

# Coupage thermique et coupage au jet d'eau

par **Gilles CANNET**

et **Michel DELZENNE**

Responsables de Groupes R&D  
au Centre Technique des Applications du Soudage (Air Liquide)

Cet article est une réactualisation du texte rédigé par Lucien VIGNARDET. Une partie du texte a été conservée.

1. Principe d'action .....	BM 7 280 - 2
2. Matériaux pouvant être coupés .....	— 4
3. Outils de mise en œuvre .....	— 4
4. Fluides utilisés .....	— 7
5. Déformations en coupage thermique .....	— 9
6. Mise en œuvre des outils de coupage .....	— 10
7. Domaines d'emploi .....	— 14
8. Investissements et éléments de décision .....	— 17
9. Éléments de prix de revient de la pièce coupée .....	— 18
10. Pollution. Hygiène. Sécurité .....	— 20
11. Récapitulatif pour choix .....	— 21
Pour en savoir plus .....	Doc. BM 7 280

L'oxycoupage, le coupage plasma et le coupage laser sont basés sur la fusion ponctuelle du matériau à découper (sur toute l'épaisseur) et sur le déplacement du front de fusion selon une trajectoire qui définit la forme de la découpe.

Le coupage au jet d'eau n'est pas basé sur la fusion et ne saurait être qualifié de coupage thermique, comme nous le verrons, mais il est fréquemment associé à ces procédés par le fait qu'il est aussi basé sur le déplacement d'un point d'impact et qu'il est donc mis en œuvre par des moyens assez similaires et sur un certain nombre d'applications proches.

Coupage thermique et coupage au jet d'eau se distinguent des procédés dits « mécaniques » par l'absence de contact et de réaction pièce/outil. Les procédés dits « mécaniques » sont généralement basés sur des phénomènes de cisaillement de la matière (poinçonnage à la presse, coupage à la cisaille) ou d'arrachement de matière (tronçonnage à la meule ou à l'outil).

Le coupage par étincelage (sous eau, avec une électrode en graphite ou un disque comme électrode), le gougeage à l'arc (avec électrode en graphite et soufflage d'air), l'emploi de lances thermiques (tube d'acier rempli de fils de et/ou d'aluminium brûlant dans un courant d'oxygène) sont également des coupages

thermiques, mais nous ne les décrirons pas ici en raison de leurs applications très particulières.

Nous nous limiterons aux principaux aspects de la mise en œuvre des quatre procédés de coupage, pour des informations complémentaires et plus détaillées, le lecteur pourra se reporter aux ouvrages de Lucien Vignardet concernant le coupage et la préparation des éléments à souder, édités par les Publications de la Soudure Autogène.

## 1. Principe d'action

### ■ L'oxycoupage

Il met en œuvre l'énergie thermique générée par la combustion du fer, associée à l'énergie cinétique du jet d'oxygène qui permet l'éjection des oxydes produits, hors de la saignée. La combustion du fer nécessite la présence de flammes de préchauffage pour s'amorcer et s'entretenir ensuite correctement.

L'outillage de mise en œuvre est un chalumeau coupeur équipé d'une tête (ou buse) de coupe, et alimenté par les sources de gaz appropriées (oxygène et gaz combustible).

La figure 1 présente le schéma de principe d'une installation d'oxycoupage automatique.

### ■ Le coupage plasma

Le plasma est parfois baptisé quatrième état de la matière, faisant suite aux trois états classiques (solide, liquide, gazeux). Il se compose d'un grand nombre d'espèces (molécules, atomes et ions), le plus souvent dans des états excités, ainsi que d'électrons qui rendent le mélange conducteur de l'électricité.

Le coupage plasma met en œuvre une énergie électrique concentrée sous forme d'un jet de plasma à très haute température (15 000 à 20 000 K) qui fond le métal à son point d'impact (par effet thermique) et éjecte le métal fondu hors de la saignée par son énergie cinétique.

Ce jet de plasma est créé par établissement d'un arc électrique, dans un courant de gaz, entre une électrode (cathode) interne à la torche de coupage et la pièce à couper (anode). Un diaphragme (appelé tuyère) de faible diamètre et énergiquement refroidi est placé en sortie de torche ; son action de constriction sur la veine plasma la transforme en un jet plasma à haute densité de puissance (400 à 800 kW/cm<sup>2</sup>) et à vitesse supersonique (par rapport à la vitesse du son dans le milieu considéré).

L'installation de coupage est alimentée par un générateur électrique (selon la puissance délivrée et les caractéristiques recherchées, il peut être constitué d'un ensemble transformateur-redresseur à diodes, d'un bloc de puissance à transistors, du type onduleur ou hacheur, ou encore à thyristors) fournissant un courant continu réglé en intensité ou non.

La figure 2 présente le schéma de principe d'une installation de coupage plasma automatique.

### ■ Le coupage laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*)

Il met en œuvre une énergie de rayonnement par émission photonnique, sous forme d'un faisceau concentré de lumière cohérente et monochromatique, c'est-à-dire d'une seule longueur d'onde.

Le laser CO<sub>2</sub>, couramment utilisé en découpe, a une longueur d'onde de 10,6 µm. L'absorption de cette énergie par la pièce à l'impact du faisceau, focalisé par lentille ou miroir (en général la dimension de la tache focale est inférieure à 0,2 mm<sup>2</sup> et la densité de puissance en ce point est de 1 000 à 6 000 kW/cm<sup>2</sup>), provoque une

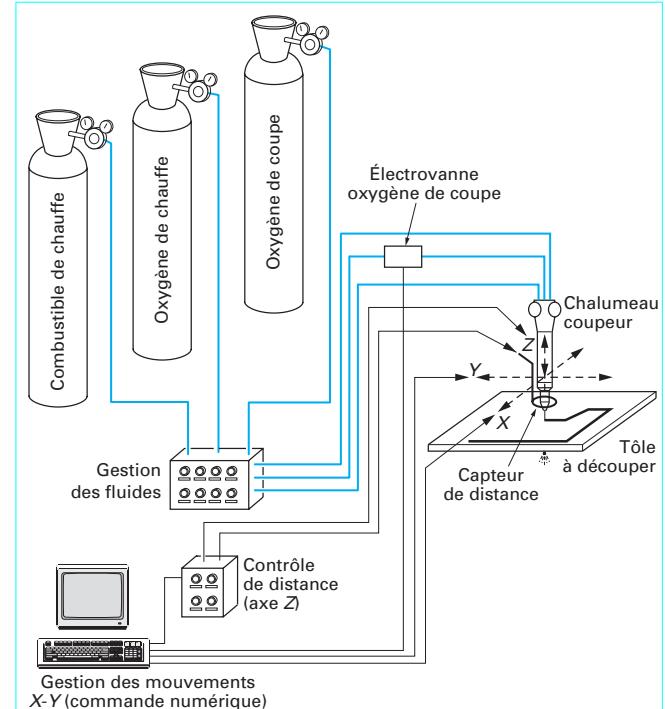


Figure 1 – Schéma de principe d'une installation d'oxycoupage automatique

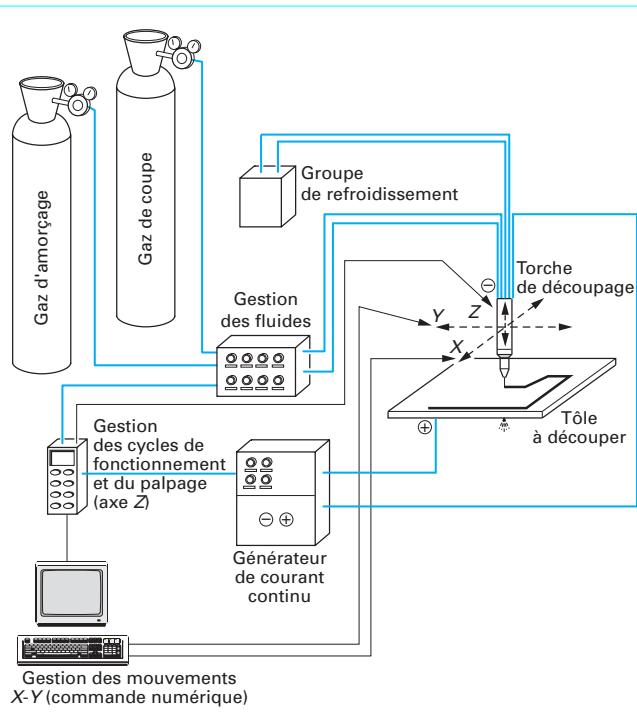
fusion/vaporisation du matériau, les fumées et éléments liquéfiés étant expulsés de la saignée par l'effet cinétique d'un jet de gaz de vitesse élevée, injecté dans l'axe du faisceau au travers d'une buse de faible diamètre (0,7 à 2 mm).

La tête de coupage, communément appelée tête de focalisation, est alimentée par une source laser ainsi que par une source de gaz d'assistance.

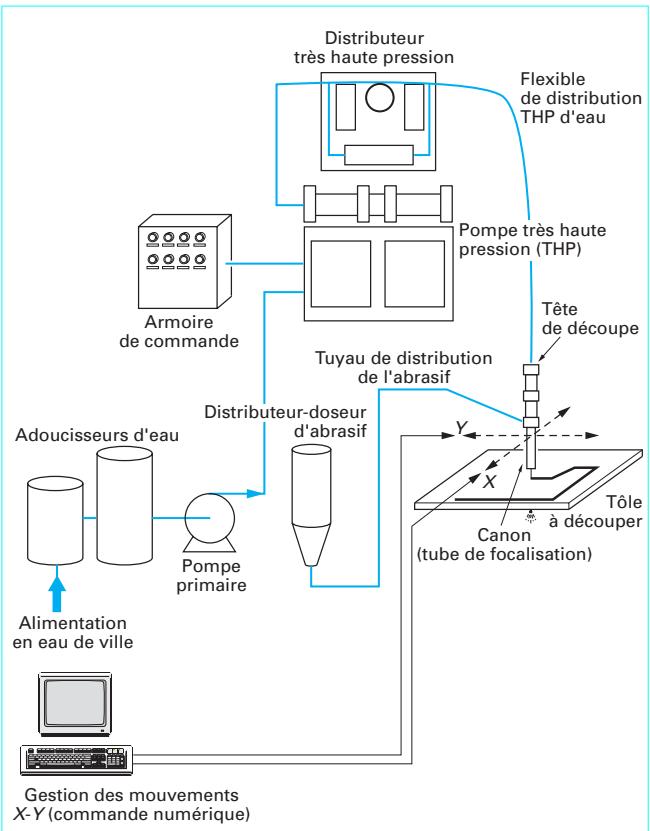
La figure 3 présente le schéma de principe d'une installation de coupage laser CO<sub>2</sub>.

### ■ Le coupage au jet d'eau

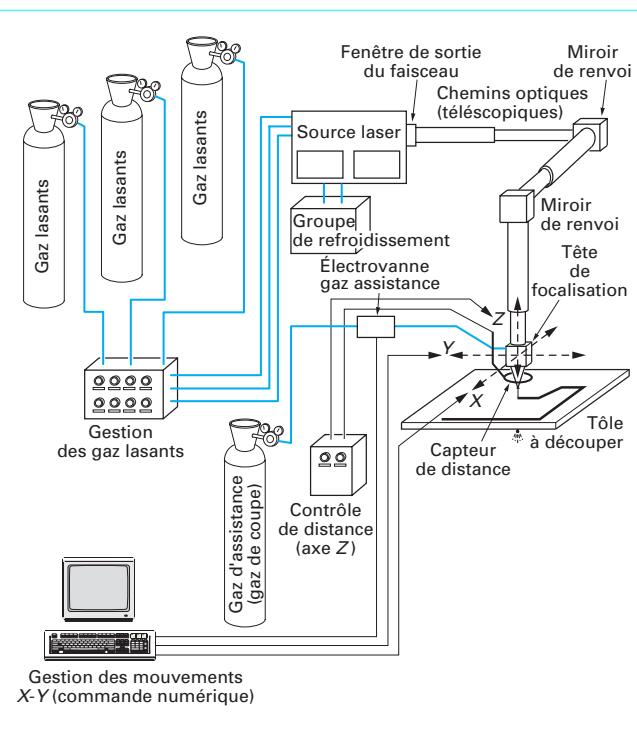
Il met en œuvre un « simple » jet d'eau très fin (quelques dixièmes de millimètre de diamètre), mais animé d'une vitesse très élevée résultant de la très haute pression d'injection, soit  $3 \times 10^6$  à  $5 \times 10^6$  hPa (3 000 à 5 000 bar). L'énergie cinétique de ce jet est alors susceptible d'exécuter de fines saignées sur des produits très divers (§ 2). Cette action cinétique de l'eau pure est souvent renforcée – pour le coupage de métaux ou alliages très durs – par l'addition de produits abrasifs dans l'eau.



**Figure 2 – Schéma de principe d'une installation de coupe plasma automatique**



**Figure 4 – Schéma de principe d'une installation de coupe au jet d'eau**



**Figure 3 – Schéma de principe d'une installation de coupe laser CO<sub>2</sub>**

L'outil de mise en œuvre est constitué par une buse en matériau très dur (en général, en saphir) alimentée par un générateur d'eau à très haute pression.

La figure 4 présente le schéma de principe d'une installation de coupe au jet d'eau.

Bien que les quatre procédés n'aient pas vu le jour en même temps et qu'ils aient atteint une maturité industrielle à des époques différentes, ils font toujours aujourd'hui l'objet de recherches pour améliorer leur productivité et la qualité des coupes produites ou pour simplifier leur utilisation ou encore pour diminuer le montant des investissements et des coûts de production des pièces découpées.

La figure 5 regroupe les principales étapes du développement de chaque procédé, soit :

A : découverte du principe de base ;

B : première ébauche technologique, maquette de laboratoire ;

C : premier appareil à vocation réellement industrielle ;

D : démarrage des applications dans l'industrie ;

E : période de croissance technique du procédé et recherche des conditions opératoires optimales ;

F : maturité à peu près complète en milieu industriel.

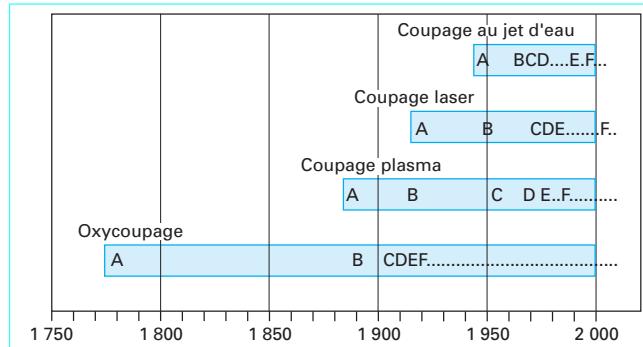


Figure 5 – Principales étapes de développement des différents procédés de coupage

## 2. Matériaux pouvant être coupés

■ **L'oxycoupage** est très répandu, car il permet de couper simplement et proprement les **acières non alliés ou faiblement alliés**. Ces aciers constituent la plus grosse part en tonnage des métaux utilisés. Les équipements de mise en œuvre peuvent être simples et légers (§ 6), même pour couper des épaisseurs importantes (200 à 300 mm) (figure 6) ce qui contribue encore à la diffusion du procédé.

Les limites à l'emploi sont :

- d'ordre chimique : présence d'oxydes réfractaires qui bloquent la combustion du fer dans les aciers inoxydables ;
- d'ordre métallurgique : formation de microfissures sur les aciers autotrempants ; pour limiter ce dernier risque, il convient de préchauffer les pièces à couper.

Pour le coupage des **acières alliés et inoxydables**, il existe une variante du procédé qui consiste à injecter de la poudre de fer dans le flux d'oxygène ; celle-ci en brûlant augmente l'apport thermique et produit des oxydes de fer capables de diluer les oxydes de chrome et de nickel particulièrement réfractaires. Cette technique dite d'**oxycoupage à la poudre de fer**, est employée en sidérurgie, pour des épaisseurs de plus de 50 mm. Elle tend à être remplacée par le coupage au plasma.

■ **Le coupage plasma**, ne faisant pas intervenir de notion de combustion du métal, mais procédant par fusion/éjection, peut intervenir sur tous les **matériaux conducteurs de l'électricité**, en fait les métaux, y compris bien sûr les aciers non alliés évoqués précédemment.

