

UNIVERSITE HOUARI BOUMEDIENNE ^{8/81}
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Departement de Mecanique

2/01

PROJET DE FIN D'ETUDES



Etude d'une installation de plasmacoupage

2 PLANS

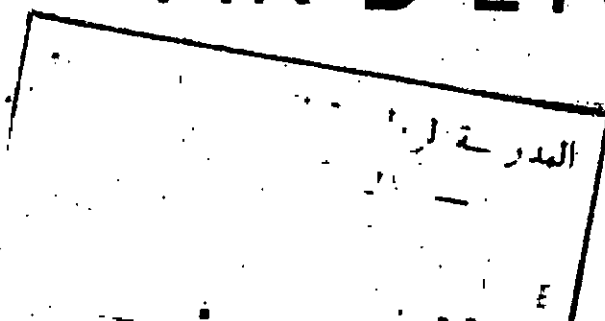
Proposée par:
MR CHALIMOV

Realisée par:
A. MAACHE

Promotion fevrier 1981

UNIVERSITE HOUARI BOUMEDIENNE
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Departement de Mecanique

PROJET DE FIN D'ETUDES



Etude d'une installation de plasmacoupage

Proposée par
Mr CHALIMOV

Realisée par
A. MAACHE

Promotion fevrier 1981

Je dédie cette étude à

Mes parents

Mes frères et Sœurs (beau et belle)

Tous mes amis

A LA MEMOIRE DE
TADJINE SAAD

Je remercie :

- Monsieur CHEALIMOV - Maître de Conférence pour ses conseils qui m'ont été d'une grande utilité.
- Tous ceux qui ont contribué à ma formation, en particulier les Professeurs du Département de Mécanique.
- Tous ceux qui m'ont aidé dans cette étude.
- Mme. BOURAFIA et Melle BELKACEMI qui ont assuré la frappe de ce polycopié.

SOMMAIRE

	PAGES
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I - LES DIVERS PROCÉDES DE COUPE	
1. Le Découpage mécanique	2
2. La Coupe thermique	3
3. Argumentation du choix du plasma coupage	7
4. Conclusion	13
CHAPITRE II - DESCRIPTION DU PROCÉDE	
1. L'Arc étrange	14
2. Générateurs à plasma	16
3. Différents types d'arcs	16
4. Choix du gaz plasmagène	19
5. Choix de l'électrode	29
6. Différents types d'installation	34
CHAPITRE III - DESCRIPTION DE L'INSTALLATION PROPOSÉE	
1. Caractéristiques techniques	38
2. Constitution générale	38
3. Rôle de chaque organe	38
4. Installation électrique	40
5. Le plasmatron	45
6. Le dispositif de déplacement	48
CHAPITRE IV - INFLUENCE DES PARAMÈTRES DU RÉGIME SUR L'USURE DE LA CATHODE	
1. Introduction	49
2. Présentation de la méthode	49
3. Traitement des mesures	50
4. Application : l'usure de la cathode	52
CHAPITRE V - ÉTUDE DE LA RENTABILITÉ	
1. Introduction	56
2. Plan de l'étude	56
3. Performances du plasma coupage du cuivre et de l'aluminium	57
4. Données du problème	57
5. Cas d'un chalumeau et d'un plasmatron	58
6. Cas de 4 chalumeaux et 4 plasmatrons	63
7. Discussion des résultats	64
CONCLUSION	66
BIBLIOGRAPHIE	67

INTRODUCTION

Pendant de nombreux siècles, la production des hautes températures fut liée à l'art du feu et reposa sur le phénomène de combustion.

Les perfectionnements se bornerent à l'utilisation de combustibles nouveaux.

"Le grand pas" fut franchi au début du XIX^e siècle grâce à la découverte de l'arc électrique par DAVY.

Le développement de l'électricité allant de pair avec celui de l'industrie, de nombreuses méthodes électriques firent leur apparition.

Parmi les dernières en date, fondées sur les propriétés des plasmas, ont considérablement augmenté le niveau des températures réalisables au laboratoire ou dans l'industrie.

Le chalumeau à plasma domine actuellement les autres méthodes de production des hautes températures.

La première application industrielle du plasma fut développée en 1909 à la "BADISCHE ANILIN UND SOCFABRIK" (BASF) par le savant SCHONNERR pour la fabrication du bioxyde d'azote (NO_2).

Deux ans plus tard, le savant américain MATTERS mis au point une torche à arc au plasma pour chauffer un four de fusion des métaux.

Les principes du coupage par plasma d'arc sont connus depuis le début du vingtième siècle. Mais ce procédé n'a pas pu être appliqué à cette époque car on ne disposait pas de métaux assez résistants à la chaleur pour la fabrication des électrodes.

Ce n'est qu'en 1925 que l'américain HINES fabriqua une torche à plasma d'arc capable de pratiquer des coupes d'assez bonne qualité.

Il fallut attendre la fin de l'année 1955 pour que la version moderne de la torche à arc plasma de HINES voit le jour.

En effet, en décembre 1955, la "LINDE DIVISION" de "UNION CARBIDE AN CARBON" présenta un équipement (mis au point dans ses laboratoires) pouvant couper à grande vitesse et presque parfaitement l'aluminium et ses alliages au moyen d'un arc au plasma monté entre une électrode en tungstène (cathode) et la pièce (anode). Le gaz étant un mélange d'Argon et d'Hydrogène.

Depuis, des progrès importants ont été apportés à ce procédé. L'évolution est si rapide, qu'aujourd'hui, ce procédé pourrait être appliqué économiquement à tous les métaux y compris les aciers à bas carbone en utilisant l'azote et l'air comme gaz plasmogène.

Cette dernière information nous incite à étudier ce procédé un peu plus en détail et de voir dans quelle mesure son application est économique et s'il peut être éventuellement utilisé par nos sociétés nationales.

CHAPITRE I

1- LE DECOUPAGE MECANIQUE

Le découpage exécuté à chaud ou à froid, fait intervenir uniquement un effort mécanique de cisailage (exercé soit entre les deux lames d'une cisaille, soit entre le poinçon et la matrice d'un outil de coupe),
Ce procédé peut être utilisé pour tous les métaux, et permet une bonne précision mais il est limité au coupage rectiligne.

Les principaux inconvénients de ce procédé sont la nature du métal et l'épaisseur à couper.

- a) pour une même machine, les épaisseurs maximales dépendent de la nature du métal (résistance à la rupture différentes, de même que la viscosité qui augmente la résistance au cisailage).
- b) le découpage de fortes épaisseurs nécessite des efforts de coupe et des puissances énormes.

1.1. Effort de coupe et puissance de la machine (1)

L'effort à exercer pour découper une tôle est donné par la formule suivante :

$$F = L \cdot e \cdot R_t$$

où

F = intensité de la force à exercer en daN
L = largeur découpée en mm
e = épaisseur en mm
 R_t = charge de rupture à la traction en daN/mm^2

La puissance de la machine sera :

$$P = \frac{F \cdot e}{t} \cdot 1,36 \cdot 10^{-3}$$

où

* 1,36 est un coefficient tenant compte de l'énergie absorbée (pour une presse travaillant en marche continue, on admet une absorption d'énergie de 36 %)

* t représente le temps d'une coupe il est exprimé en seconde.
F et e étant respectivement exprimé en N et en mm.

1.2. Exemple numérique

Soit à découper une plaque large de 500 mm, épaisse de 20 mm dans un matériau à $R_t = 38 \text{ daN/mm}^2$. La presse travaillant à un coup par seconde

l'effort de coupe nécessaire sera égal à :

$$F = 500 \cdot 20 \cdot 38 = 380.000 \text{ daN}$$

La machine doit avoir une puissance de

$$P = \frac{380.000 \cdot 20 \cdot 1,36 \cdot 10^{-3}}{1} = 103.360 \text{ W} = 103,360 \text{ kW}$$

3

Cet exemple montre à quel point le matériel pour le coupage mécanique doit être puissant. C'est la raison pour laquelle seules les faibles épaisseurs sont découpées par ce procédé.

Remarque :

Les fortes épaisseurs peuvent être découpées mécaniquement, mais cela nécessite l'emploi de procédés à faible rendement (scies, fraiseuses etc...).

2. LE COUPAGE THERMIQUE

Le coupage thermique englobe divers procédés agissant par un changement local d'état dû à une action thermique. Le coupage thermique se divise en deux catégories.

a- dans la première, la fusion directe du matériau est évitée et le changement d'état résulte d'une oxydation par action chimique d'un jet d'oxygène.

Les principaux procédés de cette catégorie sont : l'oxycoupage ordinaire, l'oxycoupage avec intervention d'adjuvants, le coupage et gougeage oxy-arc.

b- dans la deuxième catégorie, la fusion directe du métal est obtenue par intervention d'une source de chaleur concentrée. On y rencontre le coupage simple à l'arc au charbon, le coupage arc-air, le coupage par focalisation d'énergie (laser, bombardement électronique) et le plasmacoupage.

2.1- L'Oxycoupage ordinaire

Ce procédé est essentiellement basé sur la combustion du métal dans un jet d'oxygène. De ce fait, la vitesse est déterminée surtout par la vitesse de la réaction chimique. L'influence des paramètres du régime et de l'épaisseur à découper, n'est pas aussi grande que celle de la vitesse de la réaction.

Pour pouvoir amorcer la combustion, il est nécessaire de porter localement le métal à une température dite d'amorçage.

Pour cela, le jet de coupe étant fermé, et le chalumeau à l'arrêt, on chauffe une zone localisée de la pièce à l'aide d'une flamme. Par la suite, le jet de coupe étant ouvert, le chalumeau est lentement déplacé.

L'appoint de chaleur indispensable à la coupe est fourni par la flamme de chauffe qui accompagne le jet.

Les combustibles les plus utilisés sont l'acétylène et le propane.

.../...

Cependant, l'oxycoupage n'est possible qu'à trois conditions (2)

- a) la réaction d'oxydation doit être exothermique et dégager une quantité de chaleur suffisante pour entretenir, avec l'aide de la flamme du chalumeau coupeur, la température nécessaire à la combustion vive.
- b) la température d'amorçage de la réaction de combustion doit être au plus égale à la température de fusion du métal à découper.
- c) la température de fusion des produits de la réaction de combustion doit être au plus égale à la température de fusion du métal à découper.

Ces trois conditions ont pour conséquence la limitation de l'oxycoupage aux aciers dont la teneur en carbone est inférieur à 0,4 %, aux aciers faiblement alliés et au titane. Car les seuls métaux dont l'oxyde est suffisamment fusible et fluide pour donner des vitesses de coupes acceptables sont le fer et le titane.

Les métaux non ferreux, les fontes, les aciers inoxydables etc...ne sont pas oxycoupables à cause de la formation immédiate sur leur surfaces d'une couche d'oxyde qui possède une température de fusion très élevée et une tension superficielle importante.

Cette couche d'oxyde rend le contact oxygène-métal impossible, ce qui arrête la réaction de combustion.

Il n'est pas possible d'oxycouper l'aluminium dont la température de fusion est à cause de la formation de son oxyde dont la température de fusion est 2150°C.

Cette limitation à laquelle s'ajoute une zone thermiquement affectée aux dimensions assez importantes constituent les principaux inconvénients de l'oxycoupage ordinaire.

2.2. L'oxycoupage avec intervention d'adjuvants (1)

De nombreuses tentatives d'extension de l'oxycoupage à la fonte et aux aciers inoxydables ont eu lieu dans le passé :

- manèment d'une baguette de fer dans le sillage de coupe
- chalumeau spécial à injection d'acétylène
- chalumeau spécial à injection de poudre scorifiante (CO_2NaH)
- chalumeau spécial à injection de poudre abrasive (silice)
- injection de poudre de fer.

L'injection de poudre de fer s'est relevée la solution la meilleure.

Le chalumeau oxycoupeur à poudre de fer fonctionne suivant le même principe qu'un chalumeau pour oxycoupage ordinaire, avec en plus une injection d'un mélange air plus poudre de fer.

L'injection de poudre de fer a permis l'élargissement du champ d'application de l'oxycoupage aux aciers inoxydables, la fonte, les alliages d'aluminium, de nickel et d'alliages cuivreux. Les épaisseurs coupées peuvent atteindre 300 mm pour les aciers inoxydables et 500 mm pour les fontes.

Parmi les inconvénients de ce procédé, il faut noter que la consommation de poudre est importante, la consommation en oxygène a plus que doublé et l'aspect de la coupe est moins régulier que celui de l'oxycoupage ordinaire.

2.3. Coupage et gougeage oxy-arc (1)

Des électrodes pour soudage à l'arc présentant une âme tubulaire peuvent être branchées sur une réserve d'oxygène. Elles se comportent alors comme de petites lances.

L'arc obtenu, produit l'amorçage et entretient la combustion. Le laitier complète l'action scorifiante de l'oxyde formé. On peut ainsi oxy couper et surtout gouger des pièces d'acier, de fonte ou de cupro-aluminium.

Toutefois, le maniement de l'appareil exige de l'habileté.

2.4. PROCEDES INTERVENANT PAR FUSION LOCALISEE

2.4.1 - Coupage simple à l'arc au charbon (1)

Le coupage par fusion du métal à l'arc reste une opération grossière de destruction qui n'est plus guère pratiquée. Pour obtenir un débit acceptable, il faut recourir à des courants très intenses ; par suite, le porte électrode est très lourd et le travail pénible.

2.4.2. Coupage arc-air (1)

Un arc est établi entre une électrode cuivrée en graphite et la pièce. L'ensemble est alimenté sous une tension continue, l'électrode étant positive ; l'intensité du courant atteint 200 A pour une électrode de 6 mm et 500 A pour une électrode de 13 mm. Un puissant jet d'air comprimé sous 6 à 7 bars, d'un débit de un mètre cube par minute chasse le métal fondu dès sa formation.

Ce procédé est très employé pour le gougeage à l'envers et le dégagement des défauts de soudure sur l'acier de toute nature. Des équipements plus puissants conviennent au coupage.

2.4.3. Coupage par focalisation de l'énergie (1)

Deux formes d'énergie rayonnante se pretent à une concentration extrême et portant à fusion des parties très localisées de pièces, y pratiquent des entailles, des trous ou des fentes d'une finesse extrême, à l'échelle du micro

Ce sont le rayonnement laser et le faisceau d'électrons.

a) - Le faisceau d'électrons

Ce procédé opère par fusion à l'aide d'un faisceau électronique fourni par un canon à électrons.

Les électrons sont émis par une cathode en tantale ou en tungstène portée à haute température, puis ils sont projetés et focalisés par le canon à électrons fonctionnant sous vide (de l'ordre de $7,5 \cdot 10^{-5}$ N/m²).

Ceci suppose que la pièce doit se trouver à l'intérieur de l'enceinte c'est à dire sous vide.

Vu les difficultés et le temps nécessaire pour créer un vide poussé dans une chambre vaste, ce procédé est réservé uniquement aux pièces de petites dimensions et pour des cas spéciaux.

b) - le rayon laser

Le rayon laser est utilisable pour couper des feuilles de métal de 0,05 à 3 mm d'épaisseur. Ce procédé donne des coupes d'aspect net.

Cependant, le coût des installations et la faiblesse des épaisseurs coupées, fait que ce procédé, comme le bombardement électronique soit réservé aux cas spéciaux.

2.4.4. LE PLASMA COUPAGE

1. Définitions

a) les plasmas sont des milieux gazeux portés à un taux d'ionisation élevé. De ce fait, ils sont conducteurs bien que globalement neutres.

b) Si on soumet une colonne de plasma à une convection forcée (en l'entourant par un tube annulaire refroidi à l'eau) elle subit un étranglement et un accroissement de température. L'arc est alors dit CONFINE ou ETRANGLE. Sa température atteint 30.000°k pour les applications industrielles (3).

2. Principe

Le principe du plasma coupage repose sur le fait qu'en faisant jaillir un arc confiné entre la pièce et l'électrode, on obtient des températures très élevées. On peut ainsi fondre une zone très localisée de la pièce ;

Le jet de plasma qui est projeté à grande vitesse chasse le métal fondu. La saignée est obtenue par déplacement continu de l'arc.

3. Principaux avantages et inconvénient du plasmacoupage

- Ce procédé permet de découper tous les métaux même les plus réfractaires.
- Le fait que ce procédé soit basé sur la fusion du métal sous l'action de la chaleur dégagée par un arc, et de son évacuation sous l'action du jet de gaz, permet, en agissant sur les paramètres du régime, une grande augmentation de la productivité.
- La zone thermiquement affectée est faible
- Dans le cas du découpage des aciers doux, ce procédé ne peut pas concurrencer l'oxycoupage dans les épaisseurs coupées (celles-ci peuvent atteindre 1500 mm et plus pour l'oxycoupage alors qu'elles ne sont que de 300 mm pour le plasma-coupage
- l'appareillage pour le plasmacoupage est plus complexe que celui de l'oxycoupage.

