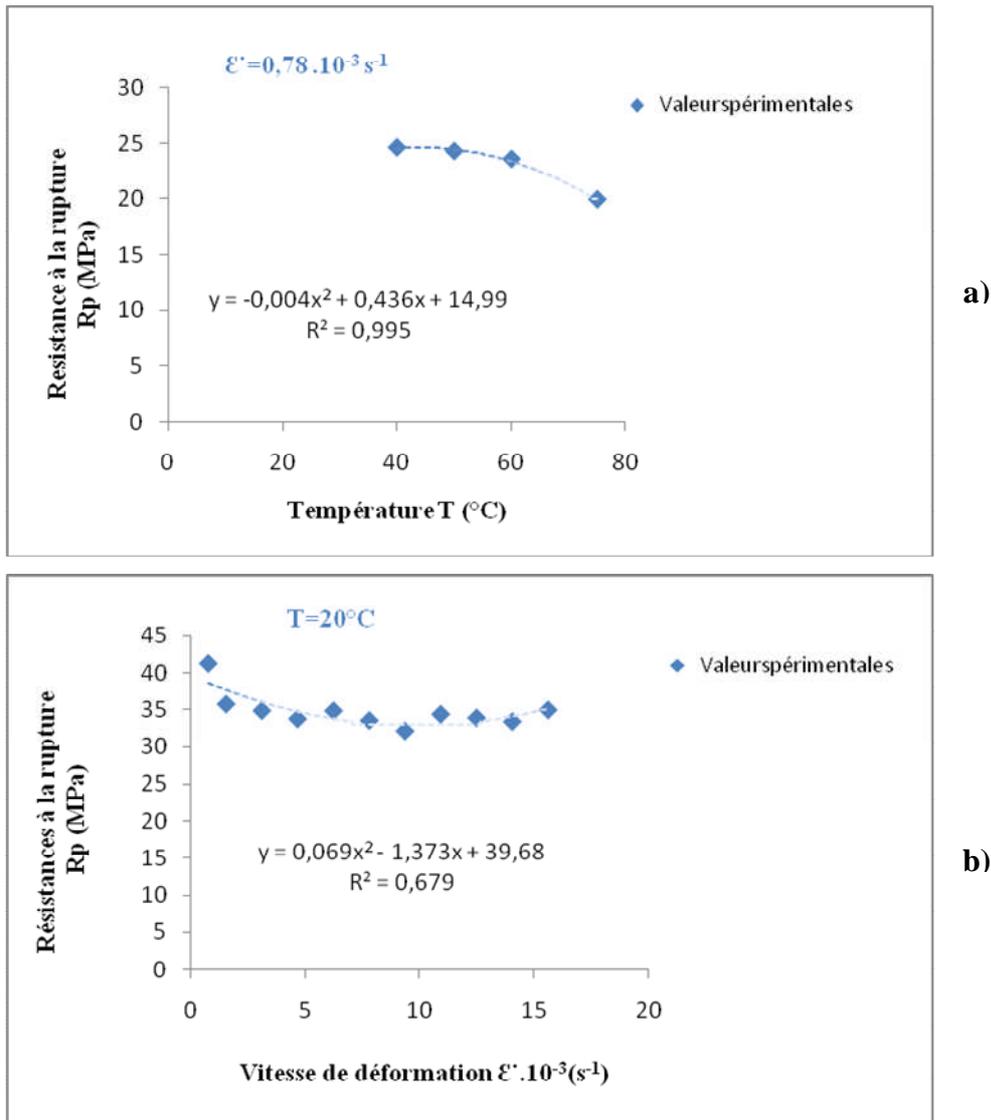
**Figure-III-22 :** variation de module d'Young E :

- (a) : en fonction de la température T.
- (b): en fonction de la vitesse de déformation  $\dot{\epsilon}$ .

Les valeurs expérimentales de module d'Young E diminuent pour une élévation de la température T (figure III-22 (a)), dans le domaine de températures d'essais entre 20°C et 60°C ; ensuite il y a une petite déviation linéaire qui se propage avec l'élévation de la température ; à partir de T=70°C, la variation de module d'Young en fonction de la température est horizontale avec l'abscisse.

