UNIVERSITE DE MONTREAL

ETUDE D'IMPLANTATION D'UN LABORATOIRE DE CIRCUITS IMPRIMES EN MILIEU UNIVERSITAIRE

par

Michel Larose

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

ECOLE POLYTECHNIQUE

MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION
DU GRADE DE MAITRISE ES SCIENCES APPLIQUEES (M.Sc.A.)

Mars 1989

(c) Michel Larose 1989

UNIVERSITE DE MONTREAL

ECOLE POLYTECHNIQUE

Ce mémoire intitulé:

ETUDE D'IMPLANTATION D'UN LABORATOIRE
DE CIRCUITS IMPRIMES
EN MILIEU UNIVERSITAIRE

présenté par: Michel Larose

en vue de l'obtention du grade de: M.Sc.A.

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. Jean-Guy Deschênes.....M.Sc.A.

M. Fred Bassal.....B.Sc.

M. Gilles Roy.....M.Sc.A.

SOMMAIRE

Depuis plusieurs années déjà, l'Ecole Polytechnique rêve d'établir un laboratoire de circuits imprimés pouvant lui donner des prototypes de qualité industrielle ou mieux en un laps de temps très court. Décidant une fois pour toute de déterminer s'il était possible d'instaurer un tel laboratoire à l'intérieur de ses murs, l'Ecole a décidé dans un premier temps d'aller de l'avant en signant une entente avec une compagnie montréalaise pour l'élaboration conjointe d'un laboratoire de cartes de circuits imprimés. Dans un deuxième temps, elle a décidé d'examiner les implications du transfert éventuel du laboratoire sur le site même de l'Ecole Polytechnique.

Ce projet a pour but d'identifier les étapes d'un procédé éprouvé et de l'adapter à la fabrication de prototypes de très haute qualité. Il procure aussi un recensement des besoins matériels pour l'application du procédé, de même que les coûts associés. Une analyse du bien-fondé d'un transfert de même que des avantages du laboratoire pour l'Ecole Polytechnique suivent.

Cet ouvrage débute par une description sommaire des principales étapes de fabrication de circuits imprimés double face. Ce type de cartes élémentaires demeure toujours le plus répandu. Les étapes supplémentaires pertinentes aux cartes multicouches sont ensuite éla-

borées. La part du marché de ces cartes connaît une forte croissance depuis quelques années, s'établissant maintenant à environ 38%. Elles semblent être une voie réaliste pour faire face à l'augmentation de la complexité des circuits intégrés.

Une description de chacun des équipements majeurs suit, de même qu'une mention des travaux requis pour leur installation. Dépendant de la complexité des circuits que le laboratoire désire produire, des options permettant d'atteindre des objectifs de haute qualité sont aussi décrits. Une liste des coûts accompagne cette description.

Les investissements requis pour un laboratoire dont l'ambition est d'obtenir à tout le moins la qualité retrouvée dans l'industrie atteignent l'ordre du million de dollars. L'ajout d'une capacité de produire des cartes multicouches et des traces fines et ultrafines pousse les déboursés au delà du million et demi de dollars. Ces sommes ne comprennent que les équipements, solutions chimiques et produits consommables. Elles ne tiennent nullement compte des infrastructures nécessaires pour une telle installation, e.g. bâtiment, électricité, plomberie, etc.

L'implantation d'un laboratoire de circuits imprimés en milieu universitaire s'avère difficilement réalisable non seulement si aucun organisme subventionnaire ne participe au plan investissement, mais aussi à cause des coûts importants de fonctionnement. L'association

avec un partenaire industriel ouvre une voie plus réaliste. Elle permet d'avoir accès à moindre coût à une installation dont l'utilisation envisagée ne saurait justifier de tels déboursés tout en rencontrant les objectifs de formation et de rayonnement en milieu industriel.