3. ARGUMENTATION DU CHOIX DU PLASMACOUPAGE

A la lumière de ce bref exposé sur les différents procédés de coupage, il apparaît qu'en dehors de l'oxycoupage, qui a fait ses preuves et qui est largement utilisé, seul le plasmacoupage présente un intérêt pour l'industrie.

Des chercheurs pensent que le plasmacoupage constitue dans certaines conditions un procédé plus économique que l'oxycoupage (4)/

Les avantages de ce procédé pour les fontes, les métaux inoxydables, les métaux non ferreux et les aciers fortement alliés sont évidents.

En effet, l'emploi de l'oxycoupage ordinaire est impossible, d'autre part, une coupe nette peut être effectuée par plasmacoupage à des vitesses égales à plusieurs fois celle obtenues par l'oxycoupage à la poudre, les performances en épaisseurs étant égales.

Il est dès lors intéressant de voir dans quelle mesure le plasmacoupage pourrait concurrencer l'oxycoupage dans son propre domaine c'est-à-dire pour les aciers dont la teneur en carbone est inférieure à 0,4 %.

La comparaison sera faite sur trois critères :

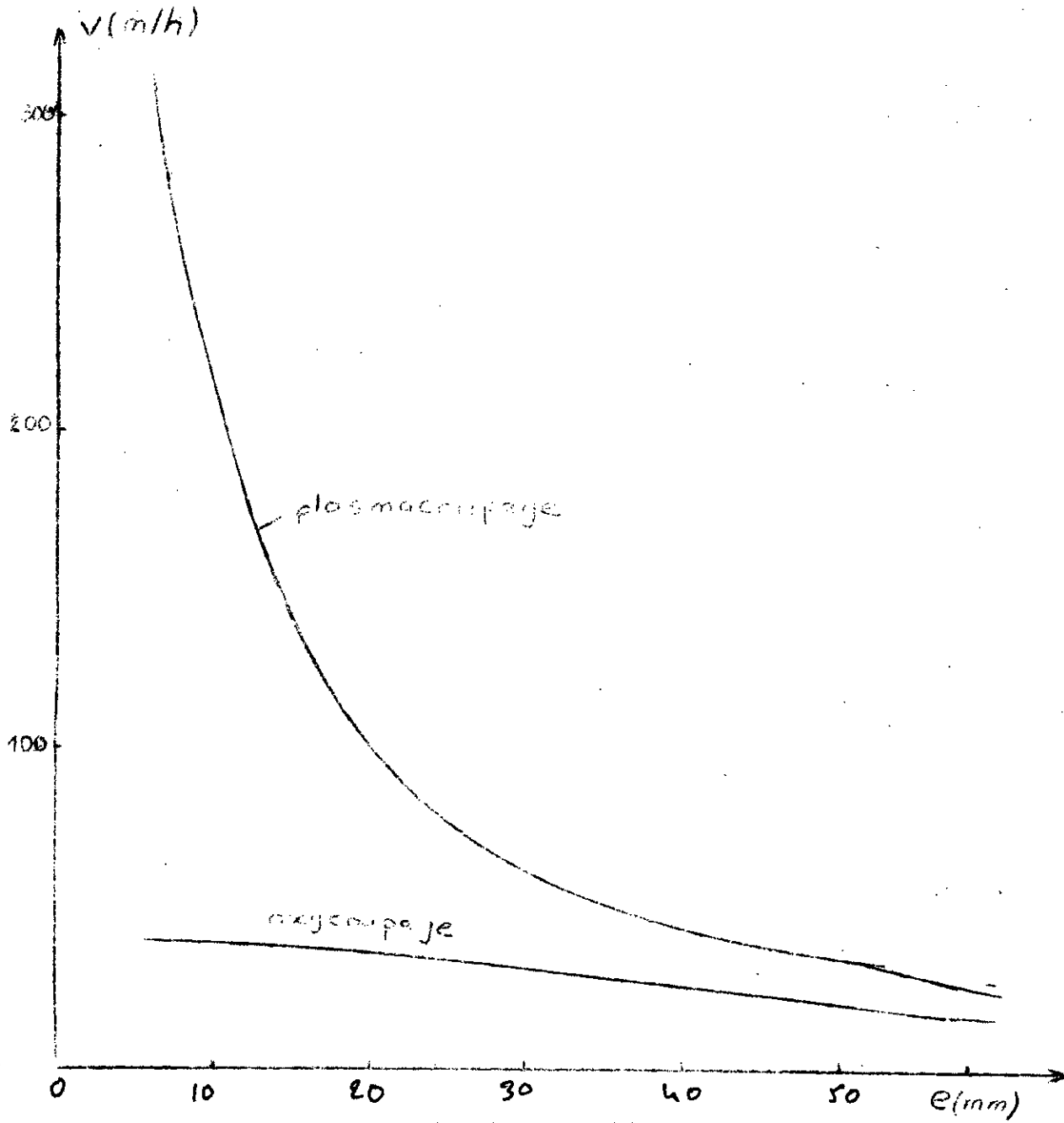
- La productivité
- La qualité de coupe
- Les effets métallurgiques (Zone thermiquement affectée).

3.I. Productivité

La productivité étant directement liée à la vitesse de coupe, la comparaison sera faite à travers cette dernière.

La vitesse est le principal atout du coupage au jet de plasma elle varie de 300 m/h pour une épaisseur de 6 mm à 45 m/h pour une épaisseur de 50 mm, contre 36 m/h à 21 m/h pour les mêmes épaisseurs en oxycoupage.

Le tableau et le graphe suivants (3) donnent une idée plus exacte de cette différence.



épaisseurs mm	PLASMACOUPAGE (gaz plasmagène : Air)			OXYCOUPAGE
	Puissance kw	débit m ³ h	vitesse m/h	vitesse : m/h
6	54	7	300	36
12,7	63	7	150	36
25,4	72	7	75	30
50,8	100	9,8	45	21

On voit par exemple que pour une épaisseur de 6 mm, la vitesse de coupe en plasmacoupage est, environ égale à 8 fois celle de l'oxycoupage.

Pour des épaisseurs supérieures à 50 mm, la différence est trop faible pour qu'on puisse parler d'avantage pour l'un ou l'autre des deux procédés (4):

C'est ainsi (selon une publication faite par K.NISHIGUCHI et K.MATSUYAMA suite à une étude faite sur sept usines) que dans les ateliers japonais utilisant le jet de plasma pour le coupage de l'acier doux, la productivité est supérieure de deux à cinq fois celle obtenue en coupage aux gaz:

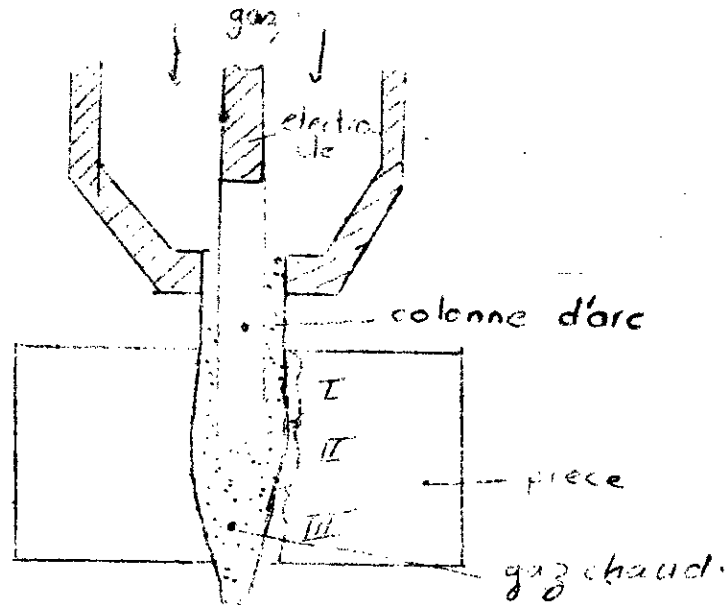
3.2. Qualité de la coupe

Pour faire une comparaison entre les qualités de coupe en oxycoupage et en plasmacoupage, il est nécessaire de bien comprendre leurs mécanismes:

3.2.1. Pour l'oxycoupage, la coupe se fait suivant un mécanisme unique sur toute l'épaisseur de la pièce. Ceci est dû au fait que l'oxyde formé s'élimine immédiatement dégageant ainsi une nouvelle couche de métal offerte à l'attaque. Cette unicité du mécanisme; permet des coupes d'équerre sans précautions particuliers.

3.2.2. En plasmacoupage par contre, le processus de coupe n'est pas le même tout au long du jet: Il dépend de la position de la tache anodique (4):

Pour mieux saisir le phénomène, considérons le schéma suivant :



Sur l'épaisseur de la pièce, nous distinguons trois zones :

- la zone anodique (II)
 - la zone se trouvant au dessus de la tache anodique (I)
 - la zone se trouvant en dessous de la tache anodique (III)
- a). Dans la zone I, le métal fond sous l'action de la chaleur dégagée par la colonne d'arc dont la température est de l'ordre de 20.000°C (la transmission de la chaleur se fait par convection et par rayonnement).
- b) dans la zone II, à la chaleur dégagée par la colonne d'arc s'ajoute celle dégagée par la tache anodique. Mais cette dernière n'est pas assez importante pour avoir une grande influence sur la qualité de coupe.
- c). Dans la zone III, la pièce est coupée sous l'action du métal en fusion à une température supérieure de 100 à 200°C à son point de fusion, et des gaz plasma dont la température a baissé.

Il en résulte une différence des vitesses de fusion (de même que des épaisseurs fondues) dans ces trois zones. De ce fait, la forme de la coupe peut être irrégulière.

Cet inconvénient peut être facilement évité en déplaçant la tâche anodique dans la partie inférieure de la pièce
Ce déplacement est possible grâce aux caractéristiques externes tombantes des sources d'alimentation utilisées en plasmacoupage figure 1. et à la caractéristique statique de l'arc : figure 2.

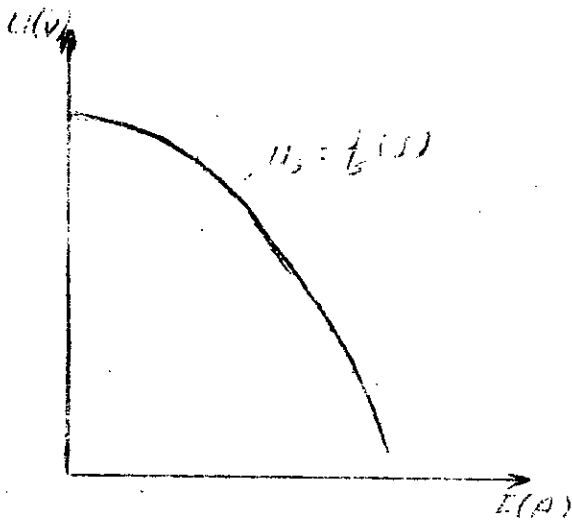


Fig 1: caractéristique externe de l'alimentation

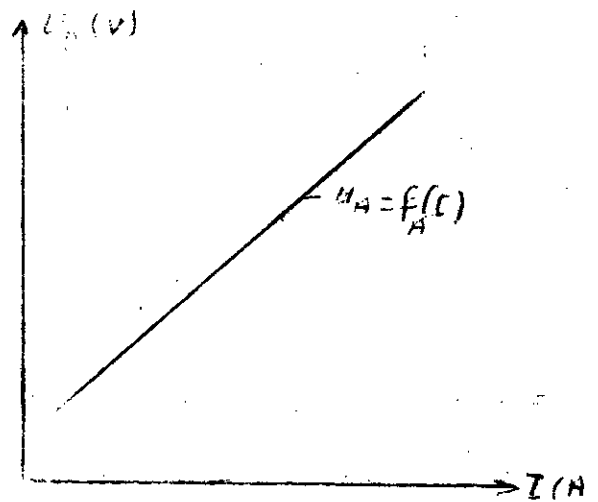


Fig 2: caractéristique statique de l'arc.

Les paramètres de fonctionnement sont déterminés par le point d'intersection de ces deux caractéristiques. En augmentant le débit "d" du gaz plasmagène, les paramètres du régime changent et la caractéristique statique de l'arc est déplacée vers le haut.

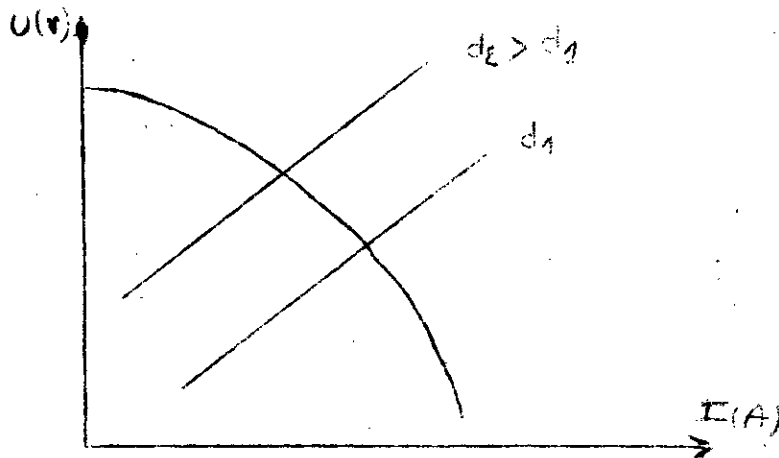


Fig 3: Variation des paramètres du régime avec le débit

La figure 3. montre que l'augmentation du débit nécessite une augmentation correspondante de la tension U. La longueur de l'arc variant dans le même sens que le débit et la tension, on peut donc placer la tache anodique au bas de la pièce.

Précaution à prendre (5)

Il est à signaler que l'utilisation des vitesses maximales provoque une déformation de l'arc (figure 4) ce qui a pour effet de déplacer la tache anodique vers le haut et donc de donner une coupe irrégulière.

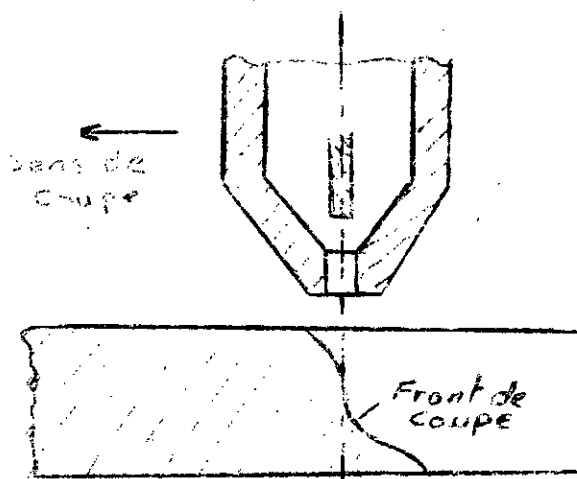


Fig 4: Forme du front de coupe pour les vitesses maximales [5]

L'obtention de coupes d'équerre est soumise à l'utilisation d'une vitesse de coupe dite optimale c'est à dire la vitesse au dessous de laquelle l'arc garde sa rigidité.

3.3. La Zone Thermiquement affectée

La zone thermiquement affectée peut être calculée par la formule utilisée en soudage (6)

$$\delta = \frac{q \sqrt{\frac{2}{\pi e}}}{\delta \cdot v \cdot c \cdot \rho \cdot T_0}$$

où

q = énergie spécifique et est égale à q = 0,24 u.i.

v = vitesse de coupe

T = température

δ = épaisseur.

e = base des logarithmes neperiens

c = capacité thermique

ρ = densité

On voit que la zone thermiquement affectée est inversement proportionnelle à la vitesse de coupe. Ce qui donne une zone thermiquement affectée moins large en plasmacoupage qu'en oxycoupage.

4. CONCLUSION

Affirmer que le plasmacoupage remplace l'oxycoupage serait faux. Il est plus exact de dire que ces deux procédés se complètent, chacun ayant un domaine d'utilisation précis (bien qu'il y ait un certain chevauchement).

L'intérêt du plasmacoupage pour les métaux non ferreux, les fontes, les aciers inoxydables ne fait aucun doute.

Pour les aciers dont la teneur en carbone est inférieure à 0,4 %, le plasmacoupage n'est économique que pour les épaisseurs inférieures à 50 mm. Surtout si l'équerrage n'est pas nécessaire (dans ce cas, on peut utiliser les vitesses maximales).

Du point de vue métallurgique, le plasmacoupage est préférable dans la mesure où il donne une zone thermiquement affectée nettement inférieure à l'oxycoupage.

CHAPITRE II

1. L'ARC ETRANGLE (OU CONFINE)

1.1. Historique

L'étranglement d'un arc électrique a été imaginé en 1922 par GERDIEN et LOTZ. (7)

Le dispositif utilisé était constitué par une chambre cylindrique à axe horizontal traversée par un arc créé entre deux électrodes et étranglé dans un vortex d'eau. L'eau est vaporisée au contact de l'arc, puis se dissocie et s'ionise partiellement. La vapeur s'évacue par deux tuyères situées aux extrémités de la chambre.