■ **Le coupage laser** peut intervenir aussi bien sur de nombreux **métaux** que sur les substances ou **matériaux non métalliques**, tels que tissus, plastiques, bois (contre-plaqués), etc.

Quelques métaux sont très « réfléchissants », l'aluminium, le cuivre et l'or notamment. N'absorbant qu'une faible partie du rayonnement reçu, leur découpage par laser nécessite des puissances laser très importantes et donc les épaisseurs susceptibles d'être découpées sont limitées.

■ **Le coupage au jet d'eau** peut intervenir sur **tous les matériaux**, comme le coupage laser, mais les vitesses de coupe de ce procédé sont très faibles sur les métaux dès que les épaisseurs dépassent quelques millimètres.

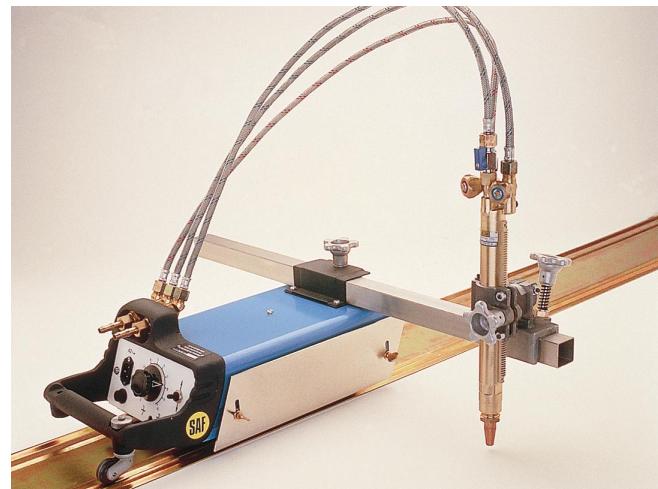


Figure 6 – Chariot d'oxycoupage

Il est surtout employé sur des métaux nobles très durs ou particulièrement sensibles à l'oxydation (titane) et difficilement accessibles aux autres procédés. Ne provoquant ni carbonisation de surface ni choc thermique (la température dans la saignée ne dépasse pas 80 °C), il est particulièrement employé dans l'industrie textile pour couper des tissus, dans l'industrie aéronautique, dans l'industrie agroalimentaire (§ 7.4.3), mais aussi pour la découpe de céramiques, de marbres, de plastiques ; de plus, le procédé étant insensible aux écarts de température de fusion et de conductivité thermique des matériaux, il est particulièrement intéressant pour la découpe de matériaux composites, métal/métal, métal/céramique, métal/résines, verres blindés, etc.

## 3. Outils de mise en œuvre

Il convient de rappeler que, en laser et en plasma, la coupe est obtenue par fusion localisée du métal. L'énergie nécessaire à cette fusion est apportée par la source, la torche. La puissance mise en œuvre est donc un paramètre déterminant. La puissance donne une indication sur la productivité et sur la consommation (électrique).

En oxycoupage, la coupe est obtenue par la combustion du métal dans l'oxygène. Le procédé est quasiment « énergétiquement » indépendant. La notion de puissance serait ici purement académique (il y a bien travail puisque le métal est coupé ; il y a un temps de réalisation de ce travail donc il est possible de calculer une puissance...). La « puissance » de l'oxycoupage ne serait en tout cas pas comparable (ni en tant que concept, ni en valeur) avec la notion de puissance d'une torche plasma ou d'un laser.

### 3.1 Oxycoupage

L'outil de coupe est la **tête de coupe** (parfois nommée buse de coupe) ; celle-ci est portée et alimentée par le **chalumeau coupeur** (parfois nommé torche).

Les chalumeaux coupeurs se distinguent selon plusieurs critères :

- leur mode d'utilisation ;
- leur type de mélange des gaz de chauffe.

#### • Mode d'utilisation

Le chalumeau **manuel** comporte, comme le chalumeau soudeur, un manche ou corps, tenu par l'opérateur, comprenant les arrivées, circuits et robinets de l'oxygène et du gaz combustible (acétylène, propane, Tétrène, Crylène, etc.), et, en plus, un circuit d'oxygène de coupe, dont la commande est indépendante de celle des autres circuits (figure 7 a). Le manche est prolongé par les conduits de chauffe et de coupe, qui aboutissent à la pièce porte-tête, dans laquelle une tête de coupe est fixée par un écrou (ou parfois directement vissée). Un dispositif de sécurité (anti-retour pare-flamme) est installé sur chaque canalisation d'alimentation en gaz, de préférence à l'intérieur même du manche.

Le chalumeau **machine** comporte les mêmes circuits de gaz, contenus dans un fût, et est terminé par une tête de coupe. Le fût est destiné au montage sur le porte-chalumeau des machines, il peut comporter une crémaillère destinée à faciliter le positionnement par rapport à la tôle. Le chalumeau doit être alimenté au travers de dispositifs de sécurité : un dispositif anti-retour pare-flamme pour l'oxygène de chauffe et pour le combustible, un clapet anti-retour pour l'oxygène de coupe (figure 7 b).

#### • Type de mélange des gaz de chauffe

Dans les chalumeaux à **mélange préalable**, le gaz combustible et le gaz comburant sont mélangés avant de parvenir à la tête de coupe.

Dans les chalumeaux à **mélange dans la tête**, le mélange ne s'opère que dans la tête.

Les **têtes de coupe** sont donc à mélange préalable ou mélangeuses (figure 8). Elles sont aussi différentes pour les usages manuels et pour la coupe automatisée : plus précises, plus performantes et généralement chromées pour la coupe automatisée, mais aussi plus chères.

La tête de coupe est choisie en fonction :

- du chalumeau utilisé ;
- du combustible utilisé ;
- de la pression d'oxygène disponible ;
- du travail à effectuer (épaisseur à couper, coupe droite ou chanfrein) ;
- de la qualité de coupe visée ;
- de la vitesse de coupe recherchée ;
- de sa longévité et de sa facilité de maintenance.

Dans tous les cas, la tête de coupe doit être très rapidement démontable : travaillant dans des conditions très sévères, elle doit être changée assez souvent pour son entretien.

Les têtes de coupe présentent toutes sur leur face avant :

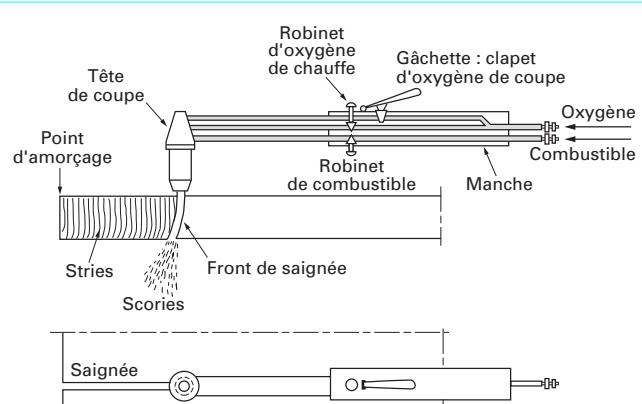
- un orifice central, bien calibré, pour le jet d'oxygène de coupe ;
- une série d'orifices placés en couronne autour du précédent et permettant la formation des flammes de chauffe.

La figure 8 fournit deux exemples de technologie de construction selon que les gaz de chauffe (ou de préchauffage) sont mélangés au préalable ou directement dans la tête.

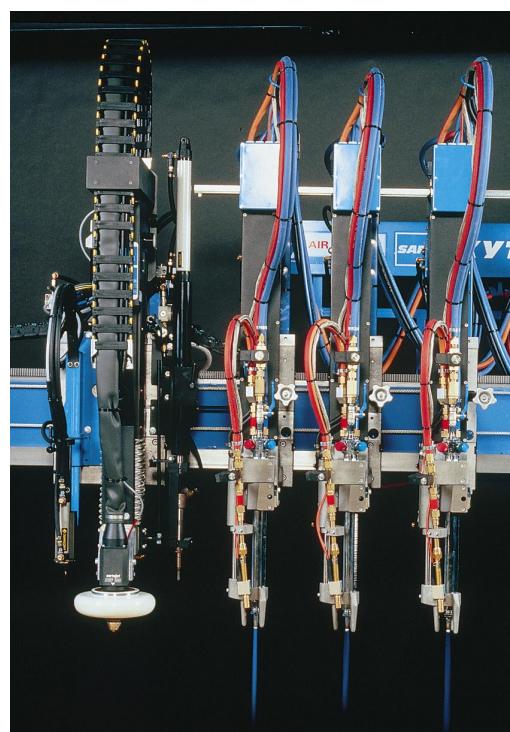
## 3.2 Coupage plasma

L'outil de base est la torche de coupe et sa technologie se rapproche de celle des torches de soudage plasma (cf. article *Soudage à l'arc. Soudage au plasma et autres procédés* dans ce traité).

Les torches peuvent se classer dans deux familles distinctes selon la nature des gaz plasmagènes utilisés.



a) chalumeau coupeur manuel : schéma



b) chalumeau coupeur machine sur son bouclier support

Figure 7 – Chalumeau d'oxycoupage

## Torches à électrodes pointues

Elles sont équipées d'une électrode en tungstène usinée en pointe (figure 9) et utilisent des mélanges argon + hydrogène, azote + hydrogène, azote + argon + hydrogène ou parfois de l'azote (pour les torches à faible puissance) comme gaz plasmagène. Ces gaz sont injectés parallèlement à l'électrode qui ne subit pas de contraintes d'oxydation susceptible de la détruire, puisque argon et azote sont inertes et que l'hydrogène – lui – est réducteur (en pré-

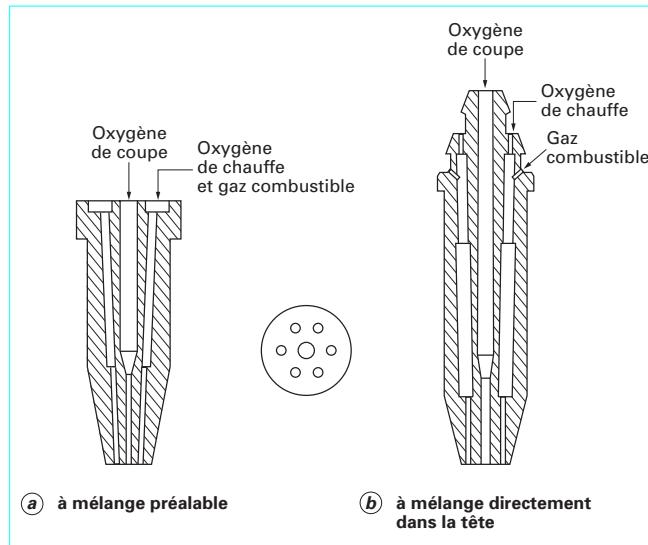


Figure 8 – Têtes de coupe : exemples de technologie de construction

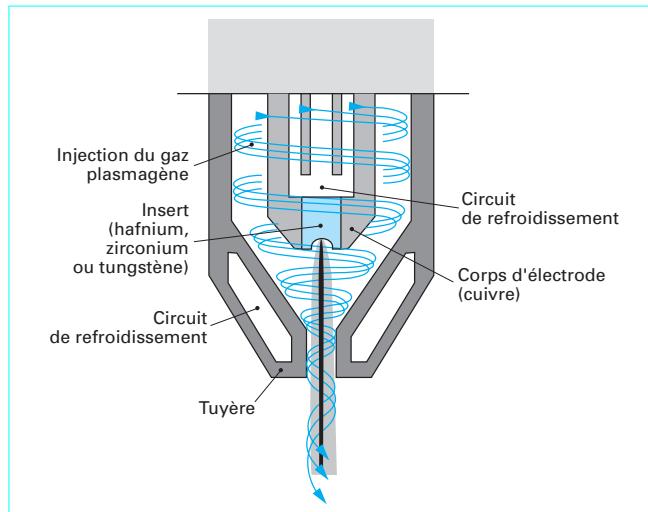


Figure 10 – Torche monogaz à électrode plate avec injection tangentielle du gaz

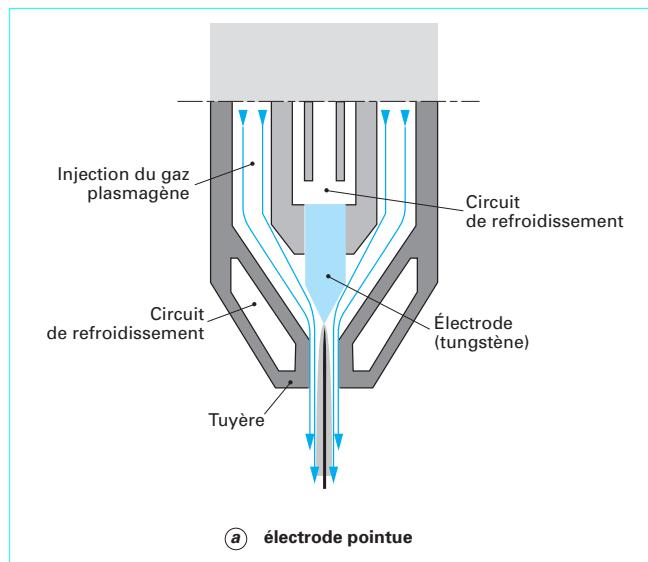


Figure 9 – Torche monogaz à électrode pointue avec injection axiale du gaz

sence d'oxygène il se forme des oxydes de tungstène à faible température de sublimation, par exemple :  $W_3O_8 = 800^\circ C$ .

#### ■ Torches à électrodes plates

Elles sont équipées d'un corps d'électrode en cuivre ou alliage de cuivre à l'extrémité duquel est inséré un petit élément cylindrique en métal très émissif (du zirconium, plus souvent de l'hafnium, voire d'autres matériaux) destiné à recevoir la racine de l'arc plasma. Ces matériaux ne supportant pas de densité de courant très élevée, la cathode ainsi constituée est généralement usinée à extrémité plate, mettant à niveau l'insert émissif et le support en cuivre (figure 10).

Ce type de torche est surtout destiné à mettre en œuvre :

- l'oxygène, comme gaz plasmagène pour les applications de découpe sur machines automatiques ;
- également, l'air comprimé, mais plutôt pour des opérations de découpe manuelles ;
- parfois, l'azote à puissance élevée, mais dans ce cas, l'insert émissif est réalisé en tungstène.

Compte tenu de la géométrie de ces électrodes et de la nécessité de maintenir le pied cathodique de l'arc à l'état quasi stationnaire sur l'insert émissif selon l'axe défini par l'orifice de la tuyère, placée en aval, le gaz est généralement injecté tangentiellement dans la chambre plasmagène ; cela détermine un écoulement tourbillonnaire et forme ainsi un vortex, dans l'intervalle séparant l'extrémité de l'électrode et l'entrée de la tuyère ; la zone de dépression axiale du vortex crée les conditions favorables à la stabilisation du pied cathodique de l'arc.

Ce type de torche peut être complété par un dispositif de post-injection d'eau (figure 11), également en vortex ; ce dispositif améliore quelque peu les performances (dissociation partielle des molécules d'eau et recombinaison dans la saignée avec dégagement de chaleur) mais rend surtout possible la découpe de pièces immergées dans un bac à eau pour préserver l'environnement immédiat des nuisances telles que le bruit du jet plasma, son rayonnement ainsi que les fumées produites par la découpe.