ABSTRACT

For a number of years, Ecole Polytechnique has been trying to establish a printed circuit board laboratory that could quickly produce prototypes similar to the quality found in the industry. Once decided it was possible to implement such a laboratory, an agreement was signed with a Montreal firm for the establishment of a printed circuit board laboratory. The implications of the transfer of the laboratory to the university was also to be investigated.

This project identifies a very well established process. It has been adapted for the fabrication of high quality prototypes. It gives a list of the equipment needed to apply this process, as well as the associated costs. An analysis of the pertinence of moving the laboratory and of the advantages of the laboratory for Ecole Polytechnique follow.

This paper gives a brief description of the steps involved in the fabrication of double sided printed circuit boards. This is the most common type of printed circuit board found. The steps pertaining to multilayer boards fabrication are also addressed. Multilayer boards account for about 38% of all the printed circuit boards manufactured in North America. They seem to be a realistic approach to face the ever increasing integrated circuits complexity.

A description of the major equipment is included, as well as a brief mention of the work required for their installation. Depending on the complexity of boards that the laboratory wishes to produce, some options which may permit to reach higher quality and higher complexity goals are given. A list of the costs is accompanying this description.

The investment for a laboratory whose ambition is to produce boards of current technology is approximately one million dollars. The added capacity of producing multilayer boards and fine lines adds an additional one half million. This amount includes only equipment, chemical solutions and consumable products. It does not include the building to house the operation, or the facilities.

The implementation of a printed circuit board laboratory in a University environment raises many problems, such as costs involved, surface area required, utilization and personnel. A partnership with industry affords accessibility to such a laboratory at only a fraction of the cost while still maintaining the objectives regarding education and contact with the industry.

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier M. Gilles Roy d'avoir dirigé ce projet dont il est l'un des instigateurs. Son optimisme constant a su maintenir l'espoir au coeur de l'auteur lorsque certains aspects du projet ne semblaient pas avancer assez rapidement. Je voudrais aussi remercier M. Gaétan Décarie pour son dévouement lors de mon apprentissage du logiciel PCAD et de ses explications inestimables quant à la conception de cartes de circuits imprimés.

Ce projet aurait difficilement pu avoir lieu sans la participation de la compagnie D.E.M. Controls of Canada et de son personnel. Je tiens à remercier plus particulièrement MM. Morgan D'Amato, codirecteur, et Mark D'Amato pour leur patience et leur soutien technique. Sans eux, le projet n'aurait pu atteindre ses objectifs en temps voulu. Je désire également mentionner l'apport de Mlle Tara D'Amato dont la présence a créé une atmosphère de travail particulière pendant ce projet.

Finalement, je désire remercier M. Americ Vitale, associé de recherche chez DuPont Electronics à Wilmington, Delaware. Il m'a permis d'utiliser des documents internes concernant le procédé DuraBOND™.

TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE iv

ABSTRACT vii

REMERCIEMENTS ix

LISTE DES TABLEAUX xviii

LISTE DES FIGURES xix

LISTE DES PLANS xxi

INTRODUCTION 1

SECTION I

FABRICATION DE CARTES FACE DOUBLE

1. Introduction 5

2. Elaboration des masques 9

3. Préparation des flans 11

4. Métallisation des trous 13

4.1 Dépassivation des flans 14

4.2 Catalyse 15

4.3 Cuivre chimique 17

5. Epargne de placage 20

5.1 Impression par écran (Sérigraphie) 21

5.2 Résines photosensibles 23

6. Placage métallique sélectif 26

6.1 Préparation de la surface 27

6.2 Galvanoplastie 28

6.2.1 Cuivrage électrolytique 31

6.2.2 Le dépôt étain-plomb 33

7. Morsure 36

7.1 Décapage de la réserve 36

7.2 Facteur de morsure 37

7.3 Les mordants 39

7.3.1 L'ammoniac alcalin 39

7.3.2 Le chlorure cuivrique 40

7.3.3 Le mélange peroxyde d'hydrogène/acide sulfurique . . 41

7.4 Refusion 42

8. Contacts d'extrémité de cartes 43

9. Finition 45

9.1 Masque de soudure