Cet étranglement a pour effet une augmentation considérable de la température dans l'axe de l'arc.

Pour une intensité de 1450 A, la température maximum est de 53.000 °K.

Ce principe a été développé par WEISS et PETERS vers 1954. (7)

L'un des dispositifs est constitué d'une anode en forme de crayon et d'une cathode annulaire traversée par le jet de plasma.

L'eau arrivant tangentiellement dans la chambre constitue un diaphragme autour de l'arc.

La vapeur formée se dissocie et s'ionise puis est éjectée par une tuyère conductrice qui constitue la cathode du système.

Malgré l'intérêt des propriétés de l'arc étranglé, ces dispositifs n'ont pu être utilisés en raison de la consommation rapide de l'électrode en carbone et de la présence de vapeur d'eau inacceptable dans la plus part des applications.

Les procédés actuels, basés sur le confinement de l'arc électrique au moyen d'une tuyère énergiquement refroidie n'ont fait leur apparition qu'en 1955. (8)

1.2 Propriétés des arcs étrangles

Les arcs étrangles se caractérisent, par plusieurs propriétés parmi lesquelles :

a- forte concentration de l'énergie dans la partie centrale dont la température atteint 8000 à 2500°K selon les gaz utilisés et les conditions de leur utilisation.

b- haute conductivité thermique et plus forte densité de particules ionisées dans la partie centrale.

c- gradient de température élevé et conductivité thermique faible à la périphérie (figure 1).

d-faible ionisation de la couche externe grace au refroidissement
 e-la température maximale dans l'arc croit avec le produit
 U.I (tension courant) et est influencée par le diamètre de
 la tuyère (figure 2).

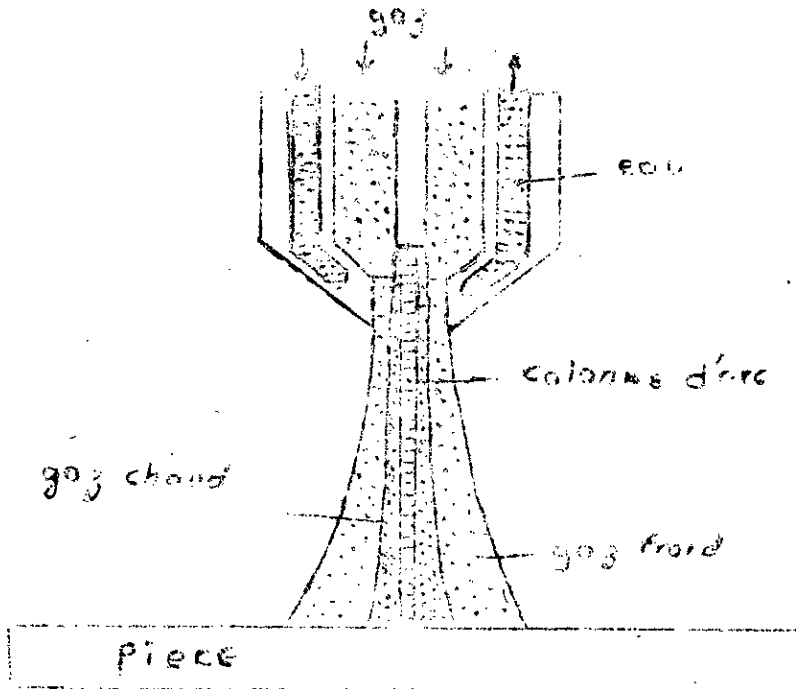


Fig 1: Constitution d'un arc plasma [7]

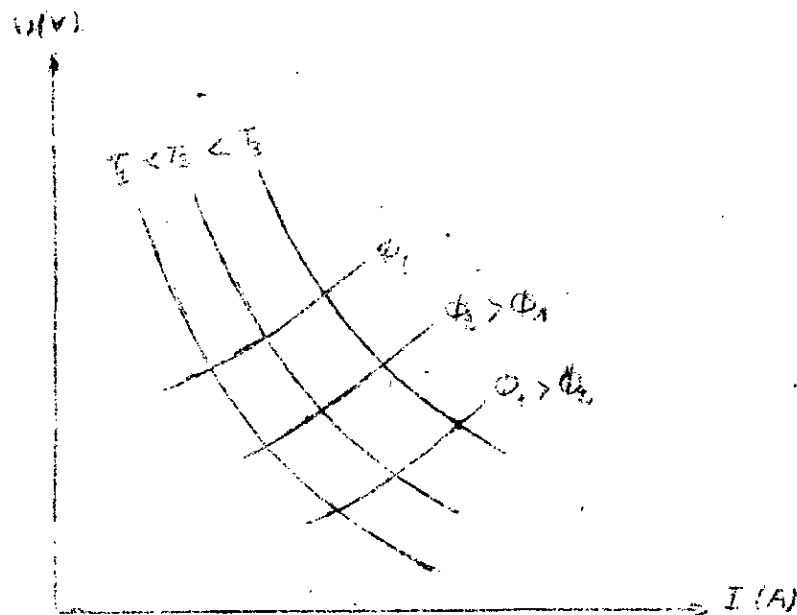


Fig 2: Variations de la température avec la tension, le courant et le diamètre de la tuyère [7]

2. GÉNÉRATEURS A PLASMA (9)

Parmi tous les procédés possibles d'ionisation des gaz, deux ont été retenus par l'industrie.

2.1. Générateur à plasma à haute fréquence

L'ionisation du gaz est réalisée par passage de celui-ci dans un tube (silice par exemple) placé à l'intérieur d'un solénoïde parcouru par un courant à haute fréquence (comprise entre 5 et 60 MHz).

Ces générateurs sont utilisés lorsque la vitesse d'éjection du plasma n'est pas un avantage, et chaque fois qu'il est nécessaire d'avoir un plasma de grande pureté.

C'est le cas du frittage et de l'élaboration de monocristaux d'oxydes ou de métaux très réfractaires à partir de matériaux pulvérulents.

2.2. Générateur à plasma d'arc

Pour le coupage, le soudage et les projections de particules, le temps de transfert calorifique doit être très bref, et il est avantageux d'avoir une vitesse d'éjection élevée.

Ce genre de plasma est fourni par des générateurs à plasma d'arc.

Le plasma est obtenu par passage d'un gaz dans un arc électrique créé et maintenu entre deux électrodes.

Le gaz est éjecté à travers une tuyère de faible diamètre, fortement refroidie par une circulation d'eau pour éviter toute détérioration du fait d'une élévation de température trop importante.

3. DIFFÉRENTS TYPES D'ARCS (7)

Comme il a été dit ci-dessus, les générateurs utilisés en coupage sont les générateurs à plasma d'arc. On distingue deux types d'arcs :

- L'arc non transféré ou soufflé
- L'arc transféré

3.1. Arc non transféré

Cet arc est établi entre l'électrode, généralement reliée au pôle négatif du générateur et une tuyère reliée au pôle positif (fig.3)

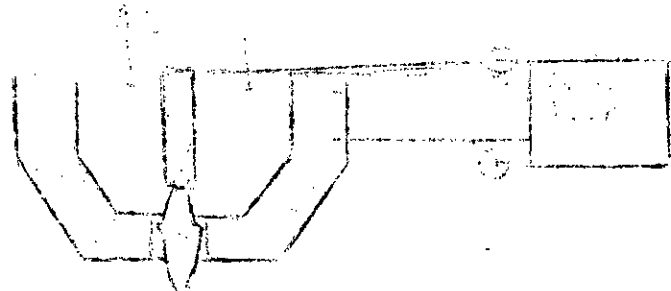


Fig 3. Schéma de principe d'un arc non transféré

3.1.1. Utilisations de l'arc non transféré

Parmis les utilisations possibles de l'arc non transféré, on distingue :

- soudage "microplasma"
- soudage de pièces non conductrices d'électricité
- coupage de faibles épaisseurs (sur matériaux conducteurs et non conducteurs d'électricité.)
- moyens d'amorçage de l'arc transféré.

3.2. Arc Transféré

L'arc transféré est établi entre l'électrode et la pièce (figure 4). Le jet de plasma est alors entièrement parcouru par le courant électrique, ce qui a pour conséquence une fusion rapide et localisée de la pièce à couper du fait de la plus grande quantité de chaleur transmise et de la plus grande énergie cinétique des électrons qui bombardent la pièce.

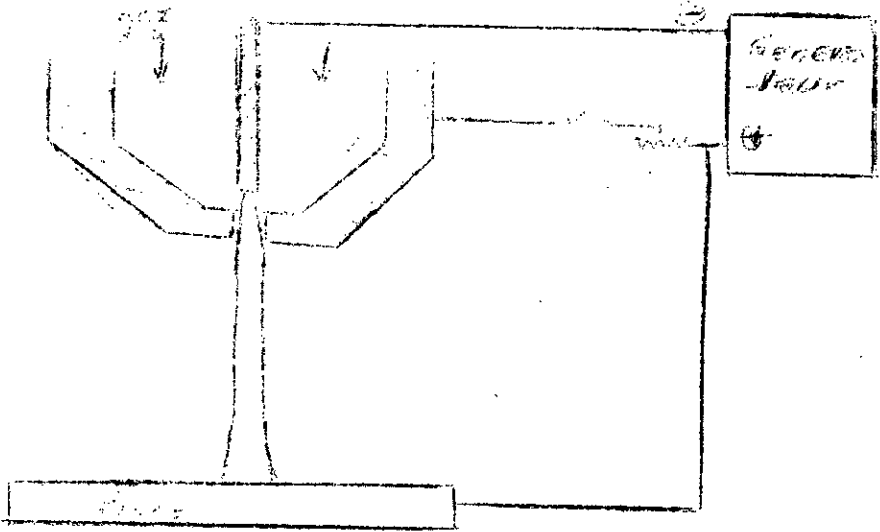


Fig 4. Schéma de principe d'un arc transféré

3.2.1. Utilisations de l'arc transféré

L'arc transféré est essentiellement utilisé pour :

- Le coupage de tous les métaux conducteurs d'électricité pour de faibles et fortes épaisseurs.
- Le soudage
- Moyen de chauffage de fours (fusion des métaux les plus réfractaires).

4. CHOIX DU GAZ PLASMAGENE

4.1. Rôles du gaz

Le gaz plasmagene joue plusieurs rôles qui sont :

- a) assurer l'amorçage le plus facile possible de l'arc
- b) protéger la buse contre la fusion
- c) protéger l'électrode contre la destruction
- d) transformer l'énergie électrique en énergie thermique
- e) transférer l'énergie thermique au métal à couper.

Comme on le voit, le gaz a une grande importance dans le procédé. Cependant, il a des rôles parfois contradictoires et les différents gaz utilisés en plasma coupage (Argon, Azote, Hydrogène, air et les mélanges Argon-hydrogène, Argon Azote, Argon-Azote-hydrogène) assument plus ou moins bien ces rôles en fonction de leurs propriétés thermodynamique, physique, chimique...

Ceci nous conduit à comparer leurs avantages et inconvénients pour choisir celui qui convient le mieux.

4.2. Critères de comparaison

Les critères de comparaison seront :

- a) la facilité d'amorçage de l'arc
- b) les potentiels nécessaires à l'entretien de l'arc
- c) l'énergie emmagasinée (puis restituée) par le gaz
- d) la conductibilité thermique du gaz
- e) le prix des gaz

4.2.1. Energie emmagasinée.

Pour une même température, l'énergie emmagasinée puis libérée par le plasma dépend fortement de la nature du gaz. C'est ce que nous montre la figure 5.

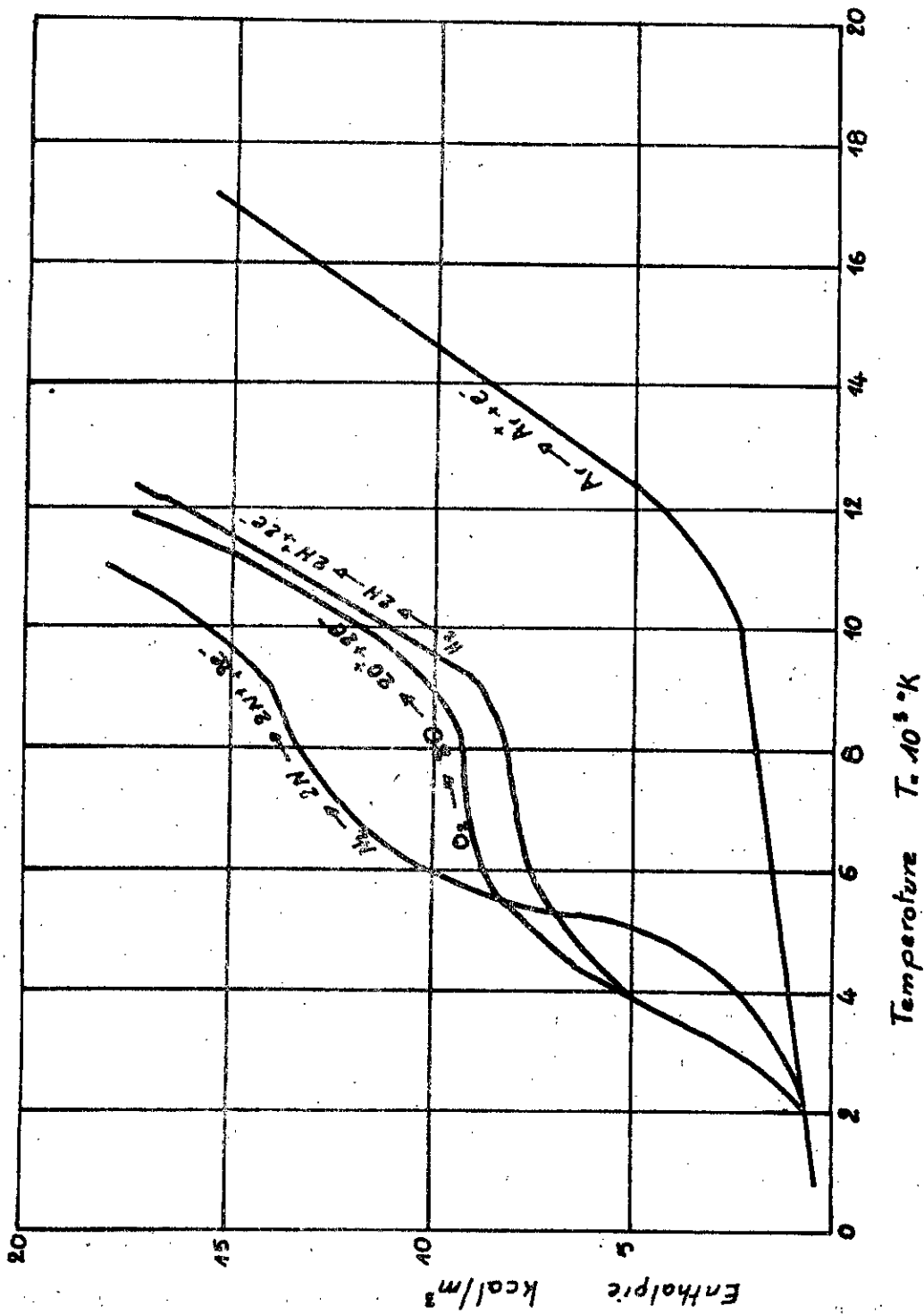


Fig. 5 Energie emmagasinée par les gaz. [5]

La première constatation qu'on fait à partir de ce graphe est que pour une température donnée, les gaz biatomiques emmagasinent plus d'énergie que les gaz monoatomiques. Ceci s'explique par le fait que pour les gaz monoatomiques, on doit fournir uniquement l'énergie d'ionisation tandis que pour les gaz biatomiques, on doit fournir en plus l'énergie de dissociation des molécules. C'est ce que nous montre le tableau suivant :

Gaz	dissociation (ev)	Ionisation (ev)	transformation	energie totale(ev)
Ar	-	15,7	$Ar \rightarrow Ar + e$	15,7
H ₂	4,44	13,56	$H_2 \rightarrow 2H - H + e + e$	18
N ₂	8,2	14,5	$N_2 \rightarrow 2N - N + e + e$	22,7

Tableau 1 : Energie d'ionisation et de dissociation de N₂ , H₂ , et Ar (I₀)

Ce qui nous conduit à conclure que du point de vue énergétique, il est préférable d'utiliser les gaz biatomiques (ou polyatomique)

La deuxième constatation, est que parmi les gaz biatomiques utilisés (N₂ et H₂) c'est l'azote qui emmagasine le plus d'énergie.

L'air qui est composé essentiellement d'azote et d'oxygène, emmagasine une énergie sensiblement égale à celle de l'azote.