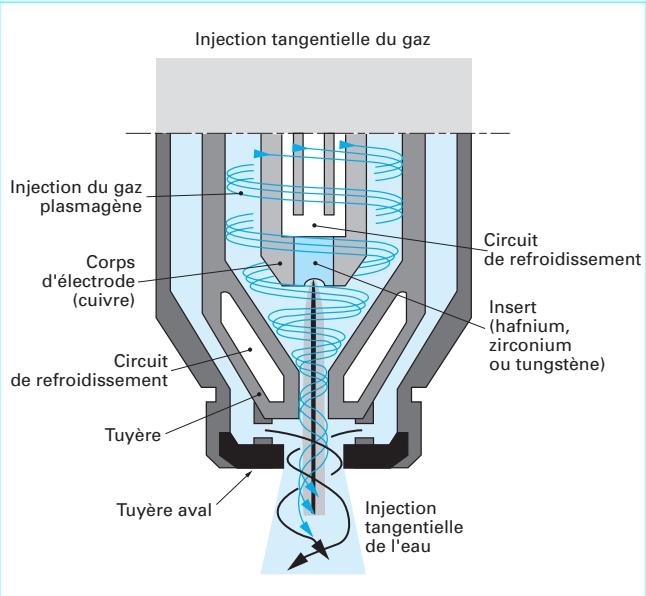
■ Les puissances mises en jeu pour le coupage plasma s'échelonnent de quelques kilowatts à 100 kW, voire un peu plus :

- air comprimé : ≈ 1,3 à 17 kW ;
- oxygène : ≈ 1,5 à 35 kW ;
- argon + hydrogène : ≈ 9 à 90 kW ;
- azote + vortex eau : ≈ 3,5 à 110 kW.

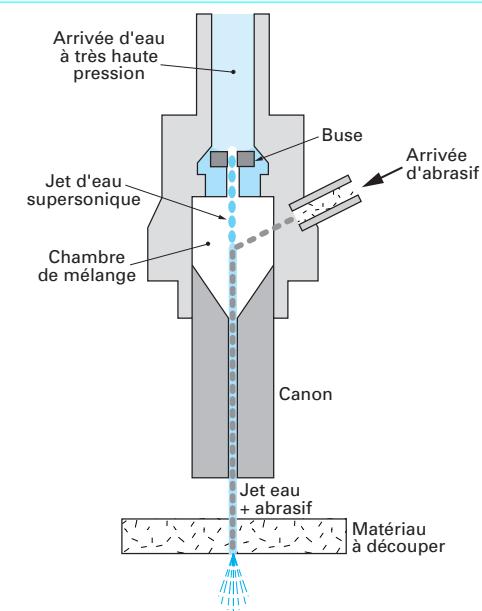
### 3.3 Coupage laser

Par analogie avec le coupage plasma ou l'oxycoupage, nous appellerons « outil » l'ensemble placé à proximité de la pièce à couper et assurant les fonctions suivantes :

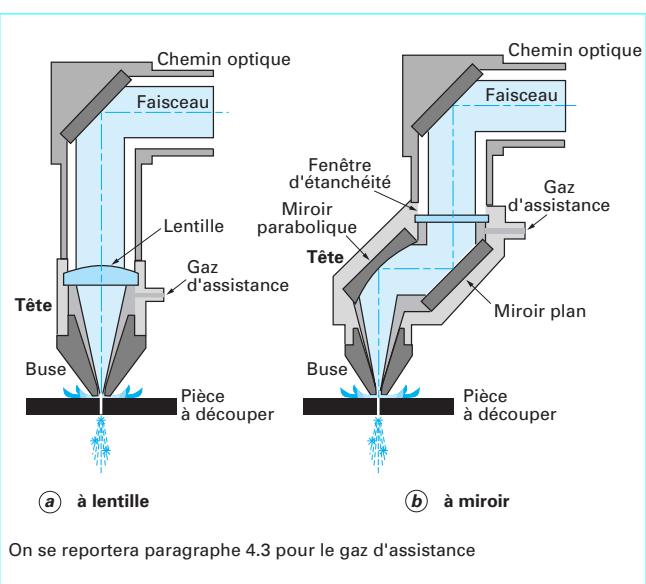
- à partir d'un faisceau faiblement divergent émis par la source laser, une **focalisation**, obtenue par lentille ou miroir, permettant de concentrer sur une surface aussi petite que possible le rayonnement reçu ;



**Figure 11 – Coupage plasma : torche à électrode plate avec injection tangentielle du gaz et dispositif de post-injection d'eau**



**Figure 13 – Tête de découpe avec abrasif**



On se reportera paragraphe 4.3 pour le gaz d'assistance

**Figure 12 – Tête de focalisation laser : exemples de réalisation technologique**

— à partir d'une alimentation en gaz sous pression, un **soufflage** énergique dans la saignée pour dégager cette dernière des produits de fusion / vaporisation / combustion du matériau coupé.

La figure 12 donne deux exemples de réalisation technologique d'une telle tête de coupe, l'élément fondamental restant la source laser elle-même.

La **puissance** mise en jeu se situe entre 50 et 100 kW environ, pour une puissance utile au niveau de la tête de 1 500 à 3 000 W (rendement très faible).

### 3.4 Coupage au jet d'eau

L'outil de coupe proprement dit est relativement simple et comporte une buse de sortie, généralement en saphir, raccordée à la tuyauterie d'arrivée d'eau sous pression.

L'ensemble est parfois complété par un dispositif d'injection d'abrasif en poudre, surtout pour le coupage des métaux ou plus généralement des matériaux durs.

La figure 13 montre un exemple de tête de découpe au jet d'eau avec injection d'abrasif.

Comme pour le coupage laser, l'élément fondamental reste l'ensemble générateur d'eau sous pression qui doit, rappelons-le, délivrer des pressions de 3 000 à 5 000 hPa.

## 4. Fluides utilisés

### 4.1 Oxycoupage

#### ■ Oxygène (de coupe)

Ce gaz est livré en général avec une teneur en impuretés garantie inférieure à 0,5 % (**teneur en oxygène** > 99,5 %), ce qui est suffisant pour le procédé. Une teneur en oxygène supérieure améliore la vitesse opératoire et la qualité. L'utilisation d'un oxygène de qualité « laser » a fait ses preuves chez des utilisateurs exigeants. L'utilisation d'oxygène titrant moins de 98 % entraîne une réduction de la vitesse opératoire ; descendre au-dessous de 96 % ne permet plus un oxycoupage industriel propre et à vitesse acceptable.

Une **pureté** constante est une garantie de la constance des résultats. La pureté de l'oxygène doit être considérée à la sortie du chalumeau et non dans la cuve ou dans les bouteilles de stockage ; cela implique des canalisations propres, des flexibles et raccordements

étanches et des procédures de purge des circuits après des arrêts prolongés. Le contrôle et la maintenance des circuits de gaz est autant profitable à la sécurité qu'à l'économie, la productivité et la qualité du travail.

#### Gaz de chauffe

La flamme de chauffe a trois rôles fondamentaux :

- porter localement le métal à une température suffisante (de l'ordre de 1 300 °C) pour que la réaction fer-oxygène puisse s'initier et ensuite s'entretenir ;
- assurer la stabilité de la coupe, en particulier sur des tôles calaminées ou grasses ou revêtues ou peintes ;
- autoriser les meilleurs compromis entre vitesse et qualité de coupe.

Si tous les gaz combustibles permettent d'obtenir la température nécessaire à l'amorçage de la réaction, tous ne le permettent pas aussi rapidement. Bien entendu, ils sont associés à l'oxygène comme gaz comburant, mais à partir d'une alimentation séparée de celle de l'oxygène de coupe.

Les températures de flamme maximales calculées (au niveau du *dard*) des principaux combustibles sont données tableau 1.

**Tableau 1 – Températures de flamme des principaux combustibles utilisés en oxycoupage**

Combustible	Température maximale (°C)	Remarque
acétylène C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	3 170	gaz très performant, mais nécessitant quelques précautions d'emploi
propane C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2 840	gaz d'emploi plus sûr, mais de performances plus modestes

Un compromis a été recherché avec la commercialisation des gaz de synthèse issus de l'industrie pétrochimique tels que MAPP (Dow Chemical), Apachi (Air Products), Tétrène (Air Liquide), Flamex (Aga) ou encore Crylène (Air Liquide), etc., qui possèdent une température de flamme intermédiaire (entre celle de l'acétylène et celle du propane) et une bonne facilité et sûreté de mise en œuvre.

Enfin, mentionnons pour mémoire le gaz naturel, parfois utilisé en fonction de disponibilités particulières malgré ses performances modestes (2 730 °C).

Le choix d'un combustible résulte d'une analyse précise des objectifs techniques et économiques recherchés dans l'application.

Le domaine des combustibles est encore en évolution et de nouvelles solutions toujours mieux adaptées aux exigences spécifiques des utilisateurs seront disponibles dans les années à venir.

## 4.2 Coupage plasma

Le choix du gaz, du mélange gazeux ou éventuellement d'un fluide additionnel (eau en général), utilisé pour la génération du plasma se fait en fonction de la nature des travaux envisagés et, plus particulièrement, de la nature des matériaux à couper ainsi que de leur épaisseur (tableau 2).

**Tableau 2 – Combinaisons de fluides pouvant être utilisées pour le coupage plasma des aciers inoxydables et des alliages légers**

Fluide plasmagène	Fluide d'assistance en post-injection	Épaisseur minimale (mm)	Épaisseur maximale (mm)
azote		0,5	25
azote + hydrogène		0,5	10
azote + argon + hydrogène		0,5	10
argon + hydrogène		8	130 à 150
azote	azote	0,5	3
azote + hydrogène	azote	2,5	8
argon + hydrogène	azote	8	25
azote	azote + méthane	0,5	6
azote	dioxyde de carbone	0,5	6
air comprimé	méthane	0,5	6
azote	eau	0,5	50 à 60

■ Pour les **aciés non alliés ou faiblement alliés**, on utilise :

- l'oxygène, principalement en découpe automatique jusqu'à des épaisseurs de 25 à 30 mm ;
- l'air comprimé pour la découpe manuelle ou automatique jusqu'à des épaisseurs de 40 à 50 mm, mais surtout lorsque le prix de revient est prépondérant par rapport à la qualité ;
- l'azote, avec post-injection d'eau, jusqu'à des épaisseurs de 50 mm, lorsqu'une diminution des nuisances (bruit, rayonnement, fumées) mais aussi des déformations thermiques subies par les pièces coupées est recherchée.

■ Pour le coupage des **aciés inoxydables et des alliages légers**, par contre, les mélanges argon + hydrogène, azote + hydrogène, azote + argon + hydrogène sont généralement utilisés avec des torches monoflux. Des torches à double injection de flux :

- un gaz ou un mélange gazeux pour former la colonne plasma,
- un gaz ou un mélange gazeux, distribué autour de celle-ci, pour isoler la saignée, en cours de formation dans la pièce, de l'influence de l'air ambiant, afin d'éviter l'oxydation des faces coupées,

donneront généralement des coupes de qualité supérieure notamment dans le domaine des faibles épaisseurs.

L'azote et post-injection d'eau est également utilisé pour le coupage de ces matériaux jusqu'à des épaisseurs de 50 à 60 mm, pour les raisons déjà évoquées pour les aciers non alliés ou faiblement alliés, mais aussi pour les bonnes qualités de coupe procurées par ce procédé.

## 4.3 Coupage laser

L'alimentation de la source de rayonnement laser est indépendante de celle de l'outil de coupage.

Rappelons que les lasers à CO<sub>2</sub>, de loin les plus utilisés, nécessitent un mélange de CO<sub>2</sub>, d'azote et d'hélium, voire d'hydrogène, en proportions très précises, bien que variables, éventuellement, d'un constructeur à l'autre.

En ce qui concerne le gaz d'assistance ou de chasse injecté dans la tête de coupage, on recherche a priori son action cinétique sur le

métal fondu pour éjecter celui-ci de la saignée. Il s'ensuit que, théoriquement, n'importe quel gaz, de masse moléculaire élevée, pourrait convenir mais, en pratique, le choix judicieux du gaz utilisé permet d'obtenir de meilleures performances.

■ Pour couper les **acières de construction**, on utilise de l'oxygène, ce qui, compte tenu de la teneur en fer de ceux-ci, ajoute un effet « oxycoupage » à l'effet laser. Cet effet est d'autant plus marqué que la pureté de l'oxygène est élevée, toutefois, au-delà d'une pureté de 99,95 % (garantie de pureté minimale du LASAL 2003 de Air Liquide), les gains de productivité deviennent négligeables.

■ L'oxygène est également utilisé pour le coupage du **cuivre et de ses alliages**, ainsi que pour les **alliages d'aluminium**. Rappelons, néanmoins, que le cuivre et l'aluminium sont difficiles à couper à cause de leur pouvoir réfléchissant élevé.

■ Les **acières inoxydables**, dans leurs différentes nuances c'est-à-dire avec des teneurs en nickel et en chrome variées, peuvent être coupés avec :

— de l'oxygène pur, lorsque les critères économiques occupent le premier rang des préoccupations (vitesse de coupe élevée, consommation de gaz d'assistance faible, mais qualité de coupe médiocre notamment par formation importante d'oxydes de chrome sur les faces coupées) ;

— de l'azote pur (exemple : LASAL 2001 de Air Liquide), lorsque le critère de qualité de coupe est prépondérant (qualité maximale, mais vitesse de coupe plus faible et consommation de gaz d'assistance plus élevée).

Des résultats intermédiaires peuvent être obtenus par mélange des deux gaz et en dosant la quantité d'oxygène contenu dans l'azote en fonction des critères de productivité, d'économie et de qualité recherchés. Ces mélanges peuvent être obtenus à partir de bouteilles contenant le pré-mélange choisi ou à partir d'un mélangeur permettant de faire varier le dosage des deux composants ou encore à partir d'un système de production sur site, par filtration de l'air au travers d'un système de membranes (exemple : système FLOXAL de Air Liquide).

#### 4.4 Coupage au jet d'eau

Pour limiter les problèmes posés par les organes d'étanchéité de l'unité de pompage, il faut mettre en œuvre de l'eau déminéralisée et surtout soigneusement filtrée.

L'eau peut être additionnée, lorsque l'application le permet, d'un polymère soluble qui augmente la cohérence du jet à la sortie de la buse. Cette disposition autorise une plus grande souplesse dans la distance buse matériau et des épaisseurs plus importantes.

Si l'on a recours à une post-addition d'abrasif dans l'eau, on peut adopter :

- un laitier (pulvérisé) de silicate ;
- de l'olivine (roche volcanique) en poudre ;
- de la poudre de grenat, de corindon, de carbure de silicium.

Cette liste est établie par ordre de duretés croissantes, étant entendu que les prix actuellement suivent, grossso modo, la même évolution.

### 5. Déformations en coupage thermique

Le coupage au jet d'eau n'est bien entendu pas concerné par ce paragraphe. Il est bien certain que la mise en œuvre d'un procédé thermique, quel qu'il soit, sur une pièce métallique ne peut que pro-

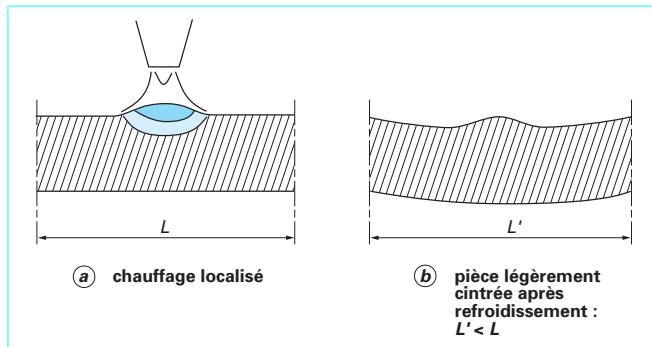


Figure 14 – Principe des chaude de retrait

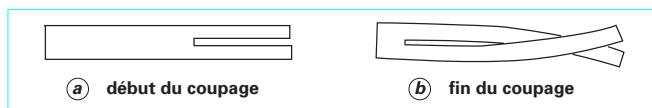


Figure 15 – Exemple de déformations en oxycoupage dues aux chaude de retrait

voquer des déformations qui seront plus ou moins importantes et plus ou moins gênantes au niveau opératoire.

#### 5.1 Phénomène de base des déformations

Le phénomène de base est très proche de ce que les chaudronniers appellent une **chaude de retrait**: si l'on chauffe rapidement une tôle de 20 mm d'épaisseur par exemple, on obtient une zone rouge sur la face supérieure alors que la face inférieure est beaucoup moins chaude (figure 14 a). Le métal porté au rouge est contraint par les lois physiques de se dilater mais, bridé par le métal environnant plus froid donc bien moins plastique, il ne peut que se gonfler (légerement bien sûr). Au refroidissement, surtout si ce dernier est assez rapide, le « gonflement » ne peut pas se résorber et provoque des tensions internes déformant légèrement la tôle et provoquant un « retrait » (figure 14 b).

