



Abrégé

L'invention porte sur un procédé de coupage par faisceau laser d'une pièce en acier inoxydable mettant en œuvre des moyens de génération de faisceau laser comprenant une fibre en silice à cœur dopé à l'ytterbium pour générer le faisceau laser. De préférence, le faisceau laser généré par la fibre à base d'ytterbium a une longueur d'onde entre 1.07 et 1.09  $\mu\text{m}$ ; un facteur de qualité du faisceau laser est compris entre 0,33 et 8 mm.mrad et le faisceau laser a une puissance comprise entre 0.1 et 25 kW. le gaz d'assistance du faisceau laser est choisi parmi l'azote, l'hélium, l'argon et leurs mélanges, et éventuellement, il contient, en outre, un ou plusieurs composés additionnels choisis parmi  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$  et  $\text{CH}_4$ .

## Procédé de coupage avec un laser à fibre d'acier inoxydable

L'invention porte sur un procédé de coupage par faisceau laser d'acier inoxydable  
5 utilisant une source laser de type fibre à ytterbium.

Le coupage par faisceau laser en utilisant une source laser de type CO<sub>2</sub> pour générer  
un faisceau laser de longueur d'onde égale à 10.6 µm et d'une puissance allant jusqu'à 6 kW  
actuellement, est largement répandu dans l'industrie. Ce procédé est notamment utilisé pour  
le coupage des aciers inoxydables.

10 Toutefois, les vitesses de coupe qui peuvent être atteintes et la qualité de coupe qui  
en résulte sont très variables selon le matériau à couper et, par ailleurs, selon les  
paramètres du procédé de coupage adoptés, tels que nature du gaz d'assistance, diamètre  
du faisceau focalisé et puissance du laser incidente...

Ainsi, les lasers de type CO<sub>2</sub> ne peuvent être utilisés avec des gaz d'assistance  
15 possédant un potentiel d'ionisation faible, tels que l'argon par exemple, sous risque de  
générer des plasmas parasite qui peuvent nuire au procédé

En outre, les lasers de type CO<sub>2</sub> sont limités en puissance, ce qui impacte  
directement la vitesse de coupe.

De plus, le fait de devoir guider le faisceau laser depuis le générateur laser jusqu'à la  
20 tête de focalisation, c'est-à-dire la tête de coupe, présente des inconvénients, notamment au  
niveau de l'alignement des optiques du chemin optique. En effet, les optiques de guidage  
sont généralement des miroirs en cuivre poli et/ou revêtu et la position de ces derniers  
déterminent le chemin emprunté par le faisceau laser. De ce fait, l'alignement de ces miroirs  
doit être parfait pour assurer une entrée optimale du faisceau laser dans la tête de  
25 focalisation ou tête de coupe. Or, le réglage de la position de ces miroirs est généralement  
assurée par des moyens mécaniques, lesquels peuvent facilement se dérégler en fonction  
du temps, de l'usure des pièces et des conditions environnementales, notamment la  
température ambiante, le taux d'humidité...

De plus, le chemin optique du faisceau doit impérativement être maintenu dans une  
30 atmosphère inerte pour éviter toute pollution et conservé un milieu d'indice optique constant  
nécessaire à la bonne propagation du faisceau. Ces conditions permettent de conserver les  
propriétés relatives au diamètre du faisceau et à la répartition transversale de l'énergie dans  
ce dernier, et de conserver des propriétés de qualité du faisceau satisfaisantes pour le  
procédé, le facteur de qualité (BPP) des faisceaux laser CO<sub>2</sub> de forte puissance mis en  
35 oeuvre en découpe étant généralement compris entre 3mm.mrad et 6mm.mrad. Une telle  
atmosphère permet aussi de préserver les optiques de guidage et éviter leur détérioration.

Or, cela n'est pas pratique au plan industriel et engendre des coûts supplémentaires.

Pour tenter de pallier ces problèmes, il a été proposé de réaliser la découpe de l'inox avec un dispositif laser de type Nd:YAG au sein duquel le faisceau est généré par un résonateur contenant un milieu amplificateur solide, c'est-à-dire à barreau de néodyme (Nd), puis convoyé jusqu'à la tête de focalisation via une fibre optique.