4.2.2. Conductibilité thermique

Comme il a été déjà cité dans la première partie, le transfert de chaleur de l'arc vers la pièce se fait essentiellement par rayonnement et par convection. Par conséquent, la conductibilité thermique du gaz joue un rôle important. Une faible conductibilité thermique, entraîne un mauvais transfert de la chaleur et donc diminue le rendement du Plasmatron.

La figure(6) donne les variations de la conductibilité thermique en fonction de la température pour l'hydrogène, l'azote et l'argon.

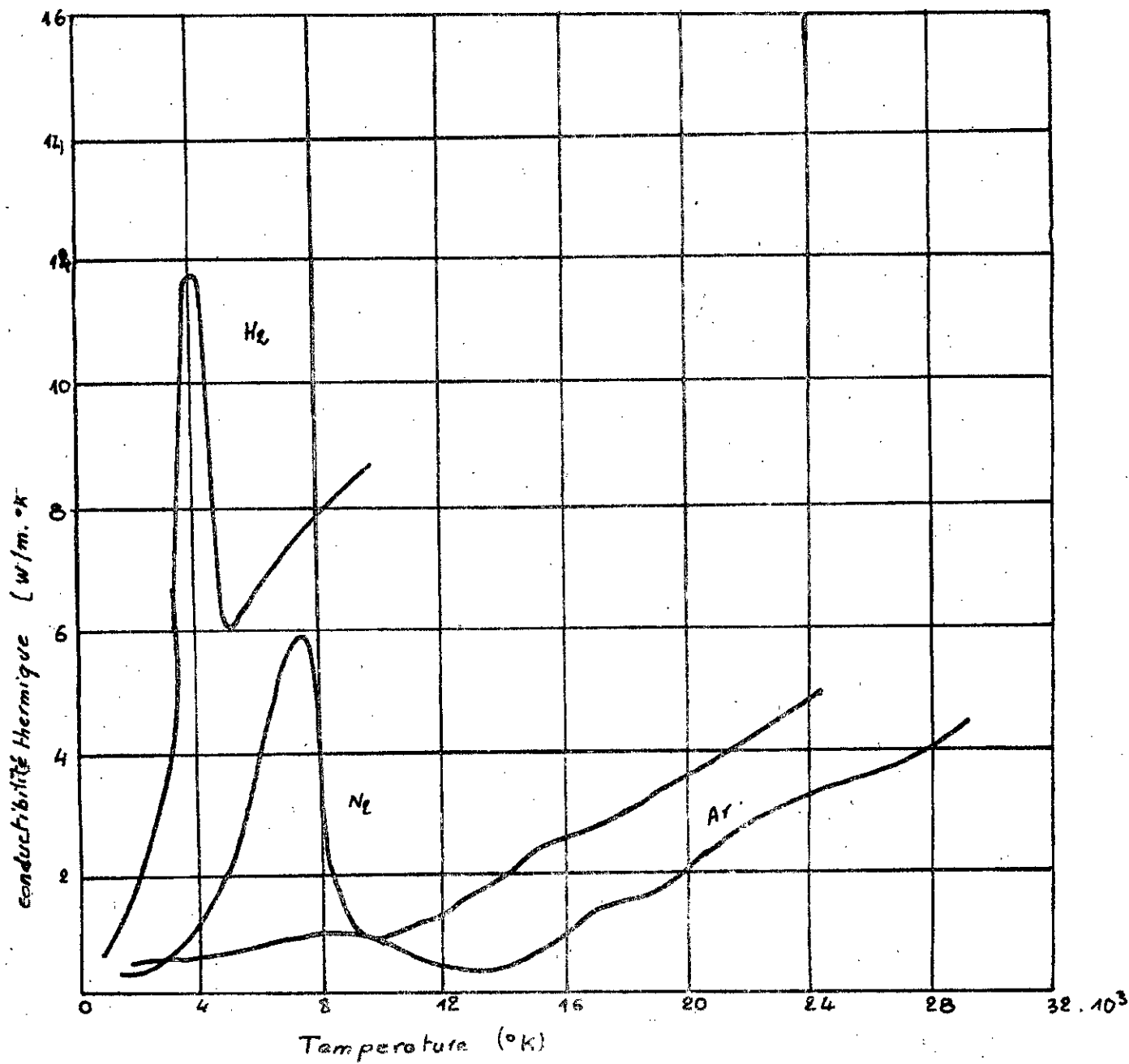


Fig 6 Conductibilité thermique en fonction de la température pour l'argon, l'azote, et l'hydrogène. [5]

De cette figure il apparait - du point de vue de la conductivité thermique - que l'ordre de préférence est : hydrogène, azote, argon.

4.2.3. Amorçage et entretien de l'arc

a) Amorçage

D'une manière générale, l'amorçage de l'arc est plus facile dans l'argon que dans les gaz ou mélanges à potentiels d'ionisation plus élevé.

Dans une atmosphère d'Argon, une tension à vide du générateur de courant continu à caractéristiques tombantes de 75 V suffit à l'amorçage de l'arc.

Avec les gaz ou mélanges, une tension à vide supérieure à 100 V est nécessaire. (7)

b) Entretien de l'arc

Pour pouvoir entretenir un arc, une tension est nécessaire. Pour une même intensité de courant, elle dépend du gaz et de la longueur d'arc désirée. La figure 7 [5] qui donne le gradient de tension E (V/cm) en fonction du courant I (A) nous permet de faire une comparaison des différents gaz étudiés.

Nous constatons que les tensions requises sont très fortes pour l'hydrogène, faibles pour l'argon et moyennes pour l'azote et l'air.

Il faut cependant noter que si une faible tension présente l'avantage d'un entretien facile de l'arc, elle est un inconvénient pour la chaleur libérée et donc diminue les performances

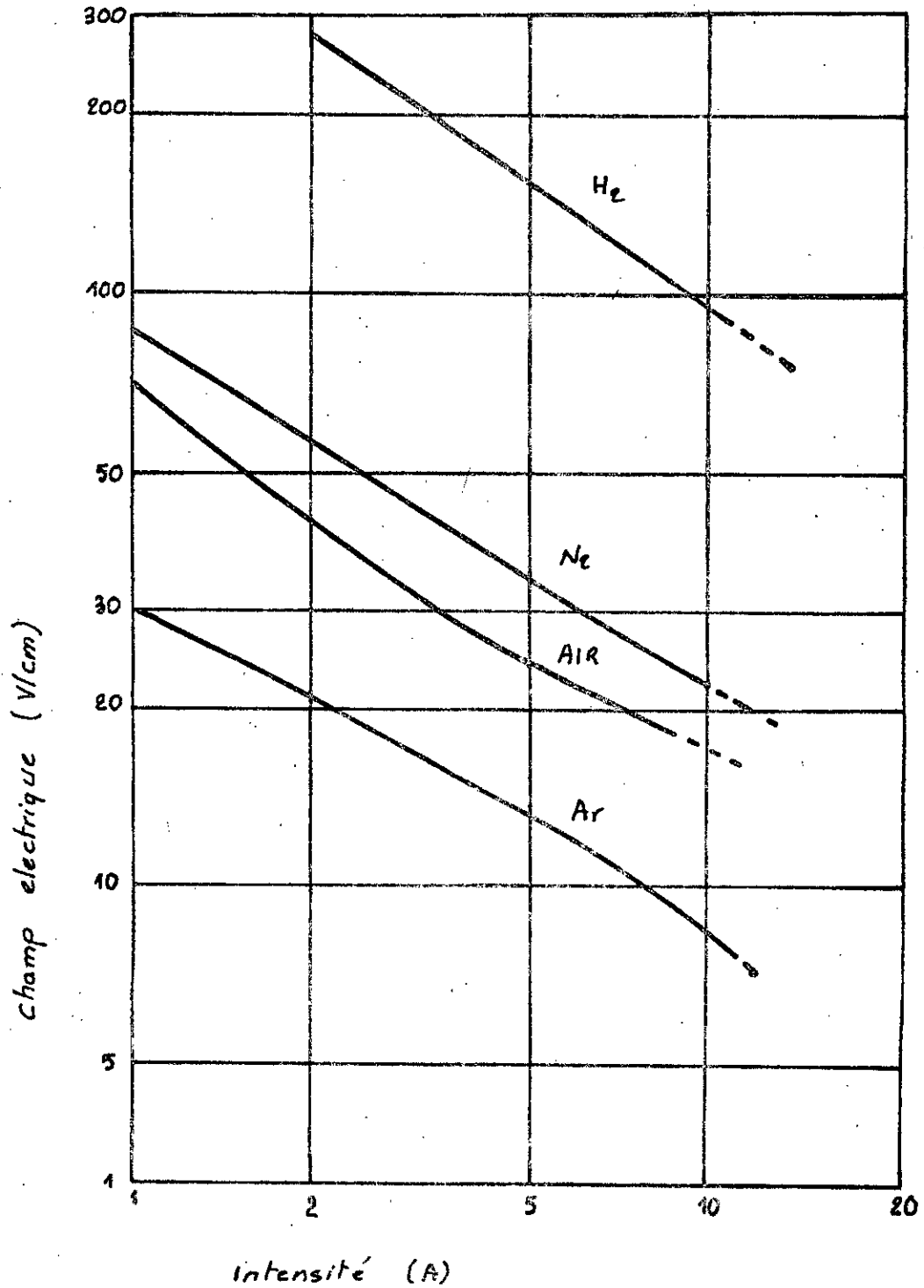
Le choix devra donc être orienté vers un gaz qui tire profit des deux avantages (entretien et chaleur). Dans notre cas, l'azote et l'air répondent à ce critère,

4.2.4. Prix des gaz

Le dernier (et important) critère de comparaison sera le prix des gaz. Les prix qui suivent nous ont été fournis par la Société Nationale de Sidérurgie (S.N.S.) unité "gaz industriels" (avenue de l'ALN).

Il faut signaler (selon la même source) que l'azote, l'argon et l'hydrogène sont importés.

Fig 7 Champ électrique nécessaire pour l'entretien de l'arc suivant la nature du gaz [5]



Gaz	Prix du m ³ en DA
Argon	29,63
Azote	4,59
Hydrogène	6,38
Air comprimé	4,38

Tableau 2 : Prix du gaz

Le prix de l'air comprimé a été donné à titre indicatif. Il est beaucoup plus intéressant d'utiliser un compresseur. Le prix de l'électricité étant faible (0,30 DA le kWh) il reviendrait nettement moins cher.

4.3. Décision

Le tableau suivant résume schématiquement la comparaison des différents critères du choix du gaz.

Gaz	Conductivité thermique	Enthalpie	Potentiaels	Amorçage	Prix
Argon	faible	faible	faible	facile	élevé
Azote	moyenne	élevée	moyen	assez difficile	moyen
Air	moyenne	élevée	moyen	assez difficile	très bas
Hydrogène	élevée	élevée	très élevé	difficile	moyen

4.3.1. Hydrogène

L'hydrogène possède une enthalpie et une conductivité thermique élevées, mais il est difficile à amorcer. D'autre part, il nécessite de très hautes tensions. Ces deux inconvénients font que l'hydrogène n'est pas utilisé seul comme gaz plasmagène. Il n'est utilisé qu'en mélange avec d'autres gaz (Argon ou Azote).

4.3.2. L'Argon

L'Argon utilisé seul ne permet ni des vitesses de coupe particulièrement élevées, ni la coupe de fortes épaisseurs (généralement, il est utilisé pour des épaisseurs inférieures à 100 mm) ; à cause de sa faible enthalpie et de sa faible conductivité thermique. De plus il a contre lui son prix élevé.

Utilisé en mélange avec l'hydrogène, (de 20 à 40 %), l'Argon donne des vitesses plus élevées grâce à une enthalpie et à une conductibilité thermique plus élevées, mais il perd ses principaux avantages à savoir la facilité d'amorçage et les basses tensions requises.

4.3.3. L'Azote

L'Azote a une enthalpie élevée et une assez bonne conductibilité thermique. Les tensions requises bien que plus élevées que celles de l'argon sont raisonnables. Il permet la coupe de fortes épaisseurs à des vitesses élevées. De plus, il a l'avantage d'être moins cher que l'argon.

4.3.4. L'Air

L'air possède sensiblement les mêmes avantages et inconvénients que l'azote. Mais l'utilisation d'un compresseur permet d'avoir les débits d'air nécessaires à un prix très bas et élimine les frais de stockage et de livraison. La présence d'oxygène est un grand avantage, car elle permet des performances (en vitesses et en épaisseurs coupées) plus élevées que celles de l'azote grâce à la réaction fer -oxygène qui en découle dans le cas des aciers au carbone.

Le calcul qui suit nous donne une idée approximative (étant donné les hypothèses faites) sur l'amélioration des performances grâce à l'oxygène.

- La tolé coupée à une épaisseur de 6 mm
- Débit d'air : 6 m³/h.

Notre but est de calculer la quantité de métal qui fond grâce à la réaction fer-oxygène.

Les hypothèses sont les suivantes :

- toute la chaleur est utilisée pour le découpage du métal
- la réaction d'oxydation va jusqu'à Fe₂ O₃ (l'effet thermique de cette réaction est égal à 196 kcal/mole.)

a) Calcul de la quantité q d'oxygène contenue dans 6 dm³d'air:

Le pourcentage en volume d'oxygène de l'air est de 21 % ce qui nous donne

$$q = 6.021 = 1,260 \text{ m}^3 \text{ soit } 1260 \text{ l}$$

b) Calcul de la masse m d'oxygène

La masse volumique de l'oxygène étant $d = 1,429 \text{ g/l}$ nous aurons:

$$m = q .d = 1260.1,429 = 1800 \text{ g}$$

c) Calcul de la quantité Q de chaleur dégagée

La réaction donnant Fe_2O_3 dégage 196 kcal/mole, la quantité dégagée pour 1800 g d'oxygène sera de :

$$Q = \frac{196 \cdot 1800}{32} = 11025 \text{ kcal}$$

d) Calcul de la masse M de métal fondue par la réaction

pour fondre un gramme de métal, il faut fournir 300 calories d'où

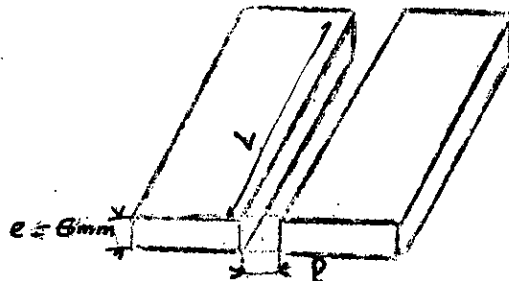
$$M = \frac{11025 \cdot 10^3}{300} = 36750 \text{ g}$$

e) Calcul du volume V de métal fondu

La masse volumique de l'acier étant de $7,8 \text{ g/cm}^3$, le volume de métal fondu sera :

$$V = \frac{M}{\rho} = \frac{36750}{7,8} = 4712 \text{ cm}^3$$

f) Calcul de la longueur coupée par la réaction d'oxydation (en une heure)



Supposons que la largeur de la saignée est de 4 mm la longueur coupée sera :

$$L = \frac{V}{l \cdot e} = \frac{4712}{0,4 \cdot 0,6} = 19633,33 \text{ cm}$$

soit environ $L = 196 \text{ m}$.

Comme nous l'avons déjà vu, la vitesse de coupe en plasma coupage à air pour une épaisseur de 6 mm est de 300 m/h, on voit que la réaction d'oxydation intervient pour une grande partie dans cette vitesse.

En effet, même si on ne prend que 60 % de cette valeur nous aurons

$$\frac{196 \cdot 0,6}{300} = 0,39$$

C'est à dire que la réaction fer-oxygène intervient pour 39 % dans la vitesse de coupe.

Ce calcul bien qu'approximatif nous conduit logiquement à considérer plus en détail l'utilisation d'un mélange Azote-Oxygène.

4.3.5. Mélange Azote-Oxygène

Le mélange Azote-Oxygène constitue un excellent gaz plasmagène. Puisqu'aux bonnes qualités de ces deux gaz, s'ajoute, dans le cas des métaux ferreux, la chaleur dégagée par la réaction fer-oxygène.

Le tableau suivant nous donne les performances de différents mélanges azote-oxygène pour une épaisseur coupée de 16 mm.

Tableau 3 : Influence de l'oxygène dans un mélange Azote-oxygène sur les paramètres de coupe
(11)

Gaz	Oxygène %	P/ Kw	V cm/s	débit de métal fondu cm ³ /s	effet calorifique d'oxydation cal/s
Axycoupage	100	-	0,472	1,15	2900
Azote	0	35	1,46	7,20	-
Air	21	27	2,9	11,0	3641
Azote-Oxygène	51,5	30	3,0	12,9	10128
"	78	25	3,2	15,0	16531
Oxygène	100	28	2,5	12,0	19146

Ce tableau montre que la vitesse maximale est obtenue pour un mélange contenant 78 % d'oxygène. Cependant la différence entre la vitesse maximale (3,2 cm/s) et la vitesse obtenue avec l'air (2,9 cm/s) qui est égale à 0,3 cm/s soit 10,8 m/h n'est pas assez importante pour justifier les dépenses supplémentaires que nécessite l'emploi d'un tel mélange.