Les températures d'essais sont dans un intervalle de 40°C à 75°C, elles sont situées entre les températures de transition vitreuse  $T_g$  ( $T_g = -85^\circ\text{C}/95-105^\circ\text{C}$ ).

### Résistances à la rupture $R_p$ :



**Figure-III-23 :** variation de la résistance à la rupture  $R_p$  :

(a) : en fonction de la température  $T$ .

(b): en fonction de la vitesse de déformation  $\dot{\epsilon}$ .

D'après la figure III-23, les valeurs expérimentales de la résistance à la rupture  $R_p$  diminuent pour une élévation de la température  $T$  et augmentent pour une élévation de la vitesse de déformation  $\dot{\epsilon}$ .

### IV-1 Introduction

On s'intéresse dans ce chapitre à l'interprétation de l'influence de la température  $T$  qui varie entre  $40^{\circ}\text{C}$  et  $75^{\circ}\text{C}$  et dans une gamme de vitesse d'étirage allant de  $50\text{ mm/mn}$  à  $1000\text{ mm/mn}$  avec un pas relativement constant sur les propriétés mécanique ABS.

Dans la pratique, le temps et la température sont les paramètres prépondérants dans l'analyse du comportement mécanique d'un polymère ; il est caractérisé par le type et l'amplitude de sa réponse aux forces extérieures appliquées et aux déformations qui en résultent.

### IV-2 Explication de l'effet de la température et de la vitesse de déformation sur le comportement mécanique de l'ABS :

Les matériaux d'une façon générale ont un phénomène d'absorption d'énergie lors de la traction. La capacité d'absorption d'énergie d'un corps est définie comme l'énergie à fournir pour provoquer sa rupture. Cette énergie peut être déterminée par intégration à partir de l'aire sous la courbe contrainte-allongement correspondante jusqu'au point de rupture. Rapportée à la section nommée ou au volume de l'éprouvette étudié. Elle est souvent définie comme la ténacité du matériau

Une aire large sous la courbe contrainte-déformation est équivalente à une capacité d'absorption mécanique élevée, contrairement pour une aire étroite, la capacité d'absorption mécanique est faible.

Le comportement spécifique des polymères est lié au fait que les macromolécules ne réagissent pas toujours instantanément à l'application d'une sollicitation. Les différentes chaînes moléculaires consécutives tentent de répartir les contraintes imposées se réarrangeant physiquement jusqu'à atteindre une position d'équilibre. Si la sollicitation appliquée est trop rapide par rapport à la capacité de réarrangement des molécules, les matériaux polymères ont un comportement rigide et fragile, ceci est lié à l'incapacité des macromolécules à se réarranger dans un intervalle de temps adéquat. Dans le cas contraire, si la sollicitation est lente ; les mêmes matériaux présentent un comportement ductile est souple, en raison du temps suffisant permettant aux chaînes moléculaires d'atteindre une position d'équilibre correspondant aux contraintes subies.

Ainsi, les polymères présentent un comportement fragile pour une basse température et un comportement ductile s'ils sont soumis à une température élevée. Une élévation de la température rompt la chaîne du polymère et augmente les mouvements des vibrations d'atomes ; ceci facilite les processus de réarrangement moléculaire pour avoir une position d'équilibre lors de traction.

Alors pour une même application, les matériaux polymères peuvent donc se comporter de façon fragile ou ductile et ce, selon les conditions des températures et des vitesses de déformation.

Pour notre étude, l'ABS a été soumis à la traction, sous l'influence de la température dans le domaine entre 40°C et 60°C et la vitesse de déformation de  $0,78 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  à  $15,62 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ .

Le matériau a montré un comportement de choc sous l'effet de la température la plus faible  $T_{\min} = 40^\circ\text{C}$ . Les valeurs de module d'Young  $E$ , résistance de la traction  $R_m$  et résistance à la limite élastique  $R_e$  ont été les plus élevées par rapport à celles des autres éprouvettes qui ont été soumises à la traction sous l'influence des températures plus élevées (tableau III-1)

Ainsi le matériau a présenté un autre comportement de choc pour une vitesse de déformation élevée.