5           Cependant, cette solution n'est pas non plus totalement satisfaisante au plan industriel.

En effet, il a été constaté qu'une découpe par faisceau laser obtenue avec une source laser de type Nd:YAG de longueur d'onde de 1.06  $\mu\text{m}$  donne de mauvais résultats en termes de qualité et de vitesse de coupe.

10           En effet, les lasers de type Nd:YAG ont des facteurs de qualité inadaptés au processus de découpe laser. Les facteurs de qualité (BPP) de ces lasers sont typiquement de l'ordre de 15 mm.mrad à 30 mm/mrad suivant les sources. Or, plus le facteur de qualité d'un laser est élevé, plus le produit du diamètre de faisceau focalisé et de la divergence du faisceau est grande et moins le faisceau laser est efficace pour le processus de découpe  
15 laser.

De plus, la répartition transversale de l'énergie dans un faisceau laser Nd:YAG focalisé n'est pas gaussienne mais en créneau (ou « *top hat* » en anglais) et au-delà du point de focalisation, la répartition transversale de l'énergie est aléatoire.

20           D'une façon plus générale, le coupage par laser d'acier inoxydable avec des laser Nd:YAG est loin d'être évident lorsqu'on souhaite atteindre des vitesses et une qualité de coupe acceptables au plan industriel.

Le problème qui se pose est alors de proposer un procédé amélioré et industriellement acceptable de découpe par faisceau laser des aciers inoxydables, lequel puisse permettre d'atteindre, selon l'épaisseur considérée, des vitesses allant jusqu'à 15 à  
25 20 m/min, voire même davantage, et une bonne qualité de coupe, c'est-à-dire des faces de coupe droites, sans bavure et avec une rugosité réduite.

La solution de l'invention est alors un procédé de coupage par faisceau laser d'une pièce en acier inoxydable, dans lequel on utilise des moyens de génération de faisceau laser comprenant au moins une fibre contenant de l'ytterbium pour générer le faisceau laser  
30 servant à fondre la pièce et à ainsi réaliser la découpe proprement-dite caractérisé en ce que le facteur de qualité du faisceau laser est compris entre 0,33 et 8 mm.mrad.

Les moyens de génération de faisceau laser comprennent au moins un élément exciteur, de préférence plusieurs éléments excitateurs, coopérant avec au moins un élément excité, encore appelé milieu amplificateur, pour générer le faisceau laser. Les  
35 éléments excitateurs sont préférentiellement plusieurs diodes laser, alors que le ou les éléments excités est ou sont des fibres, de préférence en silice, à cœur d'ytterbium.

Selon un aspect de l'invention, il est prévu un procédé de coupage par faisceau laser d'une pièce en acier inoxydable, dans lequel on utilise des moyens de génération de faisceau laser comprenant au moins une fibre contenant de l'ytterbium pour générer le faisceau laser servant à fondre la pièce et à ainsi réaliser la découpe proprement-dite, et dans lequel un gaz d'assistance pour le faisceau laser est utilisé, caractérisé en ce que les moyens de génération du faisceau laser comprennent un orifice d'injection du gaz ayant un diamètre compris entre 0.5 et 4 mm que le facteur de qualité du faisceau laser est compris entre 2 et 8 mm.mrad, la pièce en acier inoxydable a une épaisseur comprise entre 0,25 et 30 mm, le faisceau laser a une puissance comprise entre 0,1 et 25 kW et le gaz d'assistance a une pression comprise entre 8 et 25 bar et le gaz d'assistance est un gaz inerte choisi parmi l'azote, l'argon, l'hélium et leurs mélanges.

Dans le cadre de l'invention, on utilisera indifféremment les termes « moyens de génération de faisceau laser » et « résonateur ».