4.3.6. Autres mélanges

Les mélanges hydrogène-Argon ; Azote-Argon avec un fort pourcentage d'azote et d'hydrogène et le mélange Argon-Azote Hydrogène donnent de bons résultats pour les métaux dont la conductibilité thermique est élevée et pour de fortes épaisseurs.

Cette brève étude des gaz et mélanges gazeux utilisés en plasmacoupage nous montre que l'air répond le mieux aux critères de comparaison sauf celui de l'amorçage. Mais ce problème est facilement résolu à l'aide d'une alimentation de tension plus élevée.

5. CHOIX DE L'ELECTRODE

L'électrode joue un rôle aussi important que celui du gaz Elle sert à transmettre le courant électrique à l'arc. Malgré les conditions difficiles dans laquelle elle travaille, elle doit avoir une durée de vie acceptable. Elle doit résister aux hautes températures, donc avoir un point de fusion élevé, et résister à l'usure qui en découle. L'usure des électrodes non fusibles est essentiellement due à la vaporisation du métal. Pour expliquer les phénomènes qui provoquent cette vaporisation dans le plasmacoupage, et justifier le choix de l'électrode, les deux définitions suivantes sont nécessaires.

5.1. Travail de sortie d'un électron

Un électron peut être arraché de la surface d'un solide. Quelle qu'en soit la cause, l'éjection d'un électron d'une surface solide nécessite une quantité d'énergie appelée "Travail de sortie" ou travail d'extraction. Le travail d'extraction W_E dépend de la nature de la couche superficielle du solide.

5.2. Emission thermo électronique

Un corps solide chauffé émet des électrons. Le courant thermoélectronique croît avec la température et tend vers une limite dite courant de saturation donné par la loi de Richardson (10).

$$i = AT^2 \exp\left(-\frac{B}{T}\right) \quad (1)$$

où T est la température absolue
A et B sont des constantes

L'expérience montre que A est la même pour presque tous les métaux et est égale à :

$$A = 60,2 \frac{A}{\text{cm}^2 \text{ } ^\circ\text{K}^2} \quad (10)$$

B dépend de la nature de la couche superficielle de la cathode elle est donnée par la formule suivante :

$$B = W_E \frac{e}{k} \quad (2)$$

où

W_E est le travail de sortie exprimé en électron-volt
e est la charge de l'électron
k est la constante de Boltzmann

La présence des gaz ne modifie pas l'émission thermo-électronique.

.../...

5.3. Température de la cathode

La durée de vie de la cathode sera d'autant plus grande que la température de travail sera basse. D'autre part, une température élevée favorise l'émission thermoélectronique qui est nécessaire pour atteindre le régime d'arc. La température de la cathode est essentiellement influencée par la chaleur cathodique qui est déterminée à partir de la relation suivante :

$$P_c = U_c \cdot I$$

où

U_c = chute cathodique (V)

I = courant (A)

Si l'intensité du courant est choisie, (en tenant compte des aspects technologiques), la chute cathodique par contre dépend de l'émission thermoélectronique. Tant que la cathode est froide, une chute de potentiel élevée au voisinage immédiat de la cathode est nécessaire pour l'entretien de la décharge. Quand la température augmente, l'émission thermoélectronique devient intense et la chute cathodique tombe à quelques volts (on atteint alors le régime d'arc). De ce point de vue, il est donc plus intéressant d'avoir des métaux ayant un pouvoir émissif élevé. Les formules (1) et (2) nous montrent qu'une même intensité de l'émission thermoélectronique peut être atteinte à plus basse température pour les métaux nécessitant un travail d'extraction plus faible.

5.4. Vaporisation de l'électrode

Comme il a été déjà écrit (page 29.) l'électrode s'use essentiellement par vaporisation.

La résistance d'un matériau à la vaporisation sera meilleure si la température et l'enthalpie de vaporisation sont élevées.

Toutes ces considérations nous conduisent au choix d'un métal aux caractéristiques suivantes :

- température de fusion élevée
- température et enthalpie de vaporisation élevées
- bon pouvoir émissif thermoélectronique

Les métaux qui répondent le mieux à ces critères sont les métaux réfractaires.

5.5. Choix du métal

5.5.1. Le tungstene

Le tungstene dont les principales propriétés sont les suivantes a été le métal le plus utilisé dans le plasmacoupage avec les gaz non oxydants.

- température de fusion t_f -----	3410 ° C
- température d'ébullition t_{eb} -----	5900 °
- enthalpie de vaporisation DH_f -----	8400 cal/mole
- enthalpie de vaporisation DH_v -----	176 000 cal/mole
- Travail de sortie W_E -----	4,31 ± 5,36 ev

Remarque :

Le travail de sortie n'est pas définit avec précision et ceci s'explique par le fait qu'il dépend de la couche superficielle du métal en question et que les moindres alterations de cette couche le modifient.

Plusieurs expériences pour l'emploi du tungstene avec les gaz oxydants ont été faites et ont donné lieu à une destruction prématurée des électrodes (4).

Ceci en raison de la formation à partir de 500°C d'oxydes de la forme WO_2 , WO_3 , W_2O_5 - qui sont très volatils.

WO_3 par exemple fond à une température de 1742°C.

Comme nous avons choisis l'air comme gaz plasmagène, l'utilisation du tungstene est à rejeter.

5.5.2. Le Zirconium et le Hafnium

A la suite de recherches effectuées aux U.S.A. et U.R.S.S., il s'est avéré que le Zirconium et le Hafnium donnent des résultats acceptables avec l'air.

Ceci peut s'expliquer par le fait que la combinaison du zirconium et du Hafnium avec l'air donne des produits qui répondent aux caractéristiques requises par l'électrode. C'est ce qui ressort de la brève étude suivante de ces deux éléments.

Le Zirconium est connu des chimistes depuis les études de KLAPORTH et VAUQUELIN faites à la fin du 18^è siècle. Mais le Zirconium métallique ne fut obtenu qu'en 1925 par VAN ARKEL.

A cette époque, le Hafnium n'était découvert que depuis seulement trois ans. Le Hafnium soupçonné à plusieurs reprises n'avait pas encore été isolé. Ceci est dû à la grande similitude des propriétés physiques et chimiques de ces deux corps (14).

1 Propriétés du Zirconium et du Hafnium

a. Variétés allotropiques (I4)

- Les deux corps ont deux formes allotropiques
- La forme A de structure hexagonale compacte stable jusqu'à 862°C pour le Zirconium et 1750°C pour le Hafnium.
 - La forme B de structure cubique centrée stable pour les températures supérieures.

b. Propriétés physiques :

métal	densité	t° de fusion °C	t° d'ébullition °C	travail de sortie w_D (ev)
Zirconium	6,5	1850 ± 10	3700°C	4,1
Hafnium	13,3	2222 ± 30	5400°C	3,53

Tableau 1 : Propriétés physiques de Zr et HF (I4)

2. Action de l'air

a- Sur le Zirconium

Une étude de l'action de l'air sur le Zirconium a été faite par HAYES et ROBERSON (I4).

Ils ont observé les phénomènes suivants :

- Au dessous de 600 °C, il y a formation d'une couche superficielle bleu-noir très adhérente.
- A plus hautes températures, il y a germination d'une deuxième couche qui recouvre entièrement la première après 24 h à 700 °C ; 4 h à 800°C et quelques minutes à 900 °C.
- La couche blanche externe ne renferme que de la Zircone (ZrO_2) qui est le seul oxyde stable du Zirconium.
- La couche interne noire renferme de la Zircone dans sa moitié externe, et des inclusions de nitrures (ZrN) dans sa moitié interne.

b) Sur le Hafnium

L'action de l'air sur le Hafnium est du même type que celle sur le Zirconium à la seule différence que d'une manière générale, on remarque une diminution de la vitesse de réaction aux hautes températures entre l'oxygène, l'azote et le métal quand on passe du Zirconium au Hafnium. Les phénomènes observés sont les suivants :

- A Température ambiante, le Hafnium est inaltérable à l'air. son attaque est encore faible à 750 °C.
- L'oxygène se dissout dans le Hafnium à haute température en formant le seul oxyde de Hafnium stable : HfO_2 .
- L'Azote réagit à haute température avec le Hafnium pour donner le nitrure de Hafnium HfN .

Etant donné que l'usure de l'électrode est essentiellement déterminée par sa couche superficielle, il est utile de connaître ses propriétés c'est à dire celles de la Zirconite et de l'oxyde de hafnium.

Substance	t° fusion °C	ΔH_f cal/mole	t° ébullition °C	ΔH_v cal/mole	W_E (ev)
Zr O ₂	2715	20800	4300	133.600	4,5 ÷ 5,8
Hf O ₂	2900 ± 15		5400	-	2,92 ÷ 3,2

tableau 2 : propriétés thermodynamiques de Zr O₂ et HfO₂ (I⁴)

Ce tableau montre que les températures de fusion et d'ébullition sont plus élevées pour HfO_2 que Zr O_2 (surtout la température d'ébullition)

- HfO_2 a un pouvoir émissif thermoelectronique nettement plus élevé que Zr O_2 .

Un autre facteur favorable à l'oxyde de Hafnium et qui n'apparaît pas sur ce tableau est la variation de volume au cours de la transformation qui est plus petit pour HfO_2 que Zr O_2 .

Le seul obstacle à l'utilisation du Hafnium est son prix plus élevé. Mais cela ne veut pas dire qu'une électrode en

Hafnium revient plus cher qu'une électrode en Zirconium.

En effet, la durée de vie d'une électrode en Hf est le double de celle en Zr et ce facteur a une grande influence sur le prix de revient. A titre d'exemple les prix pratiqués en URSS sont de 18 DA. Une électrode en Hf et 12 da pour celle en Zr (3 et 2 roubles) ceci nous montre que dans ces conditions l'utilisation du Hafnium est plus avantageuse.

Cependant les prix pratiqués en Algérie ne sont pas forcément les mêmes que ceux pratiqués en U.R.S.S., et n'ayant pas pu les avoir, nous laissons le choix ouvert entre le Zirconium et le Hafnium.

6. Différents types d'installations

Il existe dans l'industrie plusieurs types d'installations de plasmacoupage à air plus ou moins compliqués selon le mode de travail (manuel, automatique, semi-automatique). Notre but dans ce paragraphe n'est pas d'étudier toutes ces installations mais de citer quelques une avec leurs spécifications techniques pour avoir une idée sur les machines existantes et de leurs performances.

6.1. Machine YMP-20I pour plasmocoupage a air manuel

Cette machine est conçue pour le coupage manuel des aciers ordinaires, inoxydables, fortement alliés jusqu'à des épaisseurs de 40 mm ainsi que des métaux non ferreux et leurs alliages à une température ambiante entre - 40 et +40°C. Elle se compose d'une alimentation et un plasmatron.

La seule condition pour l'exploitation de cette machine est sa connexion à une source d'alimentation et à un circuit d'air comprimé.

Cette machine peut être substituée à un équipement d'oxycoupage manuel et assure une plus grande vitesse, aussi bien pour le coupage de tôles ou de formes compliquées.

Le coupage peut être effectué dans n'importe quelle position.

6.1.1. Spécifications

Alimentation principale -----	trois phases 50 Hz 380 ; 220 V
Courant de fonctionnement-----	200I
Cycle de fonctionnement-----	100 %
Puissance apparente-----	36 kva
Tension à vide-----	180 V
Gamme de courant de travail-----	150 ÷ 250 A
Gaz Plasmagene-----	Air
Pression d'air-----	$3,5 \cdot 10^5 \div 4,5 \cdot 10^5$ 1a
Débit d'air-----	14 l/s (50m ³ /h)
Refroidissement du Plasmatron-----	circulation forcée d'air
Dimensions-----	1150 x690 x950 mm
Masse-----	450 kg

6.2. Machine AMP-402

La machine AMP-402 est conçue pour le plasmacoupage à air des métaux ferreux et non ferreux ainsi que leurs alliages. L'épaisseur maximum coupée est de 160 mm pour l'acier. Les opérations suivantes peuvent être exécutées.

- Coupage de tôles
- Coupage de tubes
- chanfreinage jusqu'à des dangles de 45 °

Cette machine est constituée d'une armoire dans laquelle se trouvent la source d'alimentation et tout l'appareillage électrique, et d'un plasmatron.

Le plasmatron peut être monté sur une machine pour oxycoupage ou n'importe quel équipement capable de donner un mouvement continu au plasmatron avec la vitesse voulue.

6.2.1. Spécifications

Alimentation principale-----	trois phases 50 H ₂ 380 ; 400 ; 415V trois phases 60 H ₂ 380 ; 440 V
Courant de fonctionnement-----	400 A
Tension à vide -----	300 V
Tension d'arc -----	250 V
Gamme de courant-----	150 ÷ 450 A
Gaz plasmagène-----	Air ÷
Pression d'air-----	4.10 ⁵ 1a
Débit d'air-----	0,42 ÷ 1,12 l/s (1,5 ÷ 8,0 m ³ /h)
Refroidissement du plasmatron -----	Air
Pression d'eau -----	supérieure à 1,5.10 ⁵ 1a
Débit d'eau -----	supérieure à 0,3 m ³ /h
Dimensions-----	850x1124x1800 mm
Masse-----	1000 kg

6.2.2. Vitesses optimales de coupe à 400 A (m/min)

Métal	é p a i s s e u r s , mm								
	5	10	20	30	40	50	80	100	160
Acier	6,0	4,9	2,5	1,56	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05
Cu	5,0	3,0	1,6	0,7	0,6	0,3	0,1	0,05	-
Al.	10,0	7,2	4,0	2,5	1,6	0,7	0,5	0,2	0,1

.../...

6.3. Machine AMP-403

Cette machine est conçue pour le coupage automatique et semi-automatique des métaux ferreux et non ferreux. La capacité maximale en coupage automatique de l'acier est de 100 mm et 80 mm en semi automatique.

La source d'alimentation et l'appareillage électrique sont regroupés dans la même armoire.

Cette machine possède deux plasmatrone l'un pour le coupage automatique et l'autre pour le coupage semi-automatique.

Sous le mode automatique, le plasmatron peut être monté sur une machine pour oxycoupage ou n'importe quel autre équipement capable de le déplacer régulièrement avec la vitesse désirée. Les opérations suivantes peuvent être exécutées avec une excellente finition.

- coupage de tôles
- coupage de tubes
- chanfeinage jusqu'à des angles de 45°

Le mode semi-automatique est utilisé pour le coupage avec une précision moins grande ainsi que pour la correction des soudures et le tronçonnage des masselotes.

6.3.1. Spécifications

Alimentation principale -----	3 phases 50 H ₂ 380, 400, 415V 3 phases 60 H ₂ 380, 440 V
Courant de fonctionnement-----	400 A
Cycle de fonctionnement -----	100 %
tension à vide -----	300/180 V
Tension d'arc-----	200/120 V
Gamme de courant-----	150 ÷ 400 A
Gaz plasmagène-----	Air
Pression d'air-----	$1,3 \cdot 10^5 \div 6 \cdot 10^5$ la
Débit d'air-----	$4,0 \div 10,0$ m ³ /h
Refroidissement du plasmatron -----	eau
Refroidissement de l'alimentation ----	cuv
Pression d'eau -----	supérieure à $1,5 \cdot 10^5$ la
Débit d'eau-----	Supérieure à 0,24m ³ /h
Dimensions-----	874 x 910 x 1710 mm
Masse-----	1500 kg

6.3.2. Vitesses optimales de coupe à 400 A (m/min).

Métal	E p a i s s e u r e s mm									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Acier	4,9	2,5	1,56	0,8	0,6	0,4	0,3	0,2	0,13	0,10
Cu	3,0	1,6	0,7	0,5	0,4	0,3	0,15	0,1	-	-
Al.	7,2	4,0	2,5	1,6	0,9	0,7	0,5	0,5	0,27	0,10

Tout ce qui précède a été extrait un prospectus intitulé
"MACHINES FOR AIR PLASMA CUTTING"

Notons pour terminer que pour les très grandes séries,
l'utilisation de machines à commande numérique.

Pour notre part, nous préférons faire l'étude d'une
installation qui peut être éventuellement réalisée par des
étudiants à l'E.N.P.A.

CHAPITRE III

INTRODUCTION

Nous tenons à préciser que dans cette partie, nous ne donnerons qu'une description explicative de l'installation. Nous donnerons les caractéristiques essentielles. Les caractéristiques spécifiques à une partie donnée de l'installation pourront être déterminées avec précision en cas de réalisation étant donné qu'elles dépendent généralement du matériel utilisé. Par exemple, la source d'alimentation est déterminée par les diodes utilisées et leurs caractéristiques qui sont données par le fabricant.