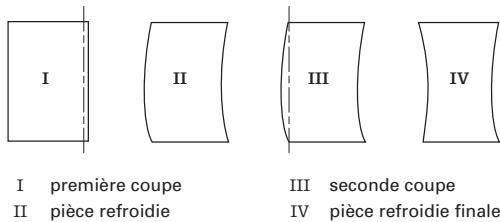
Transposé en oxycoupage, un exemple très classique est fourni par le coupage de deux bandes à partir d'un plat de plusieurs mètres de longueur. L'oxycoupage reproduit point par point sur toute la longueur de la coupe l'exemple précédent des chaude de retrait abutissant à des pièces coupées conformes à la figure 15, du moins si on ne prend aucune précaution opératoire pour lutter contre ces déformations. Dans ce cas, la précaution consisterait à mettre en œuvre trois chalumeaux simultanément pour ajouter deux coupes de rives à la coupe centrale et équilibrer ainsi les contraintes de retrait.

#### 5.2 Oxycoupage et coupage plasma

■ En **plasma**, l'énergie de coupage est apportée directement sous forme électrique et thermique combinées dans le jet plasma.

■ En **oxycoupage** elle provient de deux sources distinctes :

— la **flamme de préchauffage** constitue une première source externe ; dans les faits, elle fournit l'énergie initiale pour fondre superficiellement le métal, pour le porter à la température propice à



**Figure 16 – Exemple de coupe d'une pièce rectangulaire avec un chalumeau unique**

une réaction chimique avec le jet d'oxygène de coupe, puis, ensuite, elle entretient la réaction d'oxycombustion en compensant les pertes thermiques ;

— le jet d'**oxygène de coupe** en brûlant le fer contenu dans l'acier créé la deuxième source d'énergie, en réalité la plus importante des deux dans le processus de coupe ; cette combustion provoque un dégagement de chaleur intense dans la pièce provoquant la fusion des autres éléments de l'acier et leur expulsion hors de la saignée, ainsi formée, sous l'effet cinétique du jet d'oxygène.

Ces deux procédés vont nécessiter des **précautions opératoires** pour atténuer ou même éliminer les effets de déformations, par libération des contraintes thermiques, qui sont minimes pour le coupage plasma et plus notables pour l'oxycoupage.

Les précautions opératoires sont très variables et dépendent étroitement de la forme des pièces à découper.

Nous citerons un exemple à titre d'information. Supposons que nous désirions couper un rectangle de 1 m x 4 m (figure 16).

Nous couperons une première rive (pièce I), mais après refroidissement, la coupe, droite au moment de son exécution, va se cigner (pièce II). Sur cette pièce cintrée, nous allons exécuter la seconde coupe, droite également pendant l'exécution (pièce III), mais après refroidissement définitif, la tôle (pièce IV) sera plus large à ses extrémités qu'au centre.

Les différences, notamment dans le cas de l'oxycoupage, vont facilement atteindre plusieurs millimètres, ce qui peut être incompatible avec une utilisation ultérieure de ces pièces, notamment en soudage automatique (qui nécessite une bonne précision d'accostage pour s'exécuter sans incidents).

Le remède consiste à exécuter simultanément les deux coupes longitudinales en mettant en œuvre deux chalumeaux. Les contraintes internes dues au retrait ne seront certes pas éliminées (ce qui est impossible), mais équilibrées et la pièce ne se déformerai pas.

### 5.3 Coupage laser

L'énergie thermique résultant de l'absorption du faisceau laser par le matériau à couper, juste au point d'impact, est distribuée sur une surface extrêmement petite (environ  $0,1 \text{ mm}^2$ ), il en résulte que le volume de métal fondu par unité de temps est très faible (la saignée de coupe mesure 0,3 à 0,4 mm de large) et donc l'échange thermique par conduction (métal fondu vers métal froid) dans une direction transversale à la saignée est extrêmement limité. Cela fait que les déformations sont généralement négligeables avec ce procédé et ne posent pas de problème au niveau opératoire.

### 5.4 Précision de coupe

Cette notion ne peut être évoquée que dans le cadre du coupage machine, car, en coupage manuel, elle ne dépend que de l'habileté de l'opérateur à suivre son tracé.

Pour une machine en bon état d'entretien déplaçant des outils eux-mêmes bien entretenus, on peut espérer rester en deçà des chiffres d'erreurs de cote suivants :

- oxycoupage : 1 à 2 mm ;
- coupage plasma : 0,5 à 1 mm ;
- coupage laser : 0,1 à 0,2 mm.

On voit ainsi que le coupage laser permet d'obtenir un niveau de précision inaccessible aux deux autres procédés.

Le coupage au jet d'eau se situe dans les mêmes ordres de grandeur que le laser mais, *attention*, ce gros avantage de précision dans le coupage des métaux est lié à des points défavorables pour ces deux procédés, notamment, des performances en vitesse très médiocres dès que les épaisseurs s'accroissent et des investissements de mise en œuvre importants (§ 6).

## 6. Mise en œuvre des outils de coupe

### 6.1 Coupage manuel

**L'oxycoupage** et le **coupage plasma** peuvent être mis en œuvre avec des outils (chalumeaux ou torches) manuels, alors que le coupage laser CO<sub>2</sub> et le coupage au jet d'eau ne sont jamais – du moins actuellement – mis en œuvre à la main.

Le processus opératoire ne nécessite pas de longs commentaires. L'opérateur déplace son outil de coupe au-dessus de la pièce à une vitesse convenable et selon une trajectoire en général repérée par un tracé préalable directement exécuté sur la pièce ou définie par un guidage sommaire (règle, compas, etc.). Il lui suffit de prendre garde aux projections de scories ou de métal fondu, d'une part, et aux différentes pollutions éventuelles, d'autre part.

En dehors des projections, l'oxycoupage pollue peu, excepté le gaz carbonique produit par les flammes de chauffe (§ 10).

Le coupage plasma exige que l'on prenne un peu plus de précautions du fait du rayonnement d'arc et des fumées produites (lunettes et ventilation).

### 6.2 Coupage mécanisé

#### 6.2.1 Machines de mise en œuvre : généralités

Une machine de coupage thermique a pour fonction de déplacer un outil (chalumeau d'oxycoupage, torche plasma, faisceau laser ou jet d'eau) à une vitesse donnée sur une trajectoire donnée au-dessus de la pièce à découper.

La **vitesse** choisie doit équilibrer exactement la vitesse de propagation – sur la pièce – des phénomènes physicochimiques, physiques ou thermiques mis en œuvre. Elle doit donc être fixée en fonction des paramètres d'utilisation de l'outil de coupe et être maintenue aussi constante que possible par une régulation d'avance appropriée.

La **trajectoire** de l'outil détermine la forme et la précision dimensionnelle de la pièce à découper ; son « suivi » correct est assuré par un dispositif de guidage.

■ La toute première étape vers une **mécanisation de l'opération de coupage** a consisté à utiliser un simple guide à roulettes, l'utilisateur assurant alors lui-même la constance de la vitesse et le suivi correct de la trajectoire. Mais ce n'était qu'un premier pas et le besoin de dispositifs plus élaborés n'a pas tardé à se faire sentir.

- Les premiers guidages automatiques ont procédé par **lecture optique d'un dessin** placé sur la table de lecture de la machine de coupage. Un ensemble électronique exploitait les informations « optiques » pour assurer les déplacements convenables de la machine et surtout du ou des outils de coupe, en général par une motorisation de type XY. Les progrès de la micro-électronique ont, ensuite, permis l'utilisation de micro-ordinateurs montés directement sur les machines et pouvant être alimentés en données par :

- une bande perforée (programmation manuelle préalable) ;
- une série de « formes standards » déjà placées en mémoire et qu'il suffit d'appeler en précisant les dimensions désirées ;
- une tête de lecture optique qui, au cours d'un premier parcours « à blanc », permet la mémorisation de la forme de pièce qui sera ensuite découpée.

- Enfin, et c'est incontestablement, aujourd'hui, la pratique la plus répandue, la machine de coupage forme une cellule complète avec un directeur de commande (**CNC – Computer Numerical Control** – ou simplement appelée **commande numérique**) intégré à la machine et permettant la *programmation directe* des trajectoires de découpe ainsi que la gestion des cycles de fonctionnement des différents procédés.

Une autre tendance va vers la *programmation « hors ligne »* de ces machines pour ne pas cesser de produire pendant les séquences de nouvelle programmation. Cela consiste à relier la CNC de la ou des machines de coupage à un centre de programmation à partir duquel seront envoyées les nouvelles instructions par téléchargement. Ce centre de programmation est constitué d'un ordinateur de type bureau avec logiciel de DAO (dessin assisté par ordinateur) et complété, en général, par un logiciel d'imbrication automatique de pièces et de gestion des chutes de tôle à partir des standards dimensionnels de feuille définis par l'opérateur (figure 17), ainsi que des logiciels spécialisés (calcul de développés de tôles pour la chaudronnerie, la climatisation, la fumisterie...). Ce système, par ses performances propres, aidera et facilitera la préparation :

- pour calculer et dessiner les formes de pièces même très complexes ;
- pour procéder à l'imbrication judicieuse des pièces dans la tôle brute ;
- pour déterminer un parcours optimal à l'outil de coupage ; etc.

Toutes les données correspondantes sont stockées dans des fichiers informatiques aux formats correspondant aux langages machines et sont télétransmises à ces dernières aux moments opportuns pour de nouvelles opérations de coupage ou pour stockage local des données.

■ On peut sommairement classer les machines de coupage thermique en trois grandes **familles** distinctes :

- les chariots automoteurs ;
- les machines de reproduction (pour coupes de forme) comprenant les machines XY, les machines composites mixtes, les robots de coupage et les machines spécifiques (d'une application donnée) ;
- les bancs de chaudronnerie.

## 6.2.2 Chariots automoteurs

Machine simple, le chariot roulant sur la pièce à couper se borne à fournir un déplacement à vitesse constante et réglable, mais la fonction « suivi de trajectoire » reste assurée par l'opérateur. S'il

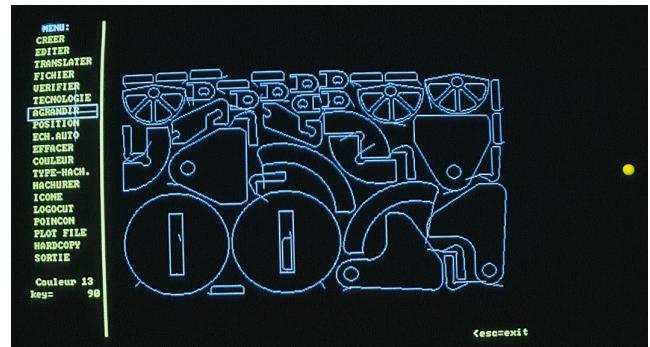


Figure 17 – Logiciel d'imbrication

s'agit d'exécuter une coupe rectiligne, un petit rail posé sur la tôle ou la pièce à couper peut remplir cette seconde fonction.

L'énergie motrice est fournie par l'électricité ou l'air comprimé et l'outil de coupe est fixé sur le côté du chariot (figure 6).

### 6.2.3 Machines de reproduction

#### 6.2.3.1 Machines XY

Il s'agit de machines destinées à découper des pièces de forme quelconque, métalliques dans leur grande majorité, à l'aide d'un parcours de type « contournage », puisque la coupe se termine lorsqu'on rejoint le point de départ.

■ La **forme** des pièces à réaliser est fournie par un « **gabarit** » que la machine doit suivre pendant tout le déroulement de l'opération de coupage (gabarit « physique », ou programme numérique).

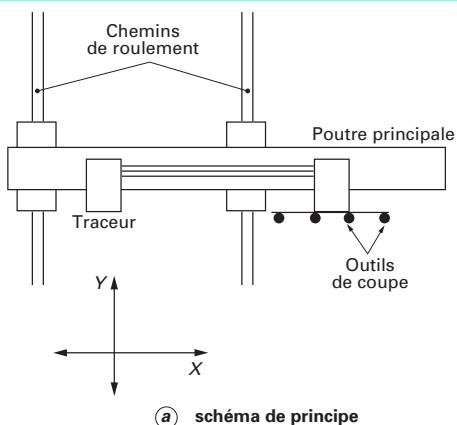
La majorité des opérations de coupage thermique concerne le coupage de pièces planes à partir de tôles brutes.

■ Les **déplacements d'outil** à réaliser sont donc essentiellement de type XY et les déplacements Z ne concernent – éventuellement – que l'ajustement de la distance verticale outil/pièce.

- Lorsque le gabarit de guidage est un **dessin** de la pièce à réaliser, la machine doit comporter une aire de lecture jouxtant une aire de coupage (figure 18). Elle possède donc des mouvements XY ou à chariots croisés mais sa charpente est en général du type **porte-à-faux**.
- Lorsque le guidage est assuré par **programme numérique**, la nécessité d'une table de lecture disparaît et la conception s'oriente logiquement vers une formule de type **portique** (figures 19 et 20).

Pour les deux types de guidage, on note une **différence fondamentale avec les machines-outils classiques** : les procédés thermiques ne donnent lieu – par principe même – à aucune réaction outil/pièce. De ce fait, les bâties de machine peuvent être de conception très allégée. Les contraintes auxquelles ils doivent résister se résument à leur poids propre et aux efforts d'inertie lors des changements de sens que comporte la trajectoire suivie. Dans ce dernier cas, l'absence de vibrations perceptibles et surtout de phénomènes de résonance constitue un objectif essentiel.

Trois types de machines de reproduction méritent une mention particulière.

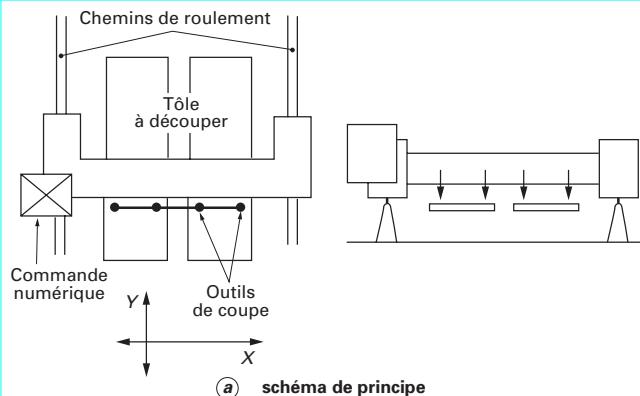


(a) schéma de principe



(b) machine à commande numérique [doc. SAF]

Figure 18 – Machine XY de type porte à faux



(a) schéma de principe



(b) machine à commande numérique [doc. SAF]

Figure 19 – Machine XY de type portique

#### 6.2.3.2 Machines composites mixtes

La nature de certains travaux de coupage sur métaux peut amener le montage de deux outils différents sur un bâti unique et, notamment, une unité de poinçonnage en association avec une torche de coupure plasma ou une tête laser. Cela correspond au découpage des tôles d'épaisseur modeste (entre 1 et 6 mm) qui nécessitent souvent dans une même pièce :

- des découpes de forme quelconque ; elles sont exécutées par voie thermique ;
- des découpes de cercles de petit diamètre ou de formes géométriques de faible surface ; elles sont réalisées par poinçonnage qui, pour une forme élémentaire telle qu'un cercle, est bien plus rapide et économique.

Dans ce cas, le bâti de la machine doit être très robuste pour résister aux efforts de poinçonnage et c'est une forme en C (encore appelée « à col de cygne ») qui est en général adoptée (figure 21). Les outils – poinçons, torche plasma ou tête laser – sont alors montés à poste fixe sur le bâti et c'est la tôle à découper qui se déplace en XY grâce à une table support à chariots croisés. La commande et le guidage sont généralement assurés par une commande numérique.

#### 6.2.3.3 Robots de coupage

Le développement considérable des robots dans l'industrie donne lieu depuis déjà plusieurs années à des applications en coupure thermique.