Selon le cas, le procédé de l'invention peut comprendre l'une ou plusieurs des caractéristiques suivantes :

- 5           - la (ou les) fibre(s) est formée d'un cœur dopé à l'ytterbium recouvert de silice.
  - le faisceau laser généré par la fibre à base d'ytterbium a une longueur d'onde entre 1 et 5  $\mu\text{m}$ , de préférence entre 1.04 et 3  $\mu\text{m}$ .
  - le faisceau laser généré par la fibre à base d'ytterbium a une longueur d'onde entre 1.07 et 1.09  $\mu\text{m}$ , de préférence de 1.07  $\mu\text{m}$ .
  - 10          - le faisceau laser a une puissance comprise entre 0.1 et 25 kW, de préférence entre 0.5 et 15 kW.
  - le faisceau laser est continu ou pulsé, de préférence continu.
  - la pièce à couper a une épaisseur entre 0.25 et 30 mm, de préférence entre 0.40 et 20 mm.
  - 15          - la vitesse de coupe est comprise entre 0.1 et 25 m/min, de préférence de 2 à 20 m/min.
  - le gaz d'assistance du faisceau laser est choisi parmi l'azote, l'hélium, l'argon et leurs mélanges, et éventuellement, il contient, en outre, un ou plusieurs composés additionnels choisis parmi  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ...
  - 20          - le facteur de qualité du faisceau laser est compris entre 1 et 8 mm.mrad, de préférence supérieur à 2 mm.mrad, de préférence encore supérieur à 3 mm.Mrad, et/ou de préférence inférieur à 7 mm.mrad, de préférence encore inférieur à 5 mm.Mrad.
  - plus généralement, la pression de gaz d'assistance est comprise entre environ 8 bar et 25 bar, et est choisie en fonction de l'épaisseur à couper.
  - 25          - le diamètre de l'orifice d'injection du gaz est compris entre 0,5 et 4 mm, typiquement entre 1 et 3 mm ; le diamètre augmentant avec l'épaisseur de la pièce à couper.
- La Figure 1 ci-annexée est un schéma de principe d'une installation de mise en oeuvre d'un procédé de coupage par faisceau laser 3 d'une pièce 10 en acier inoxydable, mettant en oeuvre une source laser 1 à résonateur ou moyens de génération de faisceau 2
- 30 formé d'une fibre en silice à cœur dopé à l'ytterbium pour générer le faisceau laser 3.
- La source laser 1 permet de générer un faisceau laser 3 de longueur d'onde comprise entre 1  $\mu\text{m}$  et 5  $\mu\text{m}$ , plus précisément à 1.07  $\mu\text{m}$ .
- Le faisceau 3 se propage jusqu'à la zone d'interaction 11 entre le faisceau 3 et la pièce 10, c'est-à-dire la zone où apparaît la saignée de coupe, à travers des moyens de
- 35 convoyage de faisceau 4, telle qu'une fibre optique en silice fondue de diamètre compris 20  $\mu\text{m}$  et 300  $\mu\text{m}$ .

En sortie de cette fibre 4, le faisceau laser 3 possède des caractéristiques optiques particulières et un facteur de qualité (BPP) compris entre 1 et 8 mm.mrad.

Le faisceau 3 est ensuite collimaté avec un collimateur optique 5 équipé d'un doublet de collimation en silice fondu revêtue de manière à limiter la divergence du faisceau en sortie de fibre et le rendre le faisceau laser parallèle.

Le faisceau 3 parallèle, dont la divergence a été considérablement limitée par le collimateur, est ensuite focalisé sur ou dans la pièce 10 à couper par une lentille 6 en silice fondue revêtue de longueur focale comprise entre 80 mm et 510 mm, de préférence entre 100 mm et 250 mm.

Avant de venir frapper la pièce 10, le faisceau 3 traverse axialement la tête laser 5 équipée d'une buse 7 comprenant un orifice 8 de sortie axial situé en regard de la pièce à couper 10 par lequel passent le faisceau 3 et le gaz d'assistance. L'orifice de la buse peut être compris entre 0.5 mm et 5 mm de préférence entre 1 mm et 3 mm.

La tête laser 5 est alimentée, quant à elle, en gaz d'assistance via une entrée 9 de gaz, par exemple un gaz inerte tel l'azote, l'argon, l'hélium ou un mélange de plusieurs de ces gaz ou alors un gaz actif, tel l'oxygène par exemple, voire des mélanges de gaz actif et inerte.