1. CARACTERISTIQUES TECHNIQUES

- tension à vide	300 V
- tension de travail	100 à 250 v
- intensité de courant.....	100 à 400 A
- gaz plasmagène.....	Air
- débit d'air.....	6 à 15 m ³ /h
- pression d'air.....	6. 10 ⁵ Pa
- refroidissement du plasmatron.....	Eau

2. CONSTITUTION GENERALE

L'installation est constitué des organes suivants :

- a. Un interrupteur général
- b. Une source d'alimentation
- c. Une armoire d'appareillage
- d. Une résistance active
- e. Deux rotamètre
- f. Un plasmatron
- g. Un dispositif de déplacement du plasmatron
- h. Un compresseur
- i. Un système de ventilation par aspiration
- j. Une table

3. ROLE DE CHAQUE ORGANES

3.1. L'interrupteur

L'interrupteur sert à brancher la source d'alimentation à un circuit électrique triphasé (380 V)

3.2. La source d'alimentation

Le courant fournit par le réseau électrique est alternatif or nous avons besoin d'un courant continu. Le rôle de la source d'alimentation consiste à redresser ce courant et fournir un courant continu.

3.3. L'armoire d'appareillage

L'installation électrique est constitué d'un grand nombre d'appareils (Relais, interrupteurs, oscilateur....) il est nécessaire de les regrouper dans une armoire.

3.4 La résistance active.

La résistance active a un double rôle :

- a. créer une caractéristique externe descendante
- b. permettre le réglage de l'intensité du courant

3.5. Rotamètres

Les débits de l'eau de refroidissement et du gaz plasmagène doivent être déterminés avec précision. Ceci se fera grâce à deux rotamètres. L'un placé sur le circuit d'eau, l'autre sur le circuit d'air.

3.6. Le compresseur.

Le compresseur fournit l'air au plasmatron à une pression de 6 bars (les débits étant de 0 à 15 m³/h).

3.7. Le plasmatron

Le plasmatron est la pièce maîtresse de l'installation. C'est grâce à lui que la création de l'arc plasma nécessaire au coupage de pièces est possible. Son rôle est aussi important que celui du chalumeau-coupeur dans une installation d'oxycoupage.

3.8 Dispositif de déplacement du plasmatron

L'utilisation d'un dispositif de déplacement du plasmatron est rendue nécessaire par deux facteurs :

- les vitesses de coupe élevées
- La sécurité de l'ouvrier (les vitesses étant élevées).

3.9. Système de ventilation

Lors du plasma coupage, le matériau est fondu sous l'action du jet de plasma à haute température, partiellement vaporisé et éjecté de la saignée du fait de l'énergie cinétique du jet.

Au cours de ce processus, il se dégage des gaz et fumées qui dans la mesure où les concentrations dans les zones respiratoires dépassent certaines valeurs limitées, peuvent provoquer une altération de l'état de santé.

De ce fait, un système de ventilation est nécessaire surtout dans un milieu renfermé : Dans la littérature et les notices techniques des fabricants de matériels de coupage au jet de plasma, un taux d'évacuation de 1 à 1,2 m³ par m² de surface de table de coupage ou une vitesse d'écoulement d'air d'au moins 1 m/s est considéré comme satisfaisante.

4. INSTALLATION ELECTRIQUE

a) Problèmes à résoudre

Pour l'élaboration de l'installation électrique, nous avons à résoudre les problèmes suivants :

1. création de l'intension nécessaire à l'arc et mise en marche de la source d'alimentation
2. création d'une caractéristique avec une forme convenable et possibilité de réglage de l'intensité du courant.
3. condition d'allumage de l'arc
4. mise en marche du chariot
5. Protection du plasmatron contre d'éventuelles pannes dans les circuit d'eau et d'air
6. mesure de la tension et de l'intensité du courant
7. Protection du bloc diodes contre les hautes fréquences
8. Possibilité de réglage de l'oscillateur sans brancher le circuit de commande.
9. Protection contre les surcharges
10. mise en marche du circuit de commande.

b) Notations

Notation	Signification
REX	Relais numéro X.
Y. REX	Contact numéro Y dirigé par le relai X
C	Contact
B.P.	Bouton poussoir
RM.X	Relais "maxima" numéro X.
Y.RM.X	Contact numéro Y dirigé par RMX
M.F	Oscilateur
Rh	Rhéostat
R	Résistance
L	Self
C	Condensateur
V	Volmètre
A	Ampéremetre
Sh	Schunt

4.1. Création de la tension nécessaire à l'arc et mise en marche de la source d'alimentation

La valeur de la tension de l'arc est déterminée par l'épaisseur à couper. Dans l'industrie, les épaisseurs généralement coupées vont jusqu'à 80 mm. La tension est de 300 V (Les épaisseurs

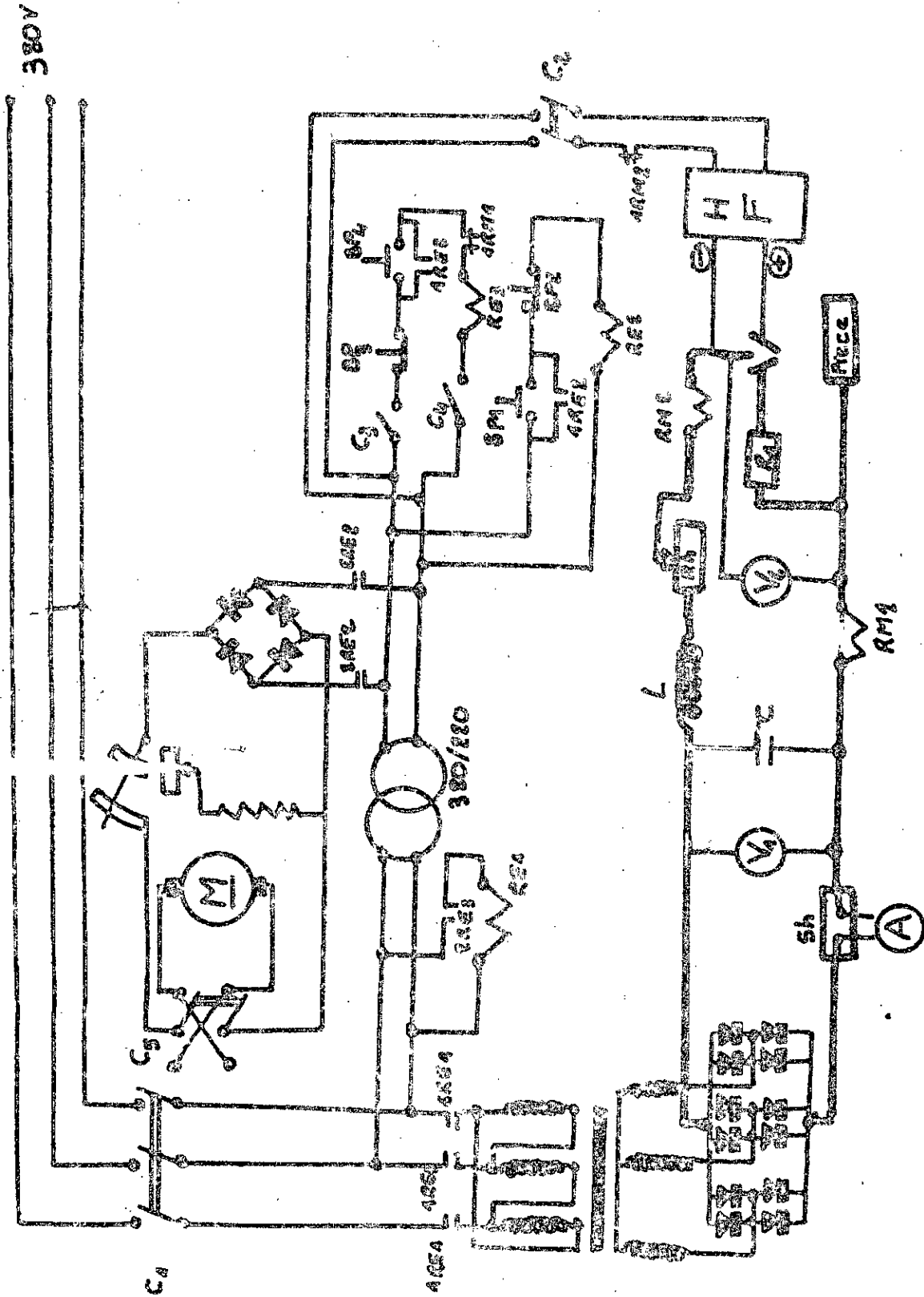


Fig 1: Schéma électrique de l'installation

plus élevées peuvent être coupées avec cette tension mais la vitesse de coupe diminuera de même que la qualité de coupe)

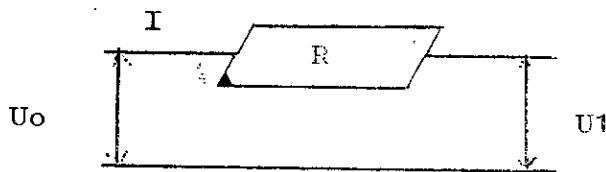
La source d'alimentation sera constituée d'un transformateur triphasé et d'un redresseur composé d'un bloc de diodes au silicium.

La mise en marche de la source d'alimentation se fait à l'aide du contact 1.RE.1 dirigé par le relais RE1.

4.2 Création d'une caractéristique convenable et réglage de l'intensité du courant.

La caractéristique externe de la source d'alimentation est horizontale (U_{acte}), or nous avons besoin d'une caractéristique descendante. Ce problème peut être résolu à l'aide d'une résistance.

En effet, considérons le circuit suivant :



En négligeant la résistance des conducteurs, nous aurons :

$$U_0 = RI + U_1 = U_0 - U_1 = RI$$

C'est à dire que la présence de la résistance dans le circuit provoque une chute de tension proportionnelle au courant. De plus, si cette résistance varie d'une valeur minimale R_m à une valeur maximale R_M , la chute de tension variera dans le même sens et la caractéristique externe de la source d'alimentation balayera un secteur d'angle α . Ceci permettra, bien que la caractéristique statique de l'arc soit constante pour une longueur donnée de l'arc, de faire varier le courant dans un intervalle (I_m, I_M).

C'est ce que nous montre la figure suivante :

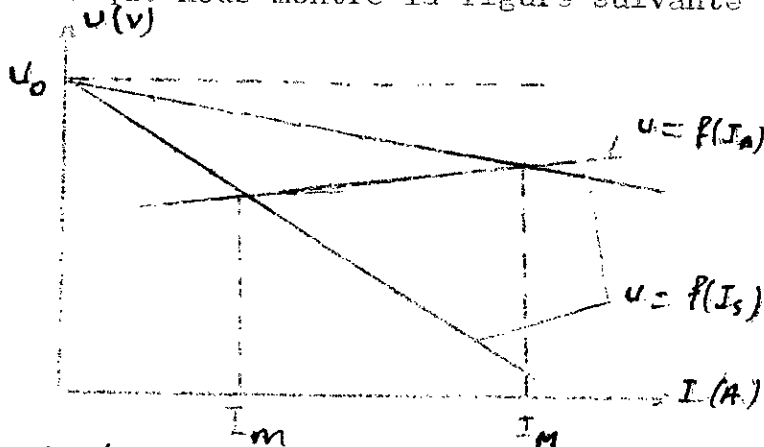


Fig : 1 réglage du courant.

Nous utiliserons donc pour la résolution de ce problème un Rhéostat Rb.

4.3. Conditions d'allumage de l'arc

4.3.1. Arc d'amorçage

La solution qui consiste à mettre les électrodes en court circuit est à éviter pour l'amorçage de l'arc. En effet, elle entraîne nécessairement la création de points d'accrochage préférentiels dans la tuyère détruisant la symétrie de l'arc et de l'écoulement ce qui conduit à une usure rapide des électrodes.

C'est pourquoi on préfère utiliser un circuit à haute fréquence. Ce qui permet la création de l'arc entre l'électrode et la tuyère distants d'environ 2 mm.

Pour cela nous avons besoins d'un oscilateur dont les caractéristiques essentielles sont :

- tension : 5000 V
- fréquence : 500 KH2.

4.3.2. Arc de travail.

Pour pouvoir couper la pièce, il faut lui transférer l'arc. Ceci se fait grâce à la résistance R.

L'arc jaillit entre la cathode et la buse qui forme provisoirement l'anode du circuit. Le gaz qui sort de la buse est ionisé sur une longueur d'environ 10 à 15 mm comme la distance entre la pièce et le plasmatron est environ de 8 mm, cette "langue" de gaz ionisé est en contact avec la pièce, le courant suivant le chemin de moindre résistance, passera par la pièce qui devient ainsi l'anode du système.

4.4. Déplacement du plasmatron.

Le plasmatron doit être déplacé de manière continue et on doit avoir la possibilité de régler la vitesse dans une gamme de 20 à 400 m/h. Pour cela, on utilise un moteur à courant continu. Le courant étant redressé.

Le réglage de la vitesse se fera à l'aide du rhéostat R_d. Pour pouvoir travailler dans les deux sens, on utilise un inverseur de marche C 5 qui permettra d'inverser la polarité selon qu'on travail dans un sens ou dans l'autre.

La mise en marche du moteur doit être séparée du circuit de commande car le plasmatron ne doit pas être déplacé dès l'amorçage de l'arc, mais seulement à partir du moment où le métal est coupé sur toute son épaisseur au point de départ.

La mise sous tension se fait à l'aide du bouton poussoir BP: 1 qui, alimente le relais RE2, lequel commande les contacts 1 RE2 et 2 RE2.

4.5. Protection du plasmatron

le plasmatron doit être protégé contre le manque d'eau et de gaz. Si cette condition n'est pas remplie, cela entraînerait la destruction du plasmatron par un échauffement excessif (en cas de manque d'eau) et l'impossibilité de transférer l'arc (manque d'air) pour éviter ces deux incidents, nous avons besoin de deux contacts. L'un (C3) relié au circuit d'eau, l'autre (C4) relié au circuit d'air et disposés de telle sorte que la mise sous tension de la source d'alimentation soit impossible si l'un des deux contacts est ouvert,

4.6. Mesure de la tension et de l'intensité.

La mesure de la tension nécessite deux voltmètres, l'un (V) branche aux bornes du redresseur pour contrôler la tension à V1 de l'autre (V2) pour la tension de travail. L'intensité dit courant mesurée par un ampèremètre (A) branché en parallèle, d'où la nécessité d'utiliser un shunt Sh.

4.7. Protection du bloc des diodes contre les hautes fréquences.

Il est nécessaire de protéger le bloc des diodes contre les hautes fréquences, d'où la nécessité de créer un passage obligatoire aux courants à haute fréquence. ceci se fait à l'aide d'une capacité C et d'une self dite de choc placées en série.

4.8 Possibilité de réglage de l'oscillateur sans branche le circuit de commande.

Pour pouvoir faire le réglage de l'oscillateur sans brancher le circuit de commande, il doit être branché en amont de ce dernier l'alimentation se fait à l'aide de l'interrupteur C2 l'utilisation de l'oscillateur n'étant pas nécessaire en court de travail, il est automatiquement déconnecté grâce au contact 1 RM2 dirigé par le relais "maxima" RM1.

4.9. Protection contre les surcharges.

Des surcharges peuvent se produire au court du travail et peuvent entraîner la détérioration de l'installation. Pour palier à ce risque, on prévoit un "relais maxima" RM 1 qui commande le contact 1 RE1 lequel en s'ouvrant coupe l'alimentation du circuit de commande.

4.10. Mise en marche et arrêt du circuit de commande.

La mise en marche du circuit de commande se fait par le bouton poussoir BP 4 et l'arrêt par ER3 l'alimentation et l'arrêt général se font à l'aide de l'interruption G1.

5. LE PLASMATRON.

Tous les plasmatrons sont proches les uns des autres en ce qui concerne leur principe et ne diffèrent que par quelques détails en fonction de leur utilisation spécifique. Ils comportent deux parties électriquement isolées.

Le plasmatron que nous proposons se compose de deux parties: l'une centrale reliée à la borne négative de l'alimentation, l'autre extérieure et reliée à la borne positive.

Ces deux parties sont séparées par un isolant (20) rendu solidaire de la partie extérieure par l'écrou (19) et la rondelle (18) coupée en deux pour permettre le montage

5.1. La partie centrale

La partie centrale se compose des éléments suivants :

- a) l'électrode
- b) le porte électrode (6)
- c) la vis de fixation (1)

5.1.1. L'Electrode

L'électrode est constitué d'une cathode en hafnium ou en zirconium (17) sertie dans une douille en cuivre (16). Le rôle et l'importance de l'électrode ont été assez détaillés dans la deuxième partie de notre étude pour qu'on s'y attarde ici.

5.1.2. Le porte électrode

Le porte électrode a plusieurs buts :

- a) recevoir l'électrode. La liaison étant assurée par un ajustement conique.
- b) amener le gaz plasmagène à la "chambre d'ionisation" et assurer sa répartition homogène grâce à une vis à trois filets carrés sur sa partie inférieure.