Figure 20 – Très grande machine portique à commande numérique [Doc. SAF]

Lorsque les coupes à exécuter ne sont pas planes et nécessitent des déplacements (et orientations) de l'outil de coupe dans l'espace (travail en XYZ), le robot constitue l'équipement idéal, car il est aussi à l'aise pour exécuter des pièces diverses en faible quantité que

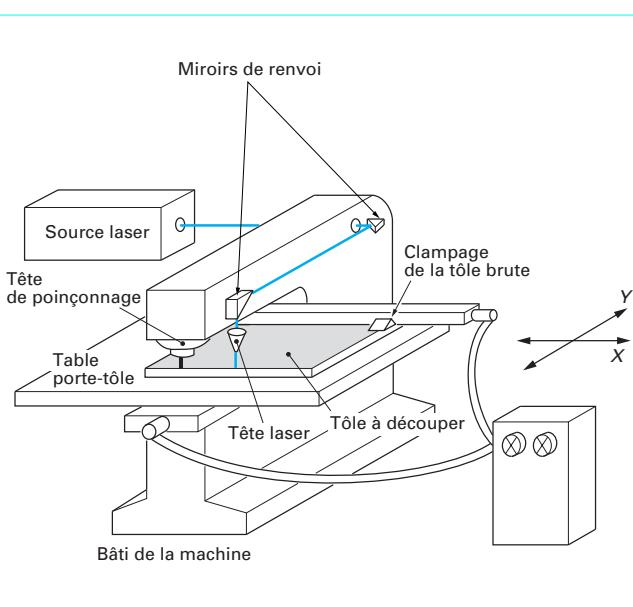


Figure 21 – Machine mixte poinçonnage-laser : schéma de principe

pour travailler en grande série, en fait comme une machine «spécifique» d'une pièce donnée.

Nous mentionnerons un exemple en ce domaine : le découpage à longueur des profils et fers à boudin constituant les renforts de coque en construction navale.

Les coupes d'extrémité sont d'équerre ou biaises, chanfreinées ou non, avec évolution du chanfrein en cours de coupe. Les profils bruts se présentent dans une position quelconque sous la machine et peuvent être coupés quelles que soient leurs déformations horizontale ou verticale.

La figure 22 montre une installation en fonctionnement, en service aux Chantiers de l'Atlantique-Alsthom à Saint-Nazaire.

Les robots de coupe sont bien évidemment, par leur principe, des machines de reproduction, mais leur apparition dans l'industrie est récente alors que l'usage antérieur a consacré le terme de « machine de reproduction » pour désigner des machines de coupe thermique opérant dans un plan, c'est-à-dire simplement en XY.

Les **robots polyarticulés ou polaires** ont été utilisés en soudage bien avant de l'être en coupe. Pour cette dernière application, il convient d'adopter des équipements particulièrement rigides, les éventuelles vibrations entraînant des défauts (stries sur le chant coupé), alors qu'en soudage le bain de fusion, liquide, assure un amortissement complet du phénomène.

Par ailleurs, si la robotisation de l'**oxycoupage**, du fait des vitesses de coupe relativement lentes, ne pose pas de problème majeur, la robotisation du coupe **plasma** présente de plus grandes difficultés. En effet, selon notamment les épaisseurs des matériaux coupés et les procédés plasma mis en œuvre, les vitesses de coupe peuvent s'échelonner de 1 m/min à 15 ou 20 m/min ; il convient donc d'utiliser des robots très performants alliant de faibles inerties cinétiques, bien que de structure rigide, à des qualités de suivi de trajectoire impliquant un logiciel et des algorithmes de gestion des axes permettant des interpolations linéaires et circulaires à vitesse élevée.

En ce qui concerne la robotisation du coupe **laser CO<sub>2</sub>**, elle se limite le plus généralement à l'utilisation de robots de type polaire c'est à dire une sorte de machine XY surélevée dotée d'axes supplémentaires tels que Z, θ<sub>X</sub>, θ<sub>Y</sub> et/ou θ<sub>Z</sub> les éléments à découper étant placés entre les 4 pieds ou devant les 2 pieds du « robot », selon les types ; la table ou le viseur supportant la pièce peut être un axe supplémentaire géré par le logiciel. Cette catégorie de « robot » n'a, en réalité, que peu de chose à voir avec ceux utilisés en soudage ou en coupe, plasma ou oxy-coupage, et s'apparente plutôt à de très grosses machines multiaxes. Cela s'explique par le fait qu'il y a de très grandes difficultés, voire une impossibilité, à concevoir un robot du type polaire comportant autant de miroirs de renvoi qu'il y a d'axes robot, pour le cheminement optique, garantissant des alignements rigoureux et l'absence de vibrations quels que soient les déplacements d'axes aux vitesses propres à la découpe laser.

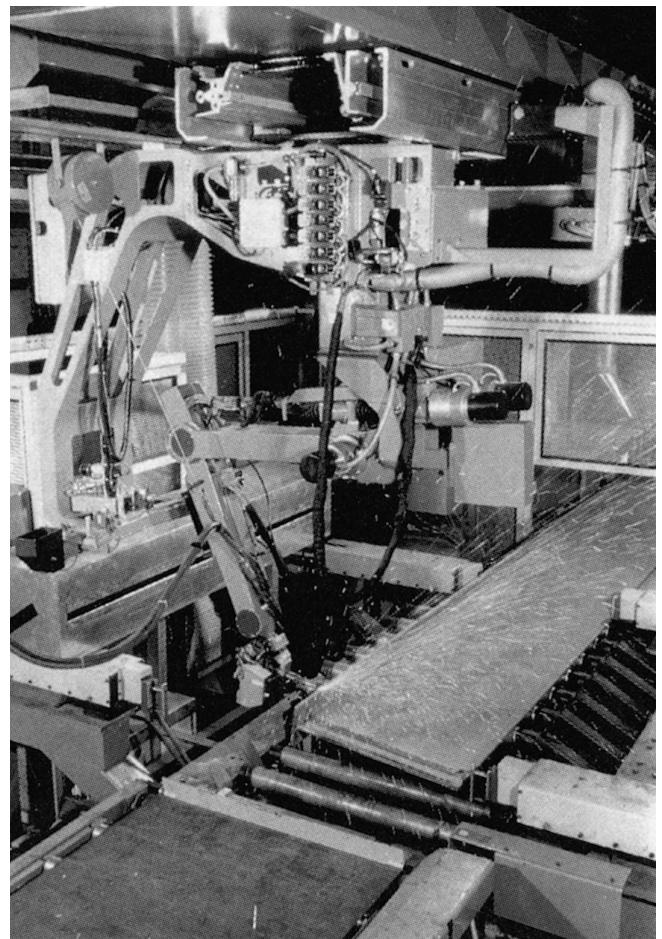


Figure 22 – Robot polyarticulé suspendu effectuant une coupe de profilés par oxycoupage [Doc. SGN]

#### 6.2.3.4 Machines spécifiques

Certains travaux de coupe nécessitent des conditions opératoires particulières liées aux conditions d'exécution, à la forme des pièces, etc.

### Machines portatives

Ce sont de toutes petites machines pouvant suivre un gabarit, mais de dimensions suffisamment modestes pour être transportées par un, voire deux, opérateurs et *directement posées sur la tôle à découper*.

Les dimensions maximales possibles se situent autour de 40 cm x 60 cm.

### Machines pour coupage de tubes

Elles sont destinées à préparer les extrémités – en vue du soudage ultérieur – des tubes de canalisations diverses mais de diamètre important (20 à 30 cm sont très courants). La coupe doit alors être exécutée dans l'espace, c'est-à-dire comporter des déplacements XYZ complétés par l'orientation variable du chalumeau (problème de chanfreinage). Bien entendu, le tube à préparer est, parallèlement, entraîné en rotation.

### Machines pour découpage de forme, de pièce unique en grande série

Parmi les quatre procédés décrits, deux actuellement sont susceptibles de découper les matériaux non métalliques ; ce sont le coupage laser et le coupage au jet d'eau.

Les matériaux à couper possibles sont innombrables et vont du *Plexiglas* au marbre en passant par le contre-plaqué, les tissus, etc., sans oublier quantité de produits alimentaires : fromage en parts, poisson en tranches ou en filets, etc. Parallèlement, la « forme » des « pièces » à découper est aussi très variée. Évoquons, à titre d'exemple, une installation en service chez Usinor à Dunkerque (figure 23) montrant une machine destinée à prélever par oxydécoupage des échantillons rectangulaires de matière dans certaines brames. Cela permet, après analyse, un contrôle de la production et autorise une garantie de qualité pour les produits élaborés à partir de ces brames (tôles le plus souvent).

### 6.2.4 Bancs de chaudronnerie

La pièce de base en chaudronnerie est la tôle rectangulaire, mais découpée de manière très précise surtout en ce qui concerne l'équerrage des rives et des extrémités. En outre, les épaisseurs en cause (20, 30 ou 40 mm, parfois plus) nécessitent l'exécution de chanfreins pour préparer le soudage ultérieur.

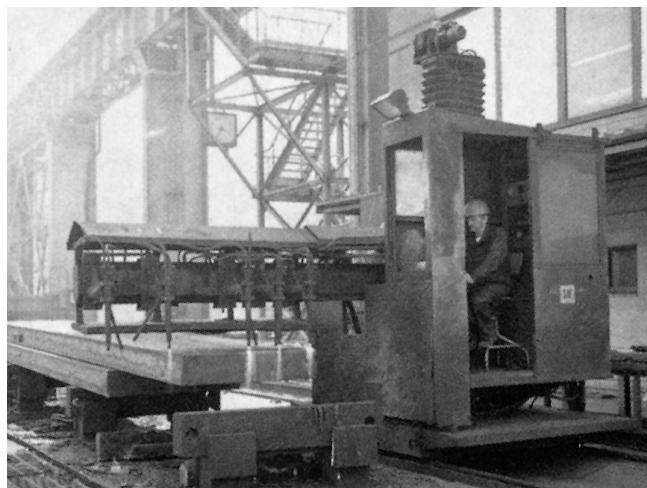


Figure 23 – Machine spécifique destinée à prélever par oxydécoupage des échantillons de matières [Doc. SAF]

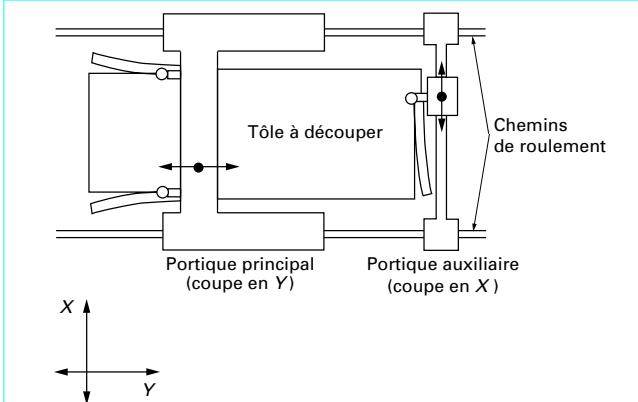


Figure 24 – Banc de chaudronnerie : schéma de principe

La précision d'équerrage est essentiellement destinée à éviter les difficultés pendant le soudage qui suivra, car les processus automatiques se généralisent de plus en plus et sont très peu tolérants pour les erreurs de forme et les écarts d'accostage qu'elles entraînent.

Le banc de chaudronnerie est donc une machine du type portique, sans tête de lecture optique ou commande numérique, puisque l'on reproduit en fait la rectitude et l'équerrage des chemins de roulement (figure 24). Ce portique reçoit en général au moins deux boucliers porte-outils pour exécuter simultanément les deux coupes longitudinales et équilibrer ainsi les contraintes internes, donc annihiler les déformations.

L'exécution des chanfreins courants (en V, en X ou en K, cf. articles *Soudage à l'arc* et *Soudage automatique* de ce traité) amène la mise en œuvre simultanée de deux, voire trois, chalumeaux sur un même bouclier pour une coupe unique (figure 25).

## 7. Domaines d'emploi

Historiquement, l'oxydécoupage fut longtemps le seul procédé envisageable. Coupages au plasma, puis au laser, puis au jet d'eau ne sont apparus qu'ensuite, procurant des avantages fort intéressants en élargissant l'éventail des métaux (et des matériaux) et des épaisseurs pouvant être découpés. Enfin, oxydécoupage et coupage plasma autorisent des précisions de l'ordre du millimètre, alors que le coupage laser permet d'atteindre le dixième de millimètre sans trop de problèmes.

On peut ainsi se rendre compte que la comparaison entre les différents procédés de coupe donne des résultats fort variables selon le critère considéré comme « majeur » pour effectuer cette comparaison (cf. tableau 6, § 11). L'ensemble de ces critères est le suivant :

- vitesse de travail et montant des investissements acceptés ;
- précision et déformations ;
- épaisseurs possibles et nature du matériau.

### 7.1 Vitesse de travail et investissements

Exploités sur des aciers de construction, le coupage plasma et le coupage laser peuvent certes opérer plus vite que l'oxydécoupage, au moins pour des épaisseurs jusqu'à 40 à 50 mm pour le premier et 20 à 25 mm pour le second (dans l'état actuel de la technique). Préci-

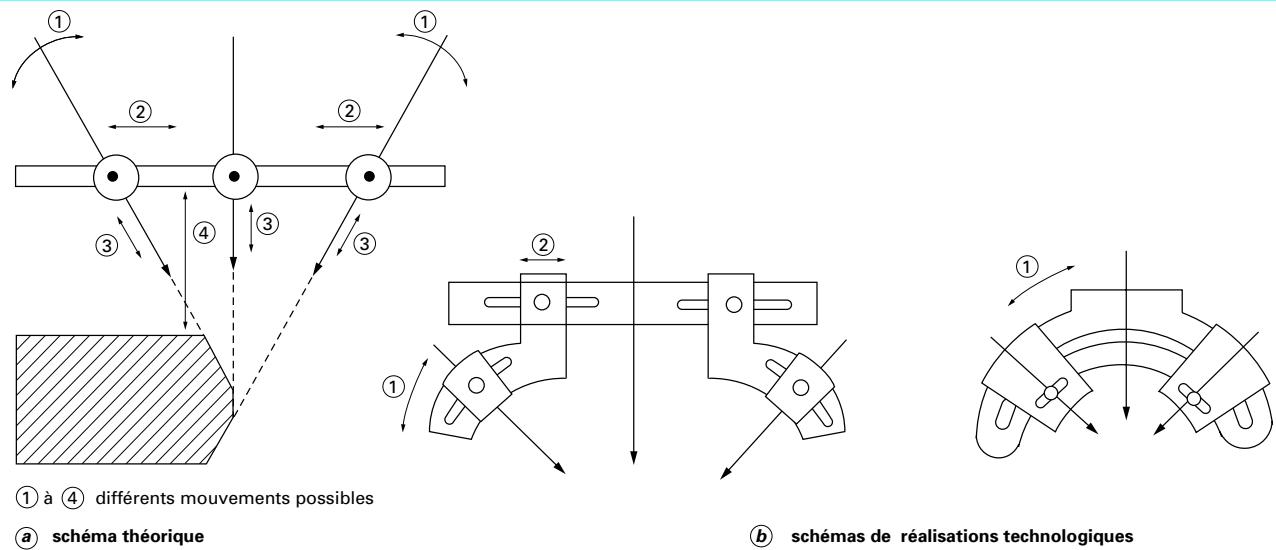


Figure 25 – Bloc de chanfreinage universel avec « trois chalumeaux »

sons bien peuvent, car il faut très rapidement parler des valeurs que l'on est prêt à accepter pour le ratio vitesse de travail/investissements nécessaires, au moins quand le choix ne se trouve pas dépendant de telle ou telle limite technique du procédé.

■ Lorsque les premières installations de **coupage plasma** ont été mises sur le marché, leurs constructeurs annonçaient des vitesses quintuplées, voire décuplées, par rapport à celles pratiquées en oxy-coupage.

Ces performances sont bien réelles mais elles nécessitent des investissements importants concernant :

- le ou les générateurs d'alimentation électrique ;
- les câbles souples de liaison générateur-machine ;
- parfois, l'alimentation électrique générale de l'atelier ;
- la torche et ses périphériques de raccordement et de commande.

Un certain équilibre s'est d'ailleurs progressivement établi, l'expérience aidant, entre les notions de performances et celles d'investissements correspondants.