Le gaz d'assistance sert à évacuer le métal en fusion hors de la saignée 12 de coupe se formant dans la pièce 10 lors du déplacement relatif de la pièce par rapport à la tête laser 5 selon la trajectoire de coupe désirée. La solution inverse consistant à bouger la tête de coupe en conservant la pièce statique donne le même résultat.

La Figure 3 est un schéma illustratif de la configuration en cours de coupage au niveau de la saignée de coupe (matériau d'épaisseur  $e$ ), où ont été représentés l'angle  $\theta$  de divergence du faisceau laser après focalisation, le diamètre  $2W_0$  du faisceau focalisé et l'angle  $\alpha$  du front avant de coupe.

Le facteur de qualité du faisceau ou BPP est défini comme étant le produit de l'angle  $\theta$  de divergence par son rayon  $W_0$ .

Le processus de coupage est régi par l'absorption de l'énergie du faisceau laser dans le matériau au cours de la coupe. En fonction de la longueur d'onde du faisceau laser mis en oeuvre, il existe donc un angle optimal d'absorption de l'énergie par le matériau. En dehors de cet angle optimal, une part de l'énergie est reflétée et/ou perdue.

La Figure 3 illustre le fait qu'en condition optimale de coupe l'angle du front avant  $\alpha$  correspond à une exposition de toute l'épaisseur  $e$  du matériau sous le faisceau de diamètre  $2W_0$ .

La Figure 4 montre l'évolution de l'angle  $\alpha$  optimum du front avant en fonction de l'épaisseur de coupe. La courbe supérieure correspond à celle obtenue avec un laser  $CO_2$

de 4 kW en mode Tem 01\*, alors que la courbe inférieure à celle obtenue avec un laser à fibre d'ytterbium de 2kW selon l'invention. Les deux courbes ne sont pas confondues du fait de la différence d'angle d'absorption optimal de l'énergie à 10.6  $\mu\text{m}$ , qui est la longueur d'onde du laser CO<sub>2</sub>, et à 1.07 $\mu\text{m}$ , qui est la longueur d'onde du laser fibre à ytterbium.

5 Au vu de ces courbes, il apparaît clairement que pour les faibles épaisseurs, l'angle optimal du front avant est plus important que pour des épaisseurs plus importantes. L'angle maximal de transmission de l'énergie laser à la matière est obtenu géométriquement et est la somme des angles  $\alpha + \theta$ .

10 On comprend alors que, lorsqu'on coupe des épaisseurs minces (quelques mm), il convient d'utiliser un angle de divergence de faisceau faible, c'est à dire un BPP petit, puisque le diamètre de spot est fixé par le diamètre de fibre utilisé, et ce, pour maintenir l'angle optimum d'absorption de l'énergie constant.

On en déduit aussi qu'au-delà d'une valeur de 8 mm.mrad, la transmission de l'énergie du faisceau à la matière devient moins efficace.

15 De là, dans le cadre de l'invention, on met en oeuvre un faisceau laser dont le facteur de qualité est préférentiellement compris entre 1 et 8 mm.mrad, de préférence encore entre 2 et 8 mm.mrad.

#### Exemple

20 Afin de démontrer l'efficacité du procédé de l'invention, plusieurs essais de coupage de pièces en acier inoxydable ont été réalisés en utilisant un résonateur contenant un milieu amplificateur ou moyen de génération de faisceau composé de fibres optiques dont le cœur est dopé à l'ytterbium selon le procédé de l'invention et les résultats obtenus sont représentés sur la Figure 2.

25 Plus précisément, la source laser utilisée dans l'Exemple ci-après est composée d'un milieu amplificateur formé de fibres dopées à l'ytterbium et excitées par des diodes, de puissance 2kW et de longueur d'onde égale à 1.07  $\mu\text{m}$ , propagé dans une fibre optique de 100  $\mu\text{m}$  en silice fondu revêtue, possédant un facteur de qualité (BPP) en sortie de fibre de 4mm.mrad. Le collimateur situé en sortie de fibre est équipé d'un doublet de 55mm de longueur focale.