Il est à noter que cette injection hélicoïdale du gaz assure la stabilité de l'arc. :

- c) permettre le refroidissement de l'électrode grâce au tube d'amenée d'eau (23)
- d) relier le plasmatron à la vis de fixation grâce à l'écrou (5) se vissant sur sa partie supérieure.

5.1.3. La vis de fixation.

La vis de fixation sert à relier le plasmatron au support (25) munit de deux brides (26) en vue de son montage sur le dispositif d'entraînement, et recevoir la borne de l'alimentation.

D'autre part, elle est percée sur toute sa longueur pour permettre le passage de l'eau de refroidissement. Sa partie supérieure est usinée de manière à recevoir le tuyau amenant cette eau.

5.2. Partie extérieure

Cette partie se compose d'un corps et d'une buse.

5.2.1. Corps (13)

Le corps est munit des éléments suivants :

- a. un raccord pour l'arrivée de gaz (29) vissé dans un trou débouchant sur l'isolant l'étanchéité est assurée par un filetage "gaz".
- b. un raccord d'arrivée d'eau (11) et un autre pour son évacuation (11). Tous les deux sont vissés dans des trous débouchants sur une chambre circulaire.
- c. Une vis (27) destinée à fixer la borne positive du circuit électrique.

5.2.2 La buse (15)

La buse sert de "chambre d'ionisation du gaz. Sa forme doit être telle qu'elle crée un étranglement mécanique de l'arc et donner une grande vitesse au gaz éjecté.

Elle joue le rôle d'anode au cours de l'amorçage de l'arc.

Salaisson avec le corps du plasma-tron est obtenue grâce à la buse extérieure (14).

5.3. Fonctionnement

5.3.1 Amorçage de l'arc

Pour pouvoir amorcer l'arc, la distance entre l'électrode et l'anode doit être de un à deux millimètres. Le réglage de cette distance est obtenue grâce à un système vis-écrou. Le rôle de la vis est tenu par le porte électrode. L'écrou (2) est immobilisé en translation vis à vis de l'isolant par deux vis (9) se logeant dans une rainure usinée sur sa périphérie. Cette solution est possible grâce à la bague (21).

5.3.2. - circuit de refroidissement

Le circuit de refroidissement est le suivant :

L'eau pénètre par la vis de fixation qui est reliée à la distribution par un tuyau, puis par le tube d'amenée d'eau et entre en contact direct avec l'électrode. Elle ressort du porte électrode par le raccord (7) et est ramené vers le corps par un tuyau (8) puis pénètre dans une chambre circulaire se trouvant dans le corps et prévue pour le refroidissement de l'anode et ressort par le raccord d'évacuation.

5.3.3 Circuit du gaz plasmagène.

Le gaz pénètre par le raccord (29) relié au compresseur, traverse l'isolant grâce à huit percages repartis sur sa périphérie, puis est amené à la "chambre d'ionisation" grâce à la vis à trois filets carrés se trouvant à l'extrémité du porte électrode.

-----ooOoo-----

6. LE DISPOSITIF DE DEPLACEMENT DU PLASMATRON

En vue d'améliorer les performances de la machine, nous avons opté, pour un dispositif reproducteur automatique.

6.1. Constitution

En plus du moteur (11) et du réducteur (12), le dispositif de déplacement comprend les éléments suivants :

- un support mobile munit de deux articulations cylindriques (9)
- un support orientable (10)
- un axe d'entraînement moleté sur sa partie supérieure (14)
- une bobine (13)
- un support fixe (8)

6.2. Fonctionnement

Sur le support mobile sont montés le plasmatron muni d'une tige pour permettre son positionnement en hauteur en fonction de l'épaisseur de la pièce, de même que le moteur et le réducteur qui transmet un mouvement de rotation à l'axe d'entraînement.

L'axe d'entraînement étant aimanté par la bobine prévue à cet effet, il sera plaqué contre le modèle de la pièce à découper qui, lui est monté sur le support orientable et suivra son profil. La combinaison entre la position du support orientable et des mouvements permis par les deux articulations cylindriques du support mobile permettant partiquement la reproduction de toutes les figures géométriques dans le plan horizontal.

Il faut cependant prendre deux précautions :

- le modèle doit être magnétique (une tôle en acier par exemple)
- l'axe du plasmatron doit être confondu avec celui de l'axe d'entraînement afin de permettre une reproduction exacte du modèle.

Tout ce dispositif est monté sur un support fixe

Remarque :

Tout le dispositif de déplacement du plasmatron (y compris le support fixe) peut être monté sur un chariot ce qui permettra le découpage de tôles de grandes dimensions.

CHAPITRE IV

1 - INTRODUCTION

Les performances du procédé dépendent de la durée de vie de la cathode c'est à dire son usure. L'usure de la cathode dans le cas d'un arc électrique est un phénomène peu étudié à cause de l'impossibilité de mesurer directement les paramètres de fonctionnement (température, surface de la tache cathodique etc ...). C'est la raison pour laquelle on recherche une relation entre l'intensité de l'usure et les conditions de service.

Les expériences classiques d'étude de l'influence d'un ou plusieurs facteurs (paramètres d'entrée) sur un autre facteur (paramètre de sortie) sont basées sur le fait qu'on ne fait varier qu'un seul paramètre, les autres

L'inconvénient essentiel de cette méthode est que les résultats obtenus ne sont valables que pour une seule combinaison des paramètres d'entrée (sauf le paramètre variable).

Tout changement de la valeur d'un des paramètres constants donne des résultats erronés.

A la fin des années vingt, du 20^è siècle, RONALD FISHER proposa une planification d'expérience à la base de la statistique mathématique.

A partir de cette idée, une méthode de planification et de réalisation d'expérience intitulée " EXPERIENCE A PLUSIEURS VARIABLES " a été établie.

Cette méthode permet d'obtenir des résultats fiables dans le domaine de variation de tous les paramètres d'entrée.

2 - PRESENTATION DE LA METHODE

Brièvement, la méthode consiste en ce qui suit :

- 2.1. On doit déterminer l'intervalle de variation autour d'une valeur moyenne de chaque paramètre d'entrée.
- 2.2. - Quant un paramètre prend la valeur minimum, il est noté du signe - ; et d'un signe + lorsqu'il prend la valeur maximale.
 - Le produit de deux paramètres est pris comme le produit algébrique des deux paramètres en question.
- 2.3. - Pour chaque variante, (c'est à dire pour chaque combinaison des paramètres d'entrée), on fait plusieurs mesures (expériences) du paramètre de sortie.
 - Pour éviter l'influence des erreurs systématiques, on doit mener les expériences dans la séquence aléatoire (on utilise pour cela le tableau des nombres au hasard).

.../...

2.4. Les résultats des différentes expériences sont mis dans un tableau appelé " Matrice de Planification ".

Considérons par exemple qu'on ait deux paramètres d'entrée (X1 et X2) et qu'on ait fait trois mesures (Y1, Y2 et Y3) pour chaque variante. La matrice de planification aura la forme suivante :

Paramètres	x ₀	x ₁	x ₂	x _{1,2}	Résultats			
					y ₁	y ₂	y ₃	\bar{y}
Valeur moyenne								
Intervalle								
Valeur maxi (+)								
Valeur mini (-)								
Variantes	i	+	-	-	+			\bar{y}_i
	a	+	+	-	-			\bar{y}_a
	b	+	-	+	-			\bar{y}_b
	ab	+	+	+	+			\bar{y}_{ab}
Coefficients de la regression	b ₀	b ₁	b ₂	b _{1,2}				

Remarque : Toutes les valeurs sont centrées et réduites.

2.5. On se donne un modèle de regression pour l'expérience, par exemple $y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2$

3- TRAITEMENT DES MESURES (RÉSULTATS)

3.1. Calcul des dispersions

On doit calculer la dispersion S² pour chaque variante

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}$$

avec
$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$$

3.2. Vérification de l'homogénéité des dispersions

On vérifie que les dispersions sont homogènes à l'aide du critère de KOHREN. Pour cela, on calcule l'expression suivante :

$$G = \frac{S^2_{\max}}{\sum_{i=1}^K S^2_i}$$

avec N = nombre de variantes.

Les dispersions sont homogènes si la valeur calculée (G_c) est inférieure à celle donnée par le tableau du critère de FISHER (G_t).

3.3. Détermination des coefficients de la regression.

a) On calcule chaque coefficient en faisant la moyenne algébrique des \bar{y} en prenant les Δ de la colonne verticale correspondant au coefficient recherché.

Exemple : soit à calculer b_2

$$b_2 = \frac{-y_1 - y_a + y_b + y_{ab}}{4}$$

b) On vérifie si ces coefficients sont significatifs. Pour cela, on calcule l'intervalle de confiance Δb_j

$$\Delta b_j = + t \cdot S_{b_j}$$

où t est la variable de student

S_{b_j} étant donné par la dispersion des coefficients de la regression :

$$S_{b_j}^2 = \frac{S^2(y)}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{g=i}^n (y_{ig} - \bar{y}_i)^2}{N(n-1)}$$

Tout coefficient supérieur à Δb_j est significatif.

3.4. Vérification de l'adéquation du modèle mathématique.

On doit vérifier si la forme de la regression (dans laquelle on ne conserve que les termes significatifs) donne des résultats justes.

Cette vérification se fera grace au critère de FISHER.

$$F = \frac{S^2_{ag}}{S^2(y)}$$

avec

$$S^2_{ag} = \frac{n \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_c)^2}{N - (k+1)}$$

.../...

k = nombre de paramètres significatifs (le terme constant non compris)

y = valeur du paramètre de sortie calculée à l'aide de l'équation obtenue en remplaçant le paramètre d'entrée par sa valeur (c'est à dire + 1 ou - 1).

Si la valeur calculée de F est supérieure à celle donnée par le tableau, l'équation obtenue donne des résultats corrects.

Les éventuelles différences avec l'expérience sont accidentelles et non pas dues à un mauvais choix du modèle mathématique.

4 - APPLICATION A L'USURE DE LA CATHODE

Nous allons appliquer cette méthode pour connaître l'influence du débit d'eau de refroidissement, la température de l'eau et de l'intensité du courant (paramètres d'entrée) sur l'usure de la cathode (paramètre de sortie) dans les domaines de variations usuels.

Les expériences ont été faites en U. R. S. S. sur une électrode en HAFNIUM.

4.1. Données

- Débit (l/min) $x_1 = 3,5 + 1,5$
- Température (°C) $x_2 = 22,5 + 7,5$
- Intensité du courant (A) $x_3 = 225 \times 75$

L'usure de la cathode h sera donnée en mm/mm.

4.2. Matrice de planification :

La matrice de planification est la suivante :

PARAMETRES		x0	x1	x2	x3	x1x2	x1x3	x2x3	x1x2x3	h (10 ⁻² mm)			
			l/min	°C	A					h1	h2	h3	h
VALEUR MOYENNE			3,5	22,5	22,5								
INTERVALLE			1,5	7,5	7,5								
VALEUR MAX (+)			5	30	300								
VALEUR MINI (-)			2	15	150								
VARIANTES	1	+	-	-	-	+	+	+	-	2,7	2,9	1,6	2,4
	2	+	+	-	-	-	-	+	+	4,2	2,6	3,1	3,3
	3	+	-	+	-	-	+	-	+	2,1	1,3	3,2	2,2
	4	+	+	+	-	+	-	-	-	1,8	0,8	0,58	1,06
	5	+	-	-	+	+	-	-	+	4,4	3,3	3,5	3,7
	6	+	+	-	+	-	+	-	-	2,5	3,4	3,3	3,1
	7	+	-	+	+	-	-	+	-	3	3,4	3,4	3,2
	8	+	+	+	+	+	+	+	+	4,1	2,5	4,2	3,6
COEFFICIENTS DE LA REGRESSION			-0,0082	-0,0006	-0,0031	-0,0058	0,0013	0,0001	0,0031	0,0008			

1° / - Calcul des dispersions pour chaque variante :

1ère variante

$$S_1^2 = \frac{(2,7 - 2,4)^2 + (2,9 - 2,4)^2 + (1,6 - 2,4) \cdot 10}{3 - 1} = 0,49 \cdot 10^{-4}$$

de la même manière on obtient :

$$S_2^2 = 0,67 \cdot 10^{-4}$$

$$S_3^2 = 0,91 \cdot 10^{-4}$$

$$S_4^2 = 0,42 \cdot 10^{-4}$$

$$S_5^2 = 0,34 \cdot 10^{-4}$$

$$S_6^2 = 0,24 \cdot 10^{-4}$$

$$S_7^2 = 0,05 \cdot 10^{-4}$$

$$S_8^2 = 0,91 \cdot 10^{-4}$$

2° / - Calcul du critère de KOHREN

$$G_c = \frac{0,91 \cdot 10^{-4}}{(0,49 + 0,67 + 0,91 + 0,42 + 0,34 + 0,24 + 0,05 + 0,91) \cdot 10^{-4}}$$

$$G_c = 0,226$$

Le tableau donne $G_t = 0,516$

$G_t > G_c$ donc les dispersions sont homogènes.

3° / - Détermination des coefficients de la regression

$$h = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3$$

$$b_0 = \frac{(2,4 + 3,3 + 2,2 + 1,06 + 3,7 + 3,1 + 3,2 + 3,6) \cdot 10^{-2}}{8} = 0,0282$$

$$b_1 = \frac{(-2,4 + 3,3 - 2,2 + 1,06 - 3,7 + 3,1 + 3,2 + 3,6) \cdot 10^{-2}}{8} = -0,0006$$

.../...

- 54 -

$$b_2 = \frac{(-2,4 + 3,3 + 2,2 + 1,06 - 3,7 - 3,1 + 2,2 + 3,6) 10^{-2}}{8} = -0,0031$$

$$b_3 = \frac{(-2,4 - 3,3 - 2,2 - 1,06 + 3,7 + 3,1 + 2,2 + 3,6) 10^{-2}}{8} = +0,0058$$

$$b_{12} = \frac{(2,4 - 3,3 - 2,2 + 1,06 + 3,7 - 3,1 - 3,2 + 3,6) 10^{-2}}{8} = -0,0013$$

$$b_{13} = \frac{(2,4 - 3,3 + 2,2 - 1,06 + 3,7 + 3,1 - 3,2 + 3,6) 10^{-2}}{8} = +0,0001$$

$$b_{23} = \frac{(2,4 + 3,3 - 2,2 - 1,06 - 3,7 - 3,1 + 3,2 + 3,6) 10^{-2}}{8} = +0,0031$$

$$b_{123} = \frac{(-2,4 + 3,3 + 2,2 - 1,06 + 3,7 - 3,1 - 3,2 + 3,6) 10^{-2}}{8} = +0,0038$$

4° / - Détermination des coefficients significatifs

$$S_y^2 = \frac{(0,49 + 0,81 + 0,91 + 0,47 + 0,36 + 0,25 + 0,03 + 0,91) 10^{-4}}{8} = 0,5 \cdot 10^{-4}$$

$$S_{bj}^2 = \frac{0,5 \cdot 10^{-4}}{8} = 0,06 \cdot 10^{-4}$$

$$\Delta t_j = t \cdot S_{bj}$$

Le tableau de Student donne $t = 2,12$ soit :

$$\Delta b_j = 2,12 \sqrt{0,06 \cdot 10^{-4}} = 0,0051$$

En comparant les coefficients de la regression à cette valeur, on voit que seuls b_0 et b_3 lui sont supérieurs. Par conséquent les autres coefficients ne sont pas significatifs et peuvent être négligés.

L'équation donnant l'usure sera donc

$$h = 0,0282 + 0,0058 \cdot x_y$$

5° / Vérification de l'a equation du modèle mathématique

a) - Calcul des \hat{y}_i

$$\hat{y}_1 = \hat{y}_2 = \hat{y}_3 = \hat{y}_4 = 0,0282 + 0,0058 (-2) = 0,0224$$

$$\hat{y}_5 = \hat{y}_6 = \hat{y}_7 = \hat{y}_8 = 0,0282 + 0,0058 (+1) = 0,0340$$

.../...

b. Calcul du critère de FISCHER, F_t .

$$S_{ag}^2 = 3 \frac{[(0,024 - 0,0224)^2 + (0,033 - 0,0224)^2 + (0,022 - 0,0224)^2 + (0,0105 - 0,0224)^2] 10^{-4}}{8 - (1 + 1)} + 3 \frac{[(0,037 - 0,034)^2 + (0,031 - 0,034)^2 + (0,032 - 0,034)^2 + (0,036 - 0,034)^2] 10^{-4}}{8}$$

$$S_{ag}^2 = 1,4 \cdot 10^{-4}$$

$$F_c = \frac{S_{ag}^2}{S_y^2} = \frac{1,4 \cdot 10^{-4}}{0,5 \cdot 10^{-4}} = 2,80$$

Le tableau donne $F_t = 2,74$

Comme $F_t < F_c$, l'équation donne les résultats corrects de l'usure de la cathode dans les limites de variations des paramètres pour lesquels ces différents tests ont faits.