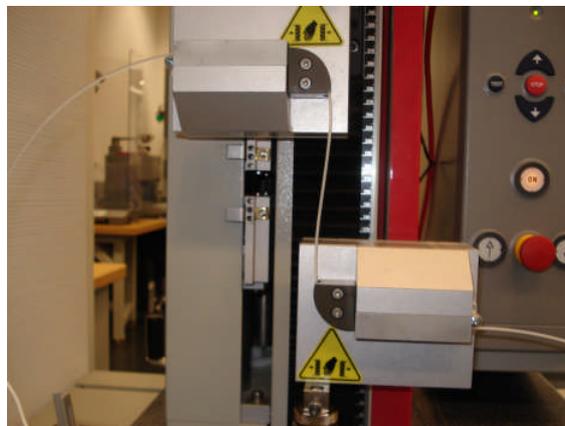
## Essais comparatifs

Nous avons comparé nos résultats à ceux réalisés par le fournisseur lors d'une foire d'exposition en Allemagne et au final nous avons obtenu les mêmes résultats.

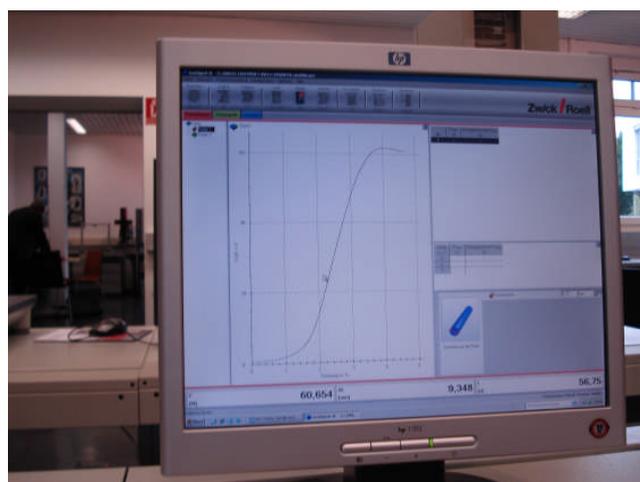
Ces essais réalisés ont été effectués avec contact et sans contact.

### ❖ Essai avec contact

Dans de meilleures conditions nous avons pu comparer nos résultats avec ceux réalisés sur des montages sans mors et ceci par un dispositif spécial avec poulies où nous avons considéré l'éprouvette comme file. C'est ce que nous avons pu montrer lors d'une démonstration chez le constructeur.



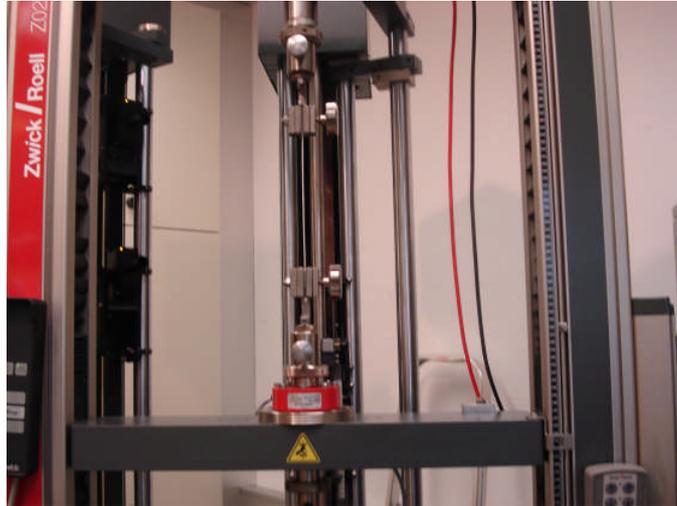
Eprouvette d'essai sur un montage de poulies.



Essai de traction avec testXpert

### ❖ Essai sans contact

Nous avons également effectué nos essais en améliorant le contrôle du déplacement sans contact.



Essai de traction à l'aide de marques de mesure placées sur l'éprouvette.

- ❖ Compléter la caractérisation par des essais de nano indentation sur les trois zone non déformée, déformée et intermédiaire afin de connaître les caractères intrinsèques du matériau et de déterminer les énergies élastiques et plastiques de chaque zone.