30 Pour déterminer les plages de vitesses pouvant être atteintes avec le procédé de l'invention en fonction de l'épaisseur des pièces à couper, et de la pression et de la composition du gaz d'assistance mises en oeuvre, des essais de coupe ont été réalisés sur des pièces en acier inoxydable ayant des épaisseurs comprises entre 1.5 mm et 8 mm.

35 Le gaz utilisé est un gaz inerte, à savoir de l'azote, injecté dans la zone d'interaction du faisceau avec la pièce à des pressions variables comprises entre 8 et 25 bar selon le gaz utilisé, à travers des buses de découpe laser présentant des orifices de diamètres compris

entre 0.5 et 4 mm selon le cas, typiquement entre 1 et 3 mm de diamètre. Plus l'épaisseur à couper est importante, plus le diamètre de buse doit être grand.

On a utilisé des lentilles de focalisation de longueur focale comprise entre 127 mm à 190.5 mm pour focaliser le faisceau laser généré par milieu amplificateur contenant des fibres dopées à l'ytterbium excitées par des diodes et acheminé jusqu'à la lentille de focalisation de la tête de coupe par des moyens de convoyage optique, telle une fibre optique de 100  $\mu$ m de diamètre.

Plus précisément, les épaisseurs inférieures ou égale à 4 mm sont usuellement découpées avec des lentilles de focale de 127 mm et les épaisseurs plus élevées avec des lentilles de focale de 190.5 mm.

Les résultats obtenus avec une pression d'azote de 15 bar, qui ont été jugés satisfaisants du point de vue de la qualité de coupe obtenue sont consignés sur la Figure 2 ci-jointe où l'on a représenté la vitesse obtenue (axe des ordonnées) en fonction de l'épaisseur à découper (axe des abscisses).

On voit que le procédé de l'invention permet d'obtenir une vitesse de l'ordre de 16 m/min sur une pièce de 2 mm d'épaisseur, dans les conditions expérimentales ci-avant. Néanmoins, on voit aussi que la vitesse de coupe décroît logiquement avec une augmentation l'épaisseur du matériau découpé.

Après examen des faces coupées, il est à souligner que la qualité des coupes obtenues est très satisfaisante, en termes de bavures et striations, et ce, pour toutes les épaisseurs coupées.

Toutefois, l'épaisseur maximale découpée dans les conditions expérimentales susmentionnées est de 8 mm avec la puissance laser mise en oeuvre ici.

Le procédé de l'invention est donc efficace tant en terme de vitesse de coupe qu'en termes de qualité de coupe sur l'acier inoxydable.

## Revendications :

1. Procédé de coupage par faisceau laser d'une pièce en acier inoxydable, dans lequel on utilise des moyens de génération de faisceau laser comprenant au moins une fibre contenant de l'ytterbium pour générer le faisceau laser servant à fondre la pièce et à ainsi réaliser la découpe proprement-dite, et dans lequel un gaz d'assistance pour le faisceau laser est utilisé, caractérisé en ce que les moyens de génération du faisceau laser comprennent un orifice d'injection du gaz ayant un diamètre compris entre 0.5 et 4 mm que le facteur de qualité du faisceau laser est compris entre 2 et 8 mm.mrad, la pièce en acier inoxydable a une épaisseur comprise entre 0,25 et 30 mm, le faisceau laser a une puissance comprise entre 0,1 et 25 kW et le gaz d'assistance a une pression comprise entre 8 et 25 bar et le gaz d'assistance est un gaz inerte choisi parmi l'azote, l'argon, l'hélium et leurs mélanges.
2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que la fibre est formée d'un cœur dopé à l'ytterbium recouvert de silice.
3. Procédé selon l'une des revendications 1 ou 2, caractérisé en ce que le faisceau laser généré par la fibre à base d'ytterbium a une longueur d'onde entre 1 et 5  $\mu\text{m}$ .
4. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que le faisceau laser généré par la fibre à base d'ytterbium a une longueur d'onde entre 1.07 et 1.09  $\mu\text{m}$ .
5. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que le faisceau laser a une puissance comprise entre 0.5 et 15 kW.
6. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que le faisceau laser est continu ou pulsé.
7. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que la pièce à couper a une épaisseur entre 0.40 et 20 mm.
8. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que la vitesse de coupe est comprise entre 0.1 et 25 m/min.
9. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, caractérisé en ce que le gaz d'assistance du faisceau laser est choisi parmi l'azote, l'hélium, l'argon et leurs mélanges.