6°/ - Forme de l'équation donnant l'usure

Comme il a été signalé au début de ce chapitre, les calculs sont faits avec des variables centrées et réduites donc :

$$x_3 = \frac{I - 225}{75}$$

ce qui nous permet l'explicité l'équation donnant l'usure.

$$h = 0,0105 + 0,00000 I \text{ mm/min}$$

Remarque

Tous ces tests ont été faits avec un seul $\alpha = 0,05$ c'est à dire que nous pouvons être sûrs que 95 % des résultats sont justes, les 5 % restant peuvent être faux (mais ils ne sont pas forcément faux).

CHAPTER V

1. INTRODUCTION

Cette étude ne serait pas complète sans une partie traitant l'aspect technico-économique. Le côté économique a été à peine effleuré lors de l'argumentation du choix du plasmacoupage et des choix du gaz plasmagène et de l'électrode.

Mais le prix du gaz et les vitesses de coupe ne sont pas les seuls facteurs qui déterminent la rentabilité d'une installation. D'autres facteurs ont une grande influence sur la rentabilité (le prix de l'installation par exemple).

Malheureusement, nous n'avons pu avoir auprès des Sociétés Nationales ni les prix des différents constituants de la machine proposée (oscillateur, transformateur, compresseur), ni toutes les données nécessaires pour une étude approfondie. Ceci nous conduit aux deux précisions suivantes :

1°/ - Devant l'impossibilité de donner un prix (même approximatif) de l'installation proposée, l'étude de la rentabilité sera faite à travers un matériel français utilisé en Algérie (aussi bien pour le plasmacoupage que pour l'oxycoupage).

2°/ - Certains frais (ceux du stockage par exemple) ne seront pas pris en considération. Ceci n'aura pas de conséquences trop graves dans la mesure où ils influent de manière sensiblement identique sur les deux procédés.

Ce qui est intéressant c'est surtout la différence entre les rentabilités ; Donc seuls les facteurs les plus significatifs seront pris en considération.

2. PLAN DE L'ETUDE

L'oxycoupage des métaux non ferreux, des fontes, des aciers fortement alliés etc . . . n'étant pas possible, (sauf avec adjonction de poudres de fer), l'intérêt du plasmacoupage pour ces métaux est évident. Nous ne nous y efforcerons donc pas. Nous nous contenterons de donner les performances du plasmacoupage pour le cuivre et l'aluminium.

L'intérêt de cette partie se résume donc à une étude comparative de la rentabilité des deux procédés pour les aciers à **bas** et faiblement alliés.
carbone

Dans un premier stade nous considérerons le cas de l'utilisation d'un seul plasmatron et d'un seul chalumeau coupeur pour différentes épaisseurs ; ensuite nous considérerons le cas de plusieurs chalumeaux coupeurs et plusieurs plasmatrons.

.../...

3. PERFORMANCES DU PLASMACOUPAGE DU CUIVRE ET DE L'ALUMINIUM

e(mm) I(A)	Vitesses de Coupe Optimales (m/h)								
	10	20	30	40	50	60	70	80	100
200	180	97,2	50,4	36	25,2	6,12			
300	316	176,4	111,6	79,2	50,4	36	25,2	18	6,12
400	420,4	244,8	153	97	54	42,2	36	32,4	10,8

Tableau 1 : Plasmacoupage de l'aluminium [12]

e(mm) I(A)	Vitesses de Coupe Optimales (m/h)								
	10	20	30	40	50	60	70	80	100
200	66,4	50,4	10,8						
300	122,4	61,2	25,2	10,8	6,2				
400	180	97,2	39,6	36	15,2	10,0	10,0	6,12	3,24

Tableau 2 : Plasmacoupage de l'aluminium [12]

4. ACIERS A HAUT CARBONE : DONNEES DU PROBLEME

L'étude sera faite pour quatre épaisseurs.

e mm	OXYCOUPAGE			PLASMACOUPAGE	
	V(m/h)	débit oxygène c/m coupé	débit acétylène c/m coupé	V (m/h)	P (kw)
6	35	39	6	300	54
12	36	73	10	150	63
25	30	138	16	75	72
50	23	282	29	45	100

Tableau 3 : Données techniques [16] [3]

Eléments	Plasmacoupage		Oxycoupage	
	Prix DA	Unité	Prix DA	Unité
Installation	84.000	1	-	-
Dispositif d'entraînement	110.000	1	110.000	1
Electricité	0,30	KW/H	-	-
Eau	1	M3	-	-
Electrode	20	1	-	-
Acetylene	-	-	14,38	M3
Oxigene	-	-	4,69	M3
Ouvrier	12	1H	12	1H

Tableau 4 : données économiques

Les machines dont nous avons cités les prix sont :

- La Netrajet 200 pour le plasmacoupage. Cette installation peut utiliser différents gaz : Argon, Azote, Air, Argon + Azote + Hydrogene, Argon + Hydrogene, Azote + Hydrogene, Azote + Oxigene. Les électrodes sont soit en tungtene soit en Zirconium selon que le gaz est oxydant ou non.

- L'oxytome 15-20 pour le dispositif d'entraînement. Ce dispositif permet un travail de reproduction à partir d'un modèle. Ces prix nous ont été communiqués par SIDAL (Filliale SNS) sise place du 1er Mai à Alger.

5.5. CAS D'UN CHALUMEAU ET D'UN PLASMATRON.

Etant donné que les calculs sont identiques pour toutes les épaisseurs, nous ne les ferons en détail que pour une seule (6mm par exemple) et nous donneront les autres dans un tableau.

5.5.1. HYPHESSES

a) Pour chasue épaisseur, nous considérons que la coupe effective du métal se fait pendant 4 heures par jours et 5 jours par semaine.

b) - N'ayant pas pu avoir la durée normale de l'amortissement du matériel utilisée en Algérie, (elle serait de 10 ans), nous la fixons arbitrairement à 5 ans

5.2 Nombre d'heures de coupe effective par an : N

$$N = h \times J \times S \times M$$

avec h = nombre d'heures de coupe par jour

J = " de jours par semaine

S = " de semaines par mois

M = " de mois par an .

soit :

$$N = 4 \times 5 \times 4 \times 12 = 960 \text{ heures}$$

5.3 Longueur coupée annuellement : L

$$L = V \times N$$

avec V = Vitesse de coupe en m/h

1. Plasmacoupage

$$L_p = 300 \times 960 = 288\ 000 \text{ m}$$

2. Oxycoupage

$$L_o = 35 \times 960 = 34\ 560 \text{ m}$$

5.4 Coût du mètre coupé dû à l'installation : P₁

$$P_1 = \frac{P_{\text{inst}}}{L \times T}$$

ou

P_{inst} = prix de l'installation (D.F.)

T = durée d'amortissement (années)

/...

1 Plasmacoupage

$$P_{1p} = \frac{24000 + 110000}{200000 \times 5} = \boxed{0,135 \text{ DA}}$$

2 Oxycoupage

$$P_{2ox} = \frac{110000}{34560 \times 5} = \boxed{0,637 \text{ DA}}$$

5 5 Coût des autres facteurs

1 Plasmacoupage

a) Electricité

$$P_{2p} = \frac{F \times 0,3}{V}$$

ou F = Puissance électrique consommée
 V = Vitesse de coupe

soit $P_{2p} = \frac{54 \cdot 0,3}{300} = \boxed{0,054 \text{ EA}}$

b) Eau

$$P_{3p} = \frac{P_{H2O} \cdot Q_{H2O}}{V}$$

ou P_{H2O} = Prix du m³ d'eau

Q_{H2O} = Débit d'eau en M³/h

$$P_{3p} = \frac{1 \cdot 0,3}{300} = \boxed{0,001 \text{ DA}}$$

.../...

c) Electrode

$$P_{4p} = \frac{P_{el}}{V \times d}$$

ou P_{el} = Prix d'une electrode

d = Durée de vie d'une electrode en heures

soit

$$P_{4p} = \frac{20}{300 \times 3} = \boxed{0,022 \text{ DA}}$$

2. Oxycoupage

a) Acetylene

$$P_{20x} = P_{ac} \times Q_{ac}$$

P_{ac} = Prix d'un m³ d'acetylene

Q_{ac} = Débit d'acetylene par mètre coupé : (m³/m)

$$P_{20x} = 14,38 \times 6.10^{-3} = \boxed{0,086 \text{ DA}}$$

b) Oxygene

$$P_{30x} = P_0 \times Q_0$$

P_0 = Prix du m³ d'oxygene

Q_0 = Débit d'oxygene par mètre coupé

$$P_{30} = 4,69 \cdot 39.10^{-3} = \boxed{0,183 \text{ DA}}$$

Coût dû au salaire de l'ouvrier

$$P = \frac{S_{ouv}}{V}$$

S_{ouv} = Salaire horaire de l'ouvrier.

a) Plasmacoupage

$$P_{5p} = \frac{12}{300} = 0,04 \text{ DA}$$

b) Oxycoupage

$$P_{40x} = \frac{12}{36} = 0,333 \text{ DA}$$

5. 6. Coût total du mètre coupé

1. Plasmacoupage

$$P_P = P_{1p} + P_{2p} + P_{3p} + P_{4p} + P_{5p}$$
$$= 0,135 + 0,054 + 0,001 + 0,022 + 0,04 = 0,252 \text{ DA}$$

$$P_P = 0,252 \text{ DA}$$

2. Oxycoupage

$$P_{0x} = P_{10x} + P_{20x} + P_{30x} + P_{40x}$$
$$= 0,637 + 0,086 + 0,103 + 0,333 = 1,239 \text{ DA}$$

$$P_{0x} = 1,239 \text{ DA}$$

Avec les mêmes hypothèses, les résultats pour des épaisseurs de 12, 25 et 50mm sont :

5. 7. Longueur de métal coupée annuellement (m)

ÉPAISSEURS	12	25	50
PLASMA COUPAGE	144.000	72.000	43.200
GYCOUPAGE	34.560	26.800	20.160

5.8. Outres Résultats

Le tableau suivant donne les différents coûts intervenants dans le coût du metre coupé.

éléments	e (mm)	PRIX PLASMACOUPAGE (DA)				PRIX OXYCOUPAGE (DA)			
		6	12	25	50	6	12	25	50
Installation		0,135	0,269	0,539	0,895	0,637	0,637	0,764	1,091
Electricité		0,054	0,126	0,288	0,667	-	-	-	-
Eau		0,001	0,001	0,001	0,001	-	-	-	-
Electrode		0,22	0,044	0,089	0,222	-	-	-	-
Acetylene		-	-	-	-	0,086	0,143	0,230	0,417
Oxygene		-	-	-	-	0,183	0,333	0,682	1,792
Ouvrier		0,040	0,080	0,160	0,267	0,333	0,333	0,400	0,571
Coût Total		0,252	0,600	1,243	2,055	1,239	1,446	2,276	3,871

6. CAS DE 4 CHALUMEAUX ET 4 PLASMATRONS

6.1 Longueurs coupées annuellement (m)

Epaisseurs mm	PLASMACOUPAGE	OXYCOUPAGE
6	1.152.000	138.240
12	576.000	138.240
25	288.000	115.200
50	172.800	80.640

5.2. Coût du métal de métal coupé

Elements	Prix Plasmacoupage (DA)				Prix Oxycoupage (DA)			
	6	12	25	50	6	12	25	50
INSTALLATION	0,077	0,155	0,310	0,516	0,159	0,159	0,191	0,273
ELECTRICITE	0,054	0,126	0,288	0,637	-	-	-	-
EAU	0,001	0,001	0,001	0,001	-	-	-	-
ELECTRODE	0,022	0,044	0,089	0,222	-	-	-	-
ACETYLENE	-	-	-	-	0,086	0,143	0,230	0,417
OXYGENE	-	-	-	-	0,123	0,333	0,802	1,792
OUVRIER	0,040	0,080	0,160	0,267	0,333	0,333	0,400	0,571
PRIX TOTAL	0,194	0,405	0,848	1,673	0,511	0,718	1,343	2,7

7. DISCUSSION DES RESULTATS

La discussion se fera à la base des rapports:

Production Plasmacoupage et Prix Oxycoupage

Production Oxycoupage et Prix Plasmacoupage

Pour les 3 cas suivants : 1 chalumeau et 1 plasmatron, 4 chalumeaux et 1 plasmatron, 4 chalumeaux et 4 plasmatrons.

EPAISSEURES		6	12	25	50
1 chalumeau et 1 plasmatron	Production	2,33	4,17	2,50	2,14
	Prix	4,92	2,41	1,83	1,88
4 chalumeaux et 1 plasmatron	Production	2,08	1,04	0,63	0,54
	Prix	1,03	1,2	1,00	1,31
4 chalumeaux et 4 plasmatrons	Production	2,33	4,17	2,50	2,14
	Prix	2,63	1,77	1,58	1,61

De ce tableau il apparaît que :

1. Dans le cas de l'utilisation d'un chalumeau et d'un plasmatron, l'utilisation du plasmacoupage est nettement plus avantageuse aussi bien du point de vue de la production que des prix.

2. Dans le cas de l'utilisation de 4 chalumeaux et 1 plasmatron, nous avons deux possibilités :

- Pour des épaisseurs allant jusqu'à 12 mm, il y a intérêt à utiliser le plasmacoupage.
- Pour des épaisseurs supérieures à 25 mm, il y a intérêt à utiliser l'oxycoupage, celui-ci permettant une production presque doublée par rapport à 1 plasmatron bien que le prix de revient soit légèrement en faveur du plasmacoupage.

3. Dans le cas de 4 chalumeaux et de 4 plasmatrons, le plasmacoupage est préférable.

Pour conclure, nous dirons que pour le coupage de faible quantité de métal, l'utilisation d'un procédé ou de l'autre sera déterminée par l'épaisseur (le plasmacoupage pour les faibles et moyennes épaisseurs l'oxycoupage pour les fortes épaisseurs).

Mais pour les productions moyennes et élevées, l'utilisation du plasmacoupage est préférable que ce soit pour la production ou les prix.

C O N C L U S I O N

Je ne prétend pas avoir fait l'étude complète du plasmacoupage. Néanmoins, malgré les difficultés dues au manque de documents traitant ce sujet, j'ai essayé de mettre en évidence les principales caractéristiques et l'intérêt de ce procédé. De même que j'ai donné ce que l'on pourrait appeler une esquisse d'une installation de plasmacoupage pour une éventuelle réalisation.

Il est évident que seule la réalisation d'une telle installation pourrait permettre une évaluation correcte des possibilités et de l'intérêt du coupage au jet de plasma.

Je suis convaincu, au vu de ce que j'ai appris au cours de cette étude, qu'une telle réalisation est à la portée des étudiants de l'E. N. P. A. pour peu qu'on mette à leur disposition le matériel nécessaire.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 - ENCYCLOPEE DES SCIENCES INDUSTRIELLES, TOME 3, MECANIQUE : GENERALITE APPLICATIONS (GUILLET)
- 2 - R BAUS; W CHAPEAU : APPLICATION DU SOUDAGE AUX CONSTRUCTIONS (DUNOD)
- 3 - RECHERCHES SUR L'INTECHNOLOGIE DU PLASMA COUPAGE (THESE) (LENINGRAD 1975)
- 4 - SOUDAGE ET TECHNIQUES CONNEEXES 11/12 (1968) (REVUE)
- 5 - LES BASES THEORIQUES DU SOUDAGE sous la direction de FROLOV V.V.
- 6 - RIKLINE (ED. MOSCOU) CALCUL DES PROCESSUS THERMIQUES EN SOUDAGE
- 7 - SOUDAGE ET TECHNIQUES CONNEEXES 5/6 (1968) (REVUE)
- 8 - LE SOUDAGE DANS LE MONDE - VOLUME 10 - 1/2 (1968) (REVUE)
- LA TECHNIQUE MODERNE N° 11 (1962) (REVUE)
- 10 - M. LAPORTE : LES DECHARGES ELECTRIQUES DANS LE LAZ
- 11 - LES NOUVELLES DE LA Soudure ET DE LA TECHNIQUE DU PLASMA COUPAGE MOSCOU 1968 (REVUE)
- 12 - PLASMATRON . NOTICE D'ENTRETIEN
- 13 - TECHNIQUES DE L'INGENIEUR : CONSTANTES (K 2)
- 14 - NOUVEAU TRAITE DE CHIMIE MINERALE : SOUS LA DIRECTION DE PAUL PASCAL
- 15 - J. LAKHTINE : METALLOGRAPHIE ET TRAITEMENT THERMIQUES DES METAUX (ED. MOSCOU)
- 16 - NOTICE D'UTILISATION DE L'oxytome 4.
- 17 - LES PRINCIPES DE BASE DE LA PLANIFICATION D'EXPERIENCES (HEKRS)