■ Le **coupage laser**, quant à lui, ne peut guère se comparer à l'oxy-coupage. Il permet, certes, des vitesses opératoires très élevées, mais dans un domaine d'épaisseurs qui n'est que partiellement accessible à l'oxy-coupage, c'est-à-dire pour les tôles fines (entre 0,6 et 20 à 25 mm d'épaisseur d'acier de construction).

Pour des épaisseurs plus fortes – bien entendu, sur aciers de construction – les procédés plasma et laser sont inopérants, du moins avec la technique et les puissances actuelles. Comme les investissements « laser » sont extrêmement élevés, leur rentabilisation ne s'obtient pas uniquement grâce aux vitesses obtenues ; les notions de précision et d'absence de déformations doivent être également retenues (§ 7.2).

■ La figure 26 donnant les valeurs épaisseur-vitesse pour chaque procédé permet de les situer les uns par rapport aux autres ; les courbes ont été tracées en coordonnées logarithmiques de manière à les rendre plus compréhensibles.

La limite inférieure pour le **coupage laser**, 0,5 mm, ne concerne pas les possibilités de l'outil laser : elle est liée à la difficulté qu'il y a

à déplacer, à 10 à 20 m/min, une tôle mince qui se met alors à vibrer ou à se déformer sous l'effet des efforts d'inertie dans les brusques changements de direction, lorsque la tôle est mobile par rapport à une tête laser fixe. Le travail avec tôle fixe et laser embarqué, c'est-à-dire mobile, améliore cette situation, mais la source laser reste encombrante, assez lourde et, surtout, crain suffisamment les vibrations ; on dispose de préférence celle-ci à côté de la machine et on achemine le faisceau jusqu'à la tête de focalisation par un chemin optique télescopique via des miroirs de renvoi disposés en extrémité de la poutre mobile, du coulissoir porte-outil et de la glissière de palpage formant axe Z.

■ La zone correspondant au **coupage au jet d'eau** a été mentionnée sur ce graphique mais à titre simplement informatif, son domaine d'emploi préférentiel n'étant pas le coupage sur aciers de construction classiques.

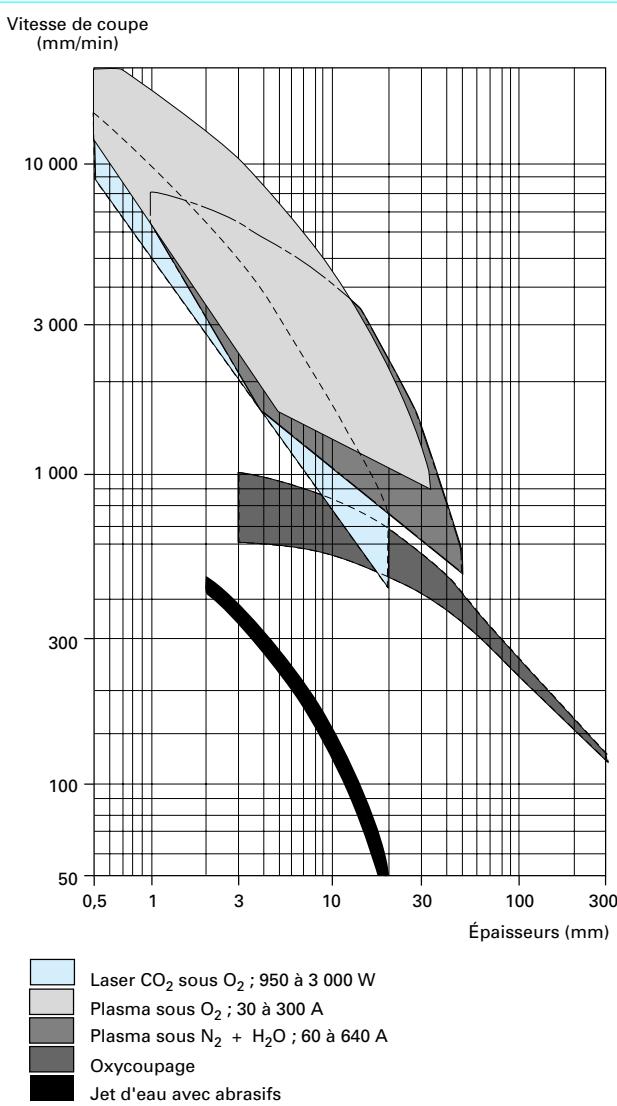
Nous devons insister sur la notion d'**« ordre de grandeur »**, car de très nombreux facteurs peuvent intervenir, parmi lesquels nous noterons :

- la technologie de chaque constructeur de machines ;
- la qualité de coupe souhaitée ;
- le point d'équilibre choisi pour le ratio vitesse de travail/investissements nécessaires ;
- la réalisation courante ou exceptionnelle ;
- la performance de laboratoire ou celle obtenue industriellement, etc.

## 7.2 Précision et déformations

■ Comme indiqué précédemment (§ 5.4), la **précision** en oxy-coupage et coupage plasma est de l'ordre du millimètre, alors qu'elle est de l'ordre du dixième de millimètre en coupage laser (ainsi, d'ailleurs, qu'en coupage par jet d'eau).

■ Mais, en complément, il faut évoquer la notion de **déformations** ; ces dernières sont notables en oxy-coupage, moins importantes en coupage plasma, voire très faibles sur des épais-



**Figure 26 – Coupage des aciers de construction : vitesses de travail en fonction des épaisseurs pour chaque procédé. Performances à caractère industriel**

seurs inférieures à 2 mm. En coupage laser, les déformations sont réellement négligeables (§ 5.3).

Il est donc très courant, en **oxycoupage**, de prendre des précautions opératoires pour lutter contre les déformations d'origine thermique (§ 5.2).

Avec le **coupage plasma** qui, opérant plus vite (surtout pour des épaisseurs inférieures à 20 mm), échauffe moins les pièces, ces précautions peuvent être moins sévères et même être supprimées si l'on travaille sur plan d'eau, avec un nez de torche immergé.

Le **coupage laser** ne pose que très rarement des problèmes de déformations, mais cet avantage considérable est contrebalancé par les investissements à consentir (§ 7.1)

### 7.3 Épaisseurs possibles et nature du matériau

Bien évidemment, tous les procédés de coupage ne peuvent pas être utilisés sur toutes les épaisseurs.

L'examen des courbes de la figure 26, montre que :

— en **oxycoupage**, on ne peut descendre au-dessous d'une épaisseur de 3 mm, encore que l'oxycoupage de cette épaisseur, considérée comme « limite », soit assez délicate industriellement ;

— en **coupage plasma**, il est possible d'atteindre des épaisseurs de 150 mm, et même de 200 mm au maximum, mais l'opération cesse d'être rentable sur aciers faiblement alliés au-delà de 50 mm. Pour ces épaisseurs, l'avantage de la vitesse disparaît et le coût des puissances électriques à mettre en jeu est trop élevé.

Le tableau 3 précise les valeurs limites d'épaisseur en fonction des matériaux possibles pour chaque procédé.

Il est à remarquer que, contrairement aux deux autres procédés, le coupage laser et le coupage au jet d'eau permettent des applications sur des matériaux non métalliques extrêmement variés tels que plastiques, tissus, cuirs, bois, etc., voire même, pour le jet d'eau, céramiques, marbres, pierres, matériaux composites, métaux en nid d'abeille, produits alimentaires (dans certains cas, l'eau est remplacée par de l'huile alimentaire).

### 7.4 Position relative globale des différents procédés

Grosso modo, nous pouvons donc définir les domaines d'emploi suivants sur un plan **industriel et pratique**.

**Tableau 3 – Valeurs limites d'épaisseur, pour les principaux matériaux métalliques, pour chaque procédé**

Oxycoupage	Coupage plasma	Coupage laser CO <sub>2</sub>	Coupage au jet d'eau
3 à 600 mm 600 < <i>e</i> < 2 000 mm possible mais très rare Aciers non alliés ou faiblement alliés exclusivement	0,4 à 50 mm Aciers non alliés ou faiblement alliés	0,4 à 25 mm Aciers non alliés ou faiblement alliés	2 à 100 mm Aciers non alliés ou faiblement alliés
	0,4 à 150 mm Aciers inoxydables	0,4 à 15 mm Aciers inoxydables	2 à 100 mm Aciers inoxydables
	0,4 à 200 mm Alliages d'aluminium	0,4 à 5 mm Alliages d'aluminium	2 à 100 mm Alliages d'aluminium

### 7.4.1 Aciers non alliés ou faiblement alliés

**Au-dessous de 3 mm :** l'oxydécoupage est exclu ; seuls, les procédés plasma et laser sont possibles, mais le poinçonnage, le grignotage même le cisailage peuvent les concurrencer si la nature du métal le permet. Le coupage au jet d'eau peut également intervenir sur ces épaisseurs, mais rappelons que les coupages laser et jet d'eau sont surtout rentables sur métaux très spéciaux et/ou si les précisions de coupe permises par ces deux procédés sont nécessaires.

**Entre 0,4 et 3 mm :** les vitesses sont très approximativement du même ordre pour les coupages plasma et laser mais les investissements sont moindres pour le plasma. Qualité de coupe et précision sont supérieures avec le laser et le jet d'eau. Poinçonnage et grignotage peuvent encore intervenir avec les mêmes réserves.

**Entre 3 et 6 mm :** laser, plasma et oxydécoupage sont possibles, au moins sur aciers non alliés ou faiblement alliés ; vitesses, qualité de coupe et précision sont évidemment en valeur inverse des investissements, mais les vitesses chutent notablement avec le laser, ce qui rend le plasma plus intéressant pour des épaisseurs supérieures à 6 mm environ.

**Entre 6 et 20 mm :** laser, plasma et oxydécoupage sont concurrents ; le plasma va plus vite, mais les chants coupés ne sont pas toujours parfaitement d'équerre. Les investissements sont un peu plus élevés en plasma (source de courant, câbles, etc.) qu'en oxydécoupage mais bien moindre qu'en laser.

**Au-delà de 30 à 40 mm :** l'oxydécoupage devient de plus en plus intéressant, car l'avantage en vitesse du coupage plasma disparaît.

### 7.4.2 Métaux autres que les aciers non alliés

Le laser, pour les faibles épaisseurs (inférieures à 15 mm), le plasma et le jet d'eau, pour une large gamme d'épaisseurs, sont les seuls procédés à retenir.

### 7.4.3 Autres matériaux

■ Pour le cuir, carton, tissu, **Plexiglas**, etc., il y a concurrence entre le laser et le jet d'eau. Les investissements sont très approximativement du même ordre de grandeur, mais le laser provoque une très légère carbonisation du chant coupé ; si elle est inacceptable, le jet d'eau est préférable.

Le coupage plasma avec arc non transféré (ou soufflé) pourrait être envisagé mais n'est, en général, pas retenu, car les risques de carbonisation des pièces seraient un inconvénient majeur dans presque tous les cas.

■ Les matériaux pierreux sont du domaine du coupage par jet d'eau, ainsi que les matériaux composites (résines/fibres), surtout en structures cellulaires.

■ Les métaux ou alliages très durs, tels que les carbures ou même les céramiques, entrent également dans le domaine du coupage au jet d'eau (avec addition d'abrasif) pour éviter tout choc thermique. Les vitesses sont alors faibles mais, comme le jet d'eau reste le seul procédé envisageable – du moins actuellement –, cette sujétion devient secondaire.

■ Nous ne pouvons absolument pas citer tous les autres cas d'applications possibles : ils sont innombrables et il en apparaît de nouveaux chaque jour. Mentionnons simplement, à titre d'exemples, que :

— l'une des toutes premières applications du coupage laser a concerné le coupage du **Plexiglas** pour fabriquer des pare-brise de canots à moteur ou des parements de balcons modernes; ce procédé, contrairement au sciage employé antérieurement, permet d'obtenir des chants directement polis ;

— les filets de saumon, généralement présentés à la vente sous emballage plastique, sont tranchés au jet d'eau à partir du poisson en évitant bien sûr l'arête centrale ; une seconde opération de coupe au jet d'eau, mais guidée cette fois par la radio de cette arête centrale, permet de « récupérer » la chair restant entre les arêtes et aboutit, au stade final, au produit appelé mousse de saumon ;

— les parts individuelles de fromage sont découpées au jet d'eau dans la forme du fromage d'origine ;

— les couches-culottes sont découpées par des batteries de machines à jet d'eau dans les bandes de cellulose ;

— la confection industrialisée de vêtements permettant un « sur mesure » de « confection » suppose un tranchage de tissu où laser ou jet d'eau remplacent de plus en plus les anciens outils mécaniques avec, bien entendu, l'intervention d'une commande numérique ;

— l'automobile, qui fait de plus en plus appel aux matières plastiques pour certaines carrosseries et aménagements intérieurs, met en œuvre du coupage au jet d'eau robotisé.

## 8. Investissements et éléments de décision

### 8.1 Ordres de grandeur des sommes en jeu

Comme dans toutes les industries, il existe une relation inverse entre le niveau des investissements consentis et le temps de travail ou, plus généralement, les « coûts directs » qu'ils permettent d'obtenir. Il convient, en outre, d'y ajouter de plus en plus souvent des notions difficilement chiffrables mais parfaitement réelles notamment la sécurité et la souplesse de mise en œuvre, le confort opératoire, etc.

Les chiffres ci-après, en francs 1998, permettent de situer les ordres de grandeur des sommes en jeu pour le coupage machine (au moins dans l'état actuel de la technique).

#### ■ Valeur des « outils » :

— chalumeau machine : 3 à 5 kF ;

— torche plasma + source de courant + câbles d'alimentation de puissance : 70 à 250 kF ;

— tête laser + générateur laser : 600 à 1 200 kF ;

— tête de coupage au jet d'eau + groupe motopompe : 1 000 à 1 500 kF.

#### ■ Valeur des machines :

— machines d'oxydécoupage et de coupage plasma avec commande numérique : 200 à 1 500 kF ;

— machine de coupage laser : 1 000 à 5 000 kF ;

— machine mixte équipée pour le poinçonnage/laser : 4 000 à 8 000 kF.

① Pour une même catégorie de machine, la « fourchette » de prix citée peut paraître très large, mais il faut bien se souvenir que les progrès de la micro-électronique permettent actuellement de monter des commandes numériques sur de toutes petites machines, qui se trouvent alors placées dans la même catégorie que les plus grosses unités de coupage.

② Nous ne saurions trop insister sur l'aspect « précaire » des prix avancés, car ces derniers peuvent évoluer à la hausse (avec l'inflation) comme à la baisse (avec les évolutions techniques).

## 8.2 Ébauche de choix

Examiner comparativement les performances (au sens large du terme) des divers procédés thermiques et les mettre en concurrence avec des procédés mécaniques (cisaillage, poinçonnage, grignotage, etc.) est certes nécessaire au départ, mais cela reste insuffisant.

Même en se limitant au coupage thermique, chalumeau, plasma et laser ne sont pas concurrents – et de loin – dans toute la gamme des travaux possibles (tableau 3).

Bien souvent, la nature technique des découpages envisagés fixe presque immédiatement le type d'outil ou de procédé à employer. En complément, il est utile de faire intervenir des notions moins fondamentales telles que la souplesse de mise en œuvre qui se caractérise par les propriétés suivantes.

### ■ Capacité d'élargir exceptionnellement la gamme de travail

Prenons, par exemple, un atelier équipé d'un laser qui peut couper couramment des aciers de construction de 0,5 à 4 mm d'épaisseur et fait l'objet d'une demande ponctuelle de pièces en acier inoxydable de 6 mm. Le procédé idéal serait peut-être le plasma, mais l'atelier en question essaiera, à vitesse plus faible, de résoudre son problème avec l'équipement disponible, c'est-à-dire le laser avec sa puissance disponible.

### ■ Découpage de faibles quantités

Pouvoir couper des pièces en petite série, voire à l'unité, sans trop pénaliser le prix de revient, c'est très important. S'il s'agit de pièces prototypes, cela devient même capital surtout s'il faut procéder à plusieurs retouches de forme, suivi d'essais de coupage, avant de parvenir à la pièce définitive. Sur tous ces points, le coupage thermique est bien plus intéressant que le poinçonnage par exemple, où la réalisation puis la modification éventuelle d'un ensemble poinçon/matrice correspond à des délais et des coûts généralement très élevés.