## Conclusion générale

Ce travail est basé sur des essais expérimentaux, il a permis de connaître le logiciel de pilotage des machines, faire des essais de traction et compléter nos connaissances théoriques sur l'ABS.

Nous avons étudié le comportement mécanique du polymère, ABS et ceci par des essais mécaniques de traction uniaxiale sur des éprouvettes destinées aux prototypes.

Deux paramètres sont considérés: la vitesse de déformation et la température. L'étude de l'effet de chaque paramètre est basée sur l'évolution de la géométrie globale des courbes de traction.

Un montage pour les essais à différentes températures est réalisé avec un contrôle de température de plus ou moins un degré Celsius

L'élément essentiel de l'étude a montré que l'effet inverse (de la température et de la vitesse de déformation) est mis en évidence. L'approximation polynomiale proposée est bien justifiée par un coefficient de corrélation très acceptable.

En perspective ce travail aurait pu être plus étoffé si :

- ✓ Améliorer les essais sur des montages sans mors et ceci par un dispositif spécial avec poulies. C'est ce que nous avons pu montrer lors d'une démonstration chez le constructeur
- ✓ Améliorer le contrôle du déplacement sans contact
- ✓ Compléter la caractérisation par des essais de nano indentation sur les trois zones (non déformée, déformée et intermédiaire) afin de déterminer les énergies élastique et plastique de chaque zone.

## Références bibliographiques

- [1] **livre blanc du chlore** – novembre 2006 P3.6-1.
- [2] **IPEC et RECYC-QUEBEC** .Comprendre les facteurs clés de la valorisation des matières plastiques résiduelles .Septembre 2001.
- [3] Thèse Présenté : par **Cédric DUTRIEZ** ; Docteur De l'Ecole Centrale de Lyon Et de l'Ecole Doctorale des Matériaux de Lyon, Spécialité : Génie des Matériaux Corrélation entre les propriétés diélectriques et mécaniques des diélectriques et mécaniques des polymères; influence de la température ; 06/04/2004.
- [4] Thèse de magistère, par **L.Kanouni** , Développement d'une technique de mesure de la vitesse de fissuration dans les dents demgremages en polymère Annaba, 2010.
- [5] **DALY L. E.** (1948), US. Pat. 2435202. Assigned to United States Rubber Co.
- [6] **J.M Cowie**, s Polymer Chemistry and physics of modern Material, Blackie, 1991.
- [7] **P. Kiekens** Thermoplastic polymers: overview of several properties and their consequences in flax fibre reinforced composites Polymer Testing, Volume 20, , 2001, Pages 885-893 K. Van de Velde, P. Kiekens.
- [8] thèse de magistère , par **M.Bouktra** , Détermination de la loi de comportement effective du polyéthylène téréphtalate par les algorithmes génétiques, Annaba, 2008
- [9] Matériaux polymères structure, propriétés et applications par **Gottfried W Ehrenstein** et **Fabienne Montagne** édition HERMES science Publication paris 2000.
- [10] Plastiques et Caoutchoucs magazine numéro hors série, 01/2008, p.38.
- [11] Techniques de l'ingénieur par **Didier SAPIN** Ingénieur de l'École d'Application des Hauts Polymères de Strasbourg Responsable Recherche-développement et Qualité CTE Compounding Technology Euro S.A.et **Jean DASNOY-SUMELL** Ingénieur Civil Métallurgiste de l'Université Catholique de Louvain Responsable du développement des marchés Monsanto Europe S.A.

- [12] Lycée Jean Moulin des Andelys | La TeaM InFo2006 – 2008.
- [13] [www.worldlingo.com/SjGle6L4544\\_F8wgwoOYuPoM\\_DKCQnJrw/msowin](http://www.worldlingo.com/SjGle6L4544_F8wgwoOYuPoM_DKCQnJrw/msowin) 11.
- [14] **Vacour**-Z I des Armendiens.
- [15] Leybold didactic.Physique chimie p385.
- [16] [www Zwick.fr](http://www.Zwick.fr).