10. Procédé selon la revendication 9, caractérisé en ce que le gaz d'assistance contient un ou plusieurs composés additionnels choisis parmi O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>.
11. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, caractérisé en ce que le facteur de qualité du faisceau laser est supérieur à 3 mm.mrad.
12. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, caractérisé en ce que le facteur de qualité est inférieur à 7 mm.mrad.

FIGURE 1

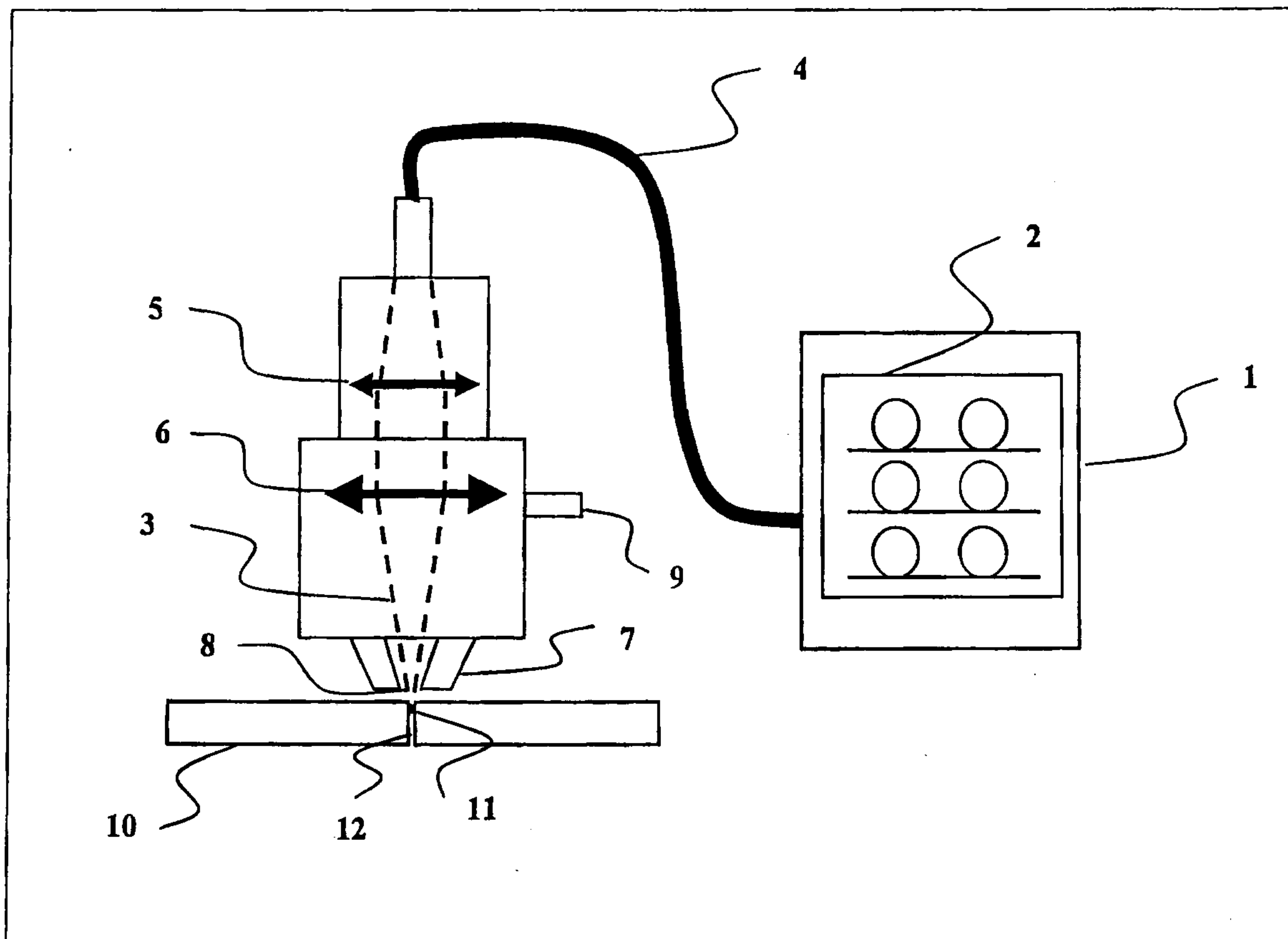
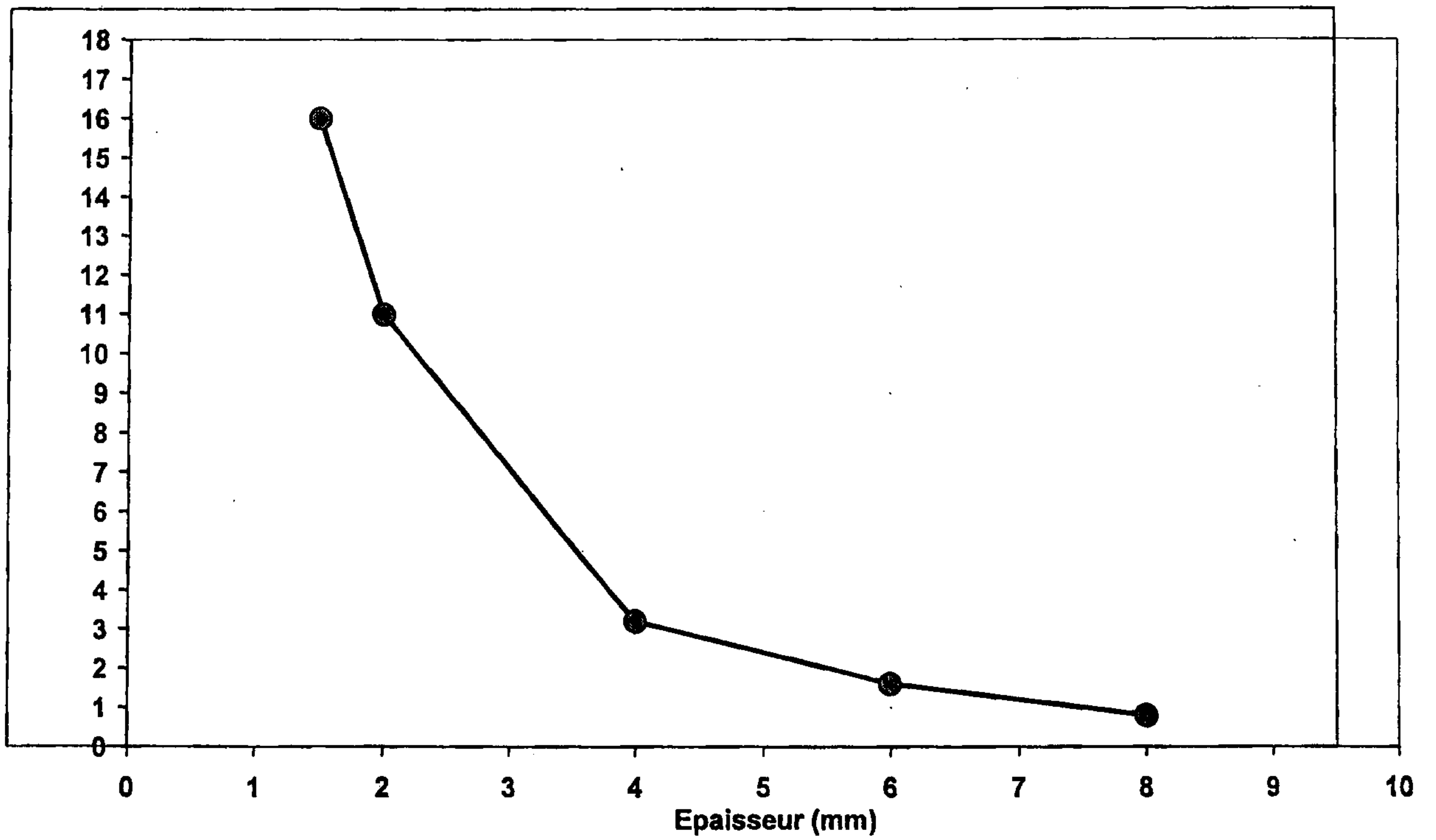