### ■ Temps de réponse très court

Les conditions technico-économiques actuelles font qu'une fourniture dans des délais très courts revêt parfois une importance capitale. Une vitesse opératoire élevée contribue à répondre à ce besoin mais la souplesse/rapidité de mise en œuvre, de programmation, constitue un facteur encore plus important.

Enfin, on pourra tenir compte d'autres éléments tels que la pollution, la sécurité de fonctionnement, etc.

## 8.3 Problème de la sous-traitance

Toute entreprise ayant des fabrications posant des problèmes de coupage peut soit s'équiper elle-même, soit recourir à la sous-traitance surtout si ces fabrications présentent un certain caractère de continuité.

À l'inverse, pour un atelier d'entretien (ou la section « entretien » d'une entreprise importante), ce choix ne se pose pas, car il y généralement intérêt à l'équiper en moyens de coupage pour privilégier le temps de réponse, même éventuellement au détriment des coûts (investissements à coefficient d'utilisation faible, en général).

En dehors de cet exemple concernant l'entretien, conduire une étude de rentabilité en vue de la mise en œuvre éventuelle d'équipement de coupage nécessite la prise en compte de tous les points suivants :

- valeur de la machine et du génie civil d'installation ;
- valeur du stock de produits ou de tôles brutes à conserver pour faire face à tous les problèmes prévisibles ; cela concerne les produits eux-mêmes et le bâtiment de stockage ;

— manutention, stockage, enlèvement des pièces terminées, d'une part, et des chutes, scories, déchets et gaz polluants, d'autre part ;

— enfin, et ceci est capital, acquisition du savoir-faire correspondant, tant au bureau des méthodes pour préparer gabarits ou programmes de coupe que dans l'atelier au niveau des opérateurs-conducteurs de machines.

Qu'il s'agisse d'embauche ou de complément de formation du personnel déjà existant dans l'entreprise, négliger ce dernier point ne peut que conduire à des coûts d'exploitation inutilement élevés, souvent associés à des résultats médiocres.

L'expérience montre que les notions de stock immobilisé et de savoir-faire ont souvent tendance à être sous-estimées. Elles constituent en fait les deux points forts toujours mis en avant par les entreprises spécialisées dans le coupage à façon en sous-traitance.

## 9. Éléments de prix de revient de la pièce coupée

Les divers éléments évoqués paragraphe 8 doivent, pour permettre un choix, être mis en rapport avec les coûts des pièces à réaliser. Ce paragraphe donne des éléments de calcul à ce sujet.

Le prix de revient d'une pièce coupée dépend essentiellement :

- du coût du matériau, en général du métal ;
- du coût du gaz et, plus généralement, des produits consommables ;
- du coût de l'énergie électrique pour alimenter la source laser, le générateur plasma et la machine de découpe ;
- du coût de la main-d'œuvre (amortissements inclus).

### 9.1 Coût du métal

Le **poids des pièces**, par pesée a posteriori ou par calcul a priori, est facile à obtenir, mais cela ne suffit pas, et de loin, car il faut intégrer le problème des **chutes**.

La proportion de chutes descend très rarement au-dessous de 15 % du poids de métal brut, pour les **grands ateliers** de coupage, où les quantités traitées rentabilisent l'existence d'un bureau de préparation. Ce dernier doit, entre autres choses, disposer les pièces au mieux dans les tôles brutes au niveau du gabarit de coupage pour optimiser l'emploi de matière.

Pour les **ateliers de dimensions plus modestes**, l'opérateur est censé assurer lui-même cette répartition, mais ses moyens et le temps disponible lui permettent rarement une optimisation satisfaisante, et des pourcentages de chutes de 25 à 30 % n'ont rien de surprenant.

Comme beaucoup de facteurs peuvent influer sur ce pourcentage, seules les statistiques d'atelier s'étalant sur quelques années peuvent donner la valeur correcte à prendre en compte pour un atelier déterminé. Ce n'est qu'une valeur moyenne de toute façon.

À cette gestion des chutes, il convient d'ajouter, au titre des pertes de métal, le **métal fondu et expulsé** lors de la formation de la saignée de coupe, pour les fortes épaisseurs découpées par oxycoupe.

page ou plasma ; ce facteur est loin d'être négligeable dans le coût global.

Majorer systématiquement les poids nets des pièces, de 20 % par exemple, reste insuffisant au niveau d'un calcul de prix de revient.

Il est prudent de faire intervenir la **notion de carré ou rectangle « enveloppe » de la pièce à couper**, tout en vérifiant que le chiffre obtenu est au moins égal au poids net majoré du pourcentage moyen des chutes (20 % dans notre exemple).

On peut également faire intervenir la **notion que toute tôle brute sortie du parc de stockage n'y rentre pas** et que le reliquat éventuel doit être dévalorisé, totalement ou au moins partiellement, donc affecté à la commande exécutée.

Effectivement, sur le terrain, il est très souvent inopportun de remettre sur parc une tôle entamée, voire une chute, que l'on veut conserver, et un stockage à part reste la meilleure solution pour homogénéiser les méthodes de manutention.

## 9.2 Coût des gaz ou fluides utilisés

### Oxycoupage

Le poste comprend l'oxygène de coupe, l'oxygène de chauffe et le combustible de chauffe. Mais le premier point est, de loin, le plus important.

Chaque constructeur fournit des barèmes de réglages et de consommations qui peuvent servir de bases solides pour un calcul, mais on peut opérer plus globalement en rapportant la consommation d'oxygène (en litres) au centimètre carré de surface coupée (surface de saignée). Cela permet d'obtenir des chiffres simples à retenir et pratiquement constants pour une même catégorie de travaux, donc très faciles à utiliser.

En oxycoupage machine, le tableau 4 donne la consommation d'**oxygène** selon les épaisseurs  $e$ .

**Tableau 4 – Consommation d'oxygène en fonction de l'épaisseur de la pièce en oxycoupage automatique**

Épaisseur $e$ (mm)	Consommation d'oxygène (L/cm <sup>2</sup> )
$e < 50$	0,5 à 1,0
$50 < e < 150$	1 à 1,5
$150 < e < 300$	1,5 à 2,5
$e > 300$	2,5

La consommation de **gaz combustible**, également liée à l'épaisseur, est – en volume – une fraction modeste de la consommation totale d'oxygène ; elle se situe généralement entre 1/8 et 1/20.

### Coupage plasma

Le poste comprend le ou les **gaz plasmagènes**. Comme en oxycoupage, les barèmes fournis par les constructeurs de torches constituent des bases solides de départ. Elles peuvent d'ailleurs être confirmées sur le chantier même, lorsque les installations de coupe plasma sont équipées de débitmètres.

Il faut, selon l'importance du coupage dans l'entreprise, y ajouter la consommation d'**énergie électrique**, surtout si l'on met en œuvre une installation d'assez forte puissance.

### Coupage laser

Le poste comprend le **gaz d'assistance** pour la tête de coupage, mais également les gaz mis en œuvre pour la **source laser** elle-même et qui demandent à être périodiquement renouvelés ou complétés. Chaque constructeur précise dans ses barèmes ou instructions d'emploi les quantités à prévoir.

Comme pour le coupage plasma, la consommation d'**énergie électrique** doit être prise en compte car le « rendement » est très médiocre. Un laser de 1 000 W de puissance nominale peut très bien demander 50 ou 60 kW sur le réseau d'alimentation.

### Coupage au jet d'eau

L'élément le plus important concerne l'**énergie électrique** nécessaire à l'unité de pompage car les consommations d'eau sont faibles (débits de 5 à 10 L/min).

Si l'on met en œuvre une injection d'**abrasifs** dans l'eau, leur coût doit alors intervenir en tablant sur des consommations de l'ordre de 150 à 400 g/min.

## 9.3 Coût de main-d'œuvre incluant les amortissements

Ce poste va comprendre les salaires (bien entendu, avec charges sociales), auxquels sont associés les frais d'amortissement des équipements utilisés (machines, bâtiments, etc.).

Les barèmes, encore une fois, et surtout la vitesse de coupe choisie vont constituer la base de départ, mais il faut bien se garder de la prendre telle quelle, car le **coefficent d'utilisation de la machine** (ou **taux de marche**) doit intervenir. Ce coefficient est destiné à mettre en évidence les périodes où l'opérateur ne peut pas effectivement couper (au cours d'une journée, par exemple). Il s'exprime en pour-cent et a pour formule :

$$\frac{\text{temps de coupage effectif}}{\text{temps de présence de l'opérateur sur le chantier}}$$

Ses valeurs les plus classiques pour un atelier de production oscillent entre 15 à 20 % et 80, voire 90 %, pour les ateliers très modernes et à organisation très poussée.

Faire intervenir ce coefficient d'utilisation à sa valeur correcte est absolument fondamental, car son influence sur les prix de revient calculés est considérable.

Dans le domaine de la production, seule l'expérience sur une ou deux années permettra d'adopter un ratio à peu près sûr, encore qu'il reste très souhaitable de le vérifier périodiquement car, d'une part, le surestimer et, d'autre part, enregistrer des dérives au niveau opératoire, sont des phénomènes classiques qui justifient ce besoin de vigilance.

Faute de statistiques précises, on peut adopter les ordres de grandeur donnés dans le tableau 5.

<b>Tableau 5 – Coefficients d'utilisation d'une machine de coupe</b>		
Préparation du travail	Travail avec un chantier de coupe unique (%)	Travail avec un double chantier de coupe (%)
Laissée plus ou moins à l'opérateur	15 à 30	40 à 50
Par un bureau des méthodes et logiciels appropriés	50 à 60	60 à 90 (selon la taille des pièces)

Ces coefficients d'utilisation sont à majorer ou à minorer sensiblement selon le niveau professionnel de la main-d'œuvre opératoire utilisée et surtout sa motivation pour opérer sans pertes de temps.

## 9.4 Qualité des coupes

En **coupage thermique**, la variation des paramètres opératoires permet de modifier notamment les aspects de coupe obtenus.

En oxycoupage, des écarts sur la vitesse de travail, pouvant atteindre 20 % par rapport à la vitesse optimale, aboutissent soit à des chants coupés d'aspect rugueux ou strié (mais peut-être industriellement fort suffisants), soit à un aspect très lisse et comportant des défauts de planéité et de fusion d'arêtes inexistantes.

Lorsqu'il s'agit d'oxycoupage ou de coupage plasma de tôles destinées à être ultérieurement soudées, des stries sur les chants coupés sont sans importance et la vitesse « idéale » peut être majorée avec répercussion sur les coûts.

En **coupage au jet d'eau**, on peut envisager des situations du même type : le découpage de pièces de tissu destinées à l'industrie de l'habillement demande plus de précision que le découpage de bandes de cellulose destinées aux couches-culottes, par exemple. Les vitesses opératoires sont, là encore, adaptées aux objectifs poursuivis.

## 9.5 Conclusion

À titre de synthèse et en prenant en compte tous les facteurs susceptibles d'influer sur le prix de revient d'une coupe, on se rend compte qu'ils sont très interdépendants.

On peut, par exemple, choisir deux méthodes fort différentes pour disposer les pièces à couper à l'intérieur du format d'une tôle brute.

■ On peut privilégier l'économie de matière avec des chutes ou des intervalles entre pièces très faibles.

Pour éviter le risque de lignes de coupe sécantes, l'opérateur est, alors, contraint à un ou deux parcours à *blanc* pour vérifier leur absence.

Une autre solution consiste, si le volume des fabrications le permet, à disposer d'un bureau de préparation fournissant à l'opérateur des programmes pour commande numérique sur lesquels l'imbrication est déjà préparée.

Dans le premier cas, l'opérateur va perdre du temps (temps opératoire long), dans le second, le temps opératoire peut être court, mais le temps préparatoire long (généralement, cette préparation se fait en temps masqué, c'est-à-dire pendant que la machine continue à produire selon un programme précédent).

■ On peut privilégier l'économie de temps de préparation, soit par l'opérateur, soit par le bureau de préparation, mais il faut alors accepter de perdre de la matière avec un pourcentage de chutes nettement plus élevé. L'opérateur, en effet, pour être sûr de ne pas avoir de pièces ou coupes sécantes, est amené à prévoir des chutes « larges » qui lui éviteront un parcours à blanc de vérification préalable.

## 10. Pollution. Hygiène. Sécurité

Nous ne traiterons ci-après que les problèmes ou les risques liés à la mise en œuvre spécifique des quatre procédés de coupe, à l'exclusion des risques plus généraux tels que la mise en œuvre des gaz comprimés, des hautes tensions, etc. Ces procédés peuvent donner lieu à des pollutions atmosphérique, phonique ou optique. Lorsque de l'eau est utilisée, celle-ci est également polluée.

### 10.1 Pollution atmosphérique

**Risque :** intoxications pulmonaires.

■ L'**oxycoupage** produit beaucoup de gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ), qui n'est pas un gaz dangereux par lui-même mais par la diminution de la teneur de l'air en oxygène qu'il peut provoquer. Or, une bonne partie du jet de coupe n'entre pas en réaction avec le fer et contribue à réoxygénier l'atmosphère.

Quelques fumées métalliques se dégagent parfois accompagnées de traces d'oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ). Rien de bien dangereux à moins d'opérer dans un local réellement confiné.

■ Le **coupage plasma** produit des fumées métalliques, surtout sur aluminium, ainsi que des quantités non négligeables d'oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ) dont les teneurs maximales tolérables dans l'air se situent entre 30 et 45 mg/m<sup>3</sup>.

Les fumées métalliques peuvent être « fixées » par l'emploi d'une table de coupe à plan d'eau, les pièces (et le nez de la torche) étant immergées de quelques centimètres. Mais attention, les oxydes d'azote, insolubles dans l'eau, se dégagent et sont incolores.

Une ventilation appropriée est nécessaire, tant pour la découpe sans plan d'eau qu'en complément de la table à plan d'eau qui arrête toutes les fumées de coupe, une part considérable du bruit et une part considérable du rayonnement d'arc, mais laisse subsister les dégagements d'oxydes d'azote. Ces derniers sont à éliminer soit par aspiration au point d'émission (débit minimal de l'ordre de 1 000 m<sup>3</sup>/h), soit par renouvellement général de l'atmosphère (3 000 à 3 500 m<sup>3</sup>/h) par poste de travail. Le bon compromis entre une aspiration suffisante et une température (en hiver) acceptable pour les opérateurs reste délicat à déterminer.

■ Le **coupage laser** n'est pas polluant mais les fumées éventuellement produites sont liées au matériau travaillé. L'acier produit un peu de fumées mais le coupage de certains plastiques dégage du chlore, du fait de leur composition chimique, d'où une aspiration de fumées nécessaire (cf. coupage plasma).

■ Le **coupage au jet d'eau** dégage sous la pièce un brouillard d'eau important qu'il convient de capter mais est surtout préoccupant en raison des particules solides qu'il véhicule, c'est-à-dire les débris de pièce ou abrasif. On dispose souvent des billes en acier inoxydable sous les pièces à couper, ce qui absorbe l'énergie cinétique du jet et limite les émissions de brouillard.

## 10.2 Pollution phonique

**Risque :** lésions du système auditif.

- **L'oxycoupage** n'est pas particulièrement bruyant.
- **Le coupage plasma**, par contre, qui met en jeu des vitesses de sortie très largement supersoniques, dépasse parfois le seuil tolérable sauf pour les toutes petites puissances (quelques kilowatts). Le travail sur table à eau résout complètement le problème, sinon le port de protecteurs d'oreilles est nécessaire pour les opérateurs.
- **Le coupage laser** est relativement silencieux.
- **Le coupage au jet d'eau**, malgré un bruit de sifflement, ne pose pas le même problème que le coupage plasma.

plété par l'installation d'écrans pour protéger le voisinage, sont nécessaires.

L'expérience d'atelier montre que l'on oublie souvent l'existence des pontonniers dans leurs cabines de commande. Étant donné que ceux-ci ne sont pas protégés par les écrans latéraux et qu'ils dominent tous les chantiers de travail, le port de lunettes incolores filtrantes et à coquilles latérales est très souhaitable pour eux.

- **Le coupage laser** pourrait être dangereux par la nature du rayonnement laser, mais ce dernier est systématiquement enfermé par des capotages et la tête travaille pratiquement en contact avec la pièce. L'opérateur se trouve donc, normalement, à l'abri ; toutefois, le port de lunettes spéciales pour protéger les yeux des opérateurs des rayonnements incidents accidentels est très souhaitable (attention au choix des verres qui doivent être choisis en fonction de la longueur d'onde du laser, soit 10,6 µm pour laser CO<sub>2</sub>).
- **Le coupage au jet d'eau**, pour sa part, n'est pratiquement pas polluant.

## 10.3 Pollution optique

**Risque :** éblouissement, conjonctivites, ou brûlures cutanées.

- **L'oxycoupage** n'est pas très dangereux dans ce domaine. Tout au plus risque-t-on un phénomène d'éblouissement provenant de la flamme de chauffe. Le port de simples lunettes teintées résout le problème.
- En **coupage plasma**, par contre, une protection s'impose sauf si, là encore, on opère avec une table à eau qui arrête tous les rayonnements ultraviolets nocifs. Sans cette disposition, les protections, du simple port de lunettes filtrantes, pour les toutes petites installations, jusqu'au masque classique, pour les soudeurs à l'arc, com-

## 10.4 Pollution de l'eau

Le coupage plasma sur table à eau et le coupage au jet d'eau produisent de l'eau polluée et des boues qu'il convient de traiter avant rejet.

## 11. Récapitulatif pour choix

Le tableau 6 regroupe toutes les caractéristiques importantes de coupe permettant de faire un choix rapide et grossier entre les quatre procédés de coupage par jet de fluide.

Tableau 6 – Comparaison de différentes caractéristiques entre les quatre procédés de coupage

Caractéristiques	Oxycoupage	Coupage plasma	Coupage laser	Coupage jet d'eau
Qualité de surface des coupes	Une bonne coupe industrielle a des chants finement striés (stries de 0,1 à 0,2 mm de profondeur) mais suppose une vitesse choisie vers les minimaums de la fourchette possible donnée par les constructeurs.  Des gains substantiels de vitesse (20 à 40 %) peuvent être obtenus si on tolère un aspect de chants plus grossier, ce qui est souvent possible.	Les chants coupés sont plutôt moins striés qu'en oxycoupage et le phénomène est bien moins lié à la vitesse opératoire.  Toutefois, les parois de la saignée ne sont pas tout à fait parallèles (écart de 2 à 10 °) et on note parfois un léger arrondi à l'angle supérieur.	Les chants coupés sont très finement striés et bien parallèles.  Aspect en général supérieur à ce qu'on obtient avec l'oxycoupage et le coupage plasma (tout au moins pour les épaisseurs < 15 mm).  Sur les plastiques, les chants sont parfaitement brillants et polis alors que les procédés mécaniques (sciage, tronçonnage, etc.) fournissent une surface rugueuse.	Identique au coupage laser sauf pour les plastiques pour lesquels, en l'absence de fusion superficielle, les chants coupés ne sont pas brillants et polis.

**Tableau 6 – Comparaison de différentes caractéristiques entre les quatre procédés de coupage (suite)**

Caractéristiques	Oxycoupage	Coupage plasma	Coupage laser	Coupage jet d'eau
Pollution/Hygiène/Sécurité (1, p. 24)	<p>PA : Émission de CO<sub>2</sub>, gaz pas particulièrement dangereux dans un hall d'atelier normalement ventilé</p> <p>PP : Faible bruit de chuintement.</p> <p>PO : Sans danger, simple risque d'éblouissement.</p>	<p>PA : Non négligeable, l'arc électrique synthétise des oxydes d'azote à partir de l'air.</p> <p>Aspiration nécessaire même si l'on opère avec table d'eau.</p> <p>PP : Siflement strident. Si l'on n'opère pas avec une table d'eau, une protection de l'opérateur est d'autant plus nécessaire que les puissances sont élevées (casque anti-bruit, tampons auriculaires).</p> <p>PO : Si l'on n'opère pas sur une table d'eau, un masque à filtre UV coloré est nécessaire pour l'opérateur et éventuellement des écrans de protection pour le personnel environnant. Le port de lunettes filtrantes (UV) peut être nécessaire pour les pontiers qui opèrent au-dessus du chantier.</p> <p>PE : Traiter l'eau et les boues avant rejet si on opère sur table à eau.</p>	<p>PA : Aucune en provenance du procédé mais la vaporisation des matériaux coupés peut libérer des volatils dangereux (plastiques/chlore, fluor...).</p> <p>PP : Quasiment nulle. Les émissions sonores importantes sont principalement dues aux groupes de refroidissement de la source laser.</p> <p>PO : En principe négligeable, mais un plasma éblouissant peut parfois se former entre la buse et la pièce. En coupage laser ce phénomène est rare et relève le plus souvent d'un mauvais choix de gaz d'assistance et de paramètres opératoires. Plus dangereux car invisibles, les rayonnements incidents provenant de réflections du faisceau laser à la surface des matériaux à couper justifient le port de lunettes spéciales par les opérateurs.</p>	<p>PA : Faible, émission de brouillard d'eau devant être capté sous la pièce, surtout si l'eau est chargée en abrasifs.</p> <p>PP : Faible bruit de chuintement/siflement sur faibles épaisseurs, ce bruit peut s'amplifier sur des épaisseurs plus importantes.</p> <p>PO : Nulle.</p> <p>PE : Traiter l'eau et les boues avant rejet.</p>
Gaz et fluides mis en œuvre	<p>Oxygène de coupe.</p> <p>Oxygène + combustibles pour les flammes de chauffe. Les combustibles les plus utilisés sont l'acétylène, le propane et un certain nombre de « mélanges » provenant de l'industrie pétrochimique.</p>	<p>Les gaz plasmagènes les plus employés sont l'air, l'oxygène, l'azote, les mélanges argon-hydrogène, azote-hydrogène, azote-argon-hydrogène.</p> <p>D'autres fluides peuvent être post-injectés en complément tels que air, eau, azote, dioxyde de carbone, méthane ou en mélange ; azote-méthane, argon-hydrogène, azote-hydrogène, etc. Le choix de ces combinaisons se fait en fonction de la nature des métaux à couper et de leur épaisseur.</p>	<p>Les gaz d'assistance, ou gaz de chasse, les plus couramment utilisés sont l'oxygène, l'azote, l'air, des mélanges azote-oxygène à teneur en oxygène inférieure à celle de l'air et l'argon pour certaines applications (métaux très réactifs). Le choix dépend de la nature des matériaux à couper et de la qualité de coupe visée.</p>	<p>Eau filtrée (de l'ordre du micromètre) et généralement adoucie.</p> <p>En règle générale l'eau ne doit pas contenir plus de 25 ppm de calcium, fer ou résidus minéraux. Turbidité maximale = 5 NTU, 6,5 &lt; pH &lt; 7,5.</p>
Investissements nécessaires	<p>Peu élevés, ils nécessitent toutefois une machine à CNC de bonne précision pour la gamme de vitesse utile (en général &lt; à 5 m/min), les sources de gaz ; oxygène, combustible et éventuellement l'air comprimé pour certains actionneurs, les chalumeaux et assez souvent ; les dispositifs de palpage (sondes capacitatives par exemple) et les veilleuses d'allumage automatique des chalumeaux.</p>	<p>Importants, car comprenant, en plus d'une machine à CNC de bonne précision à vitesse de coupe de l'ordre de 10 m/min voire plus, le ou les générateurs de courant pour atteindre les puissances utiles en fonction des épaisseurs (1,5 à environ 150 kW). À cet équipement de base, il faut ajouter la ou les torches plasma, les sources de gaz, les coffrets de gestion des fluides, le ou les groupes de refroidissement, le système de table à aspiration des fumées ainsi que l'unité de traitement des fumées.</p>	<p>Très importants, les sources laser peuvent selon leur puissance coûter 5 à 10 fois le prix d'un équipement plasma ; il faut ajouter à cela une machine à CNC de très bonne précision (la précision est généralement la justification d'un investissement laser), la tête de focalisation, à lentille ou miroirs, les sources de gaz lasers et d'assistance ainsi que le ou les groupes de refroidissement de la source.</p> <p>Globalement une installation de découpe laser, à capacité de découpe égale, représente un investissement 3 à 5 fois plus élevé que pour la découpe plasma.</p>	<p>L'investissement majeur se situe au niveau de la pompe et du circuit très haute pression (THP) auxquels il faut ajouter : une machine à CNC de très bonne précision, un poste de traitement de l'eau, un système de distribution et d'injection des abrasifs, un bac de récupération de l'eau, des abrasifs et de l'énergie cinétique du jet d'eau.</p> <p>Globalement, l'investissement est du même ordre de grandeur que pour les coupages laser.</p>

**Tableau 6 – Comparaison de différentes caractéristiques entre les quatre procédés de coupage (suite)**

Caractéristiques	Oxycoupage	Coupage plasma	Coupage laser	Coupage jet d'eau
Matières travaillées	<p>Aciers non alliés ou faiblement alliés.</p> <p>Pour les aciers fortement alliés et les métaux non ferreux, le phénomène de base de combustion du métal n'est pas possible.</p>	Tous matériaux conducteurs de l'électricité : en fait les métaux.	<p>Tous matériaux volatilisables, fusibles, et/ou combustibles, c'est-à-dire méaux, plastiques, tissus, cuirs, cartons, contreplaqué, etc.</p> <p>Une légère carbonisation des chants coupés peut faire rejeter le procédé si elle est considérée comme gênante.</p>	<p>Tous matériaux sans exception, y compris les produits alimentaires, mais les performances de vitesse sont faibles sur les matériaux durs (pierres et métaux).</p> <p>À n'employer, alors, que si les autres procédés sont inapplicables.</p> <p>Contrairement au laser, ne provoque aucune carbonisation des chants coupés.</p>
Épaisseurs possibles	<p>Supérieures à 3 mm environ et sans aucune difficulté jusqu'à environ 2 m d'épaisseur, travail possible mais une parfaite maîtrise opératoire du procédé devient nécessaire.</p>	<p>Pratiquement pas de limite inférieure (quelques dixièmes de millimètres) et 150 à 200 mm comme limite supérieure.</p> <p>Sur acier de construction au-dessus de 50 mm ; toutefois, les vitesses de coupe sont voisines voire inférieures à celles de l'oxycoupage et font disparaître l'intérêt du procédé.</p>	<p>Sur métaux, la fourchette industrielle courante va de quelques dixièmes de millimètre à 20-25 mm sur aciers de construction, à 12-15 mm sur aciers inoxydables et à 5-6 mm sur alliages d'aluminium. Ces limites supérieures sont évidemment fonction de la puissance maximale disponible de la source.</p> <p>Sur matériaux non métalliques, les épaisseurs « possibles » peuvent atteindre plusieurs centimètres mais les cas d'espèces sont nombreux et variés.</p>	<p>Couper 30 à 40 mm d'épaisseur sur métaux durs et matériaux pierreux, 100 à 130 mm sur aluminium est possible mais les vitesses de coupe sont extrêmement faibles (de l'ordre de la dizaine de millimètres par minute). Cela n'est pas un obstacle dans la mesure où seul ce procédé est envisageable.</p> <p>Sur produits alimentaires ou sur cellulose, 50 à 100 mm d'épaisseur sont possibles.</p>
Vitesses opératoires	Varient de 1 mm/min pour 3 mm à 20 cm/min pour 300 mm.	<p>Peuvent atteindre 20 m/min pour les épaisseurs les plus fines mais décroissent (en fonction des épaisseurs). Au-delà de 40 à 50 mm d'épaisseur d'acier de construction, l'oxycoupage est économiquement plus intéressant.</p>	<p>Même ordre de grandeur que le coupage plasma sur aciers de construction mais décroissance encore plus rapide lorsque l'épaisseur augmente. Avec les puissances actuelles (3 à 3,5 kW), l'intérêt en terme de qualité se réduit au-delà de 20 à 25 mm d'épaisseur d'acier de construction.</p>	<p>Pour les matériaux durs, les vitesses sont très faibles au-dessus de quelques millimètres d'épaisseur.</p> <p>Sur les autres matériaux, les vitesses sont en raison inverse de la dureté et dépassent 10 m/min sur de la cellulose (couches-culottes) et sur certains produits alimentaires.</p>
Déformations et précision	<p>Nécessite des précautions opératoires pour limiter les conséquences de l'apport de chaleur lié au principe même du procédé (combustion du fer).</p> <p>Des erreurs dimensionnelles, sur pièces, de 1 à 2 mm correspondent à des résultats pratiques en atelier. Elles peuvent être limitées à 1 mm, voire un peu moins, par un mode opératoire exceptionnel.</p>	<p>Par sa nature même, le procédé déforme moins que l'oxycoupage. Si, pour des raisons de pollution, on opère sur un plan d'eau, échauffement et déformations sont encore plus faibles.</p> <p>Des erreurs de cote sur pièce de 0,5 à 1 mm correspondent à une pratique courante.</p>	<p>Largeur de saignée et échauffements sont nettement moins importants qu'en oxydage et plasma.</p> <p>Les déformations peuvent donc être considérées comme non mesurables et les écarts de cotes sur pièce ne dépendent plus du procédé mais uniquement de la précision de déplacement de la machine.</p>	<p>Il ne s'agit pas, en fait, d'un procédé thermique ; il ne donne donc lieu à aucune déformation.</p> <p>Comme le coupage laser, les erreurs de cote sur pièces ne dépendent que de la précision de déplacement de la machine.</p>

**Tableau 6 – Comparaison de différentes caractéristiques entre les quatre procédés de coupage (suite)**

Caractéristiques	Oxycoupage	Coupage plasma	Coupage laser	Coupage jet d'eau
<b>Largeur de saignée</b>	Variables avec l'épaisseur coupée. De 2 à 6 mm mais les bords de la saignée sont bien parallèles (même pour les très fortes épaisseurs).	Variables de 0,6 à 6-8 mm, selon les épaisseurs, mais les bords de la saignée ne sont pas tout à fait parallèles (saignée un peu plus large à la partie supérieure).  L'utilisation d'une distribution de fluide plasmagène en flux tourbillonnaire introduit une dissymétrie latérale permettant d'obtenir l'un des côtés de la saignée perpendiculaire au plan tôle en reportant l'effet de léger chanfrein sur le côté « chute » de la saignée.	Sur métaux, saignée très fine (quelques dixièmes de millimètres) et bords bien parallèles.	Semblable au coupage laser avec toutefois une tendance à former des saignées à bords non parallèles (saignée plus large en bas qu'en haut) sur épaisseurs importantes.

(1) PA : pollution atmosphérique  
PP : pollution phonique  
PO : pollution optique  
PE : pollution de l'eau

# Coupage thermique et coupage au jet d'eau

par **Gilles CANNET**

et **Michel DELZENNE**

*Responsables de Groupes R & D  
au Centre Technique des Applications du Soudage (Air Liquide)*

## Bibliographie

Lucien Vignardet (Publications de la Soudure Autogène).

DS Howse & PA Hilton (TWI) : rapport 605/1997 : A cutting process comparison (TWI, Abington, Cambridge CB1 6AL, U.K.).

SAF. – *Plasmarama* (réf. 15154115).

Air Liquide (CTAS). – *La découpe Laser* (réf. 19057250).

G. Lardet (Bystronic A.G.). – *Journée d'information sur les moyens de découpe*, le 16/01/1997.

AWS Hand book volume 3 (1996) (American Welding Society, USA).

## Constructeurs. Fournisseurs

(liste non exhaustive)

AGA  
Airgas  
Air Liquide  
Air Products  
Amada  
Bystronic  
ESAB A.B.  
Hypertherm  
Ingersoll Rand  
Flow Systems Inc.

Koike Europe B.V.  
Komatsu  
Lectra Systèmes S.a.r.l.  
Limoges Précision Rouchaud ind.  
Messer Griesheim GmbH  
Prima Industrie  
SAF (La Soudure autogène Française)  
SAFMATIC  
Thermal Dynamics  
Trumpf GmbH

## Organismes

Institut de Soudure

Centre Technique des Applications du Soudage (CTAS)