FIGURE 2

Vitesse (m/min)



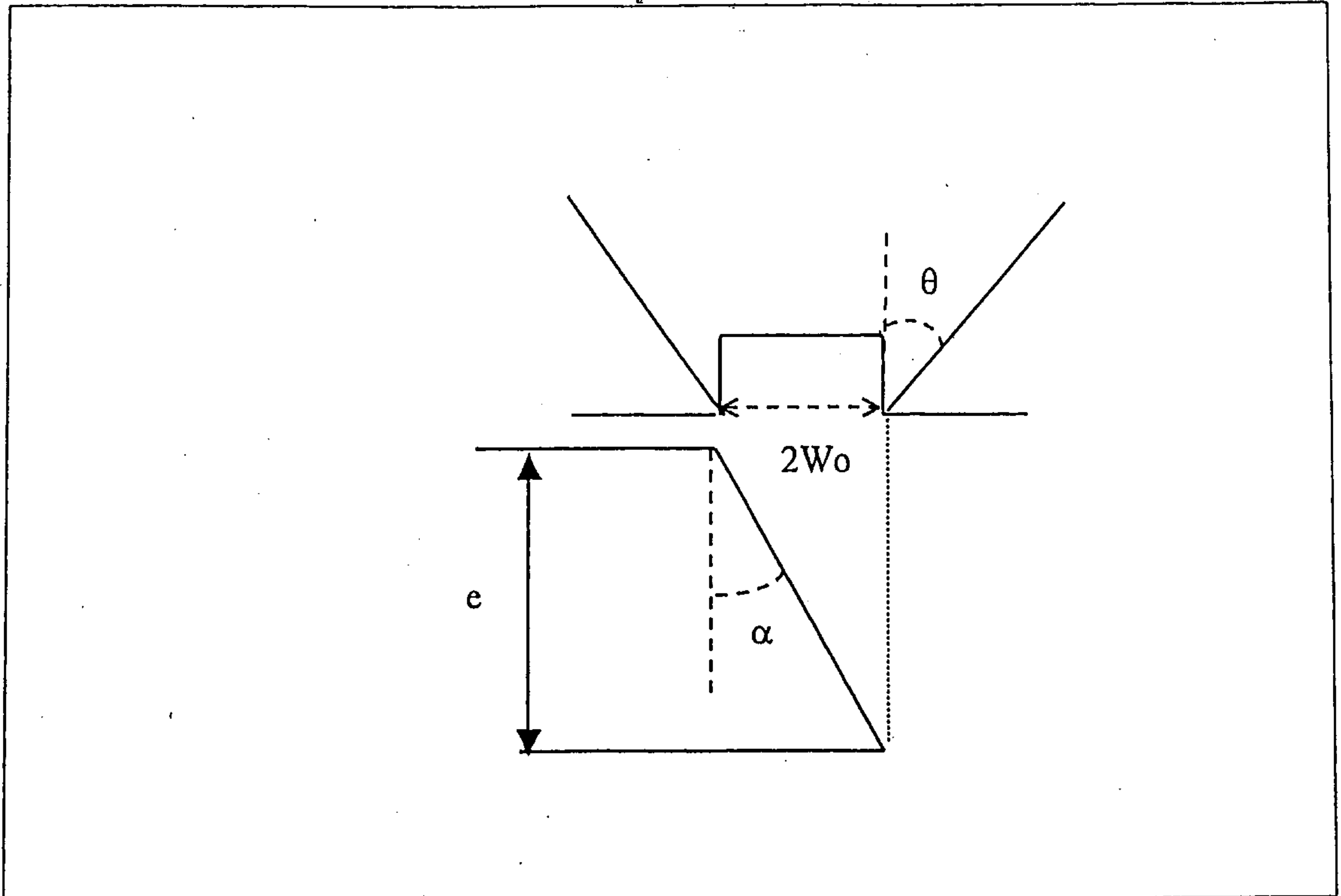


FIGURE 3

FIGURE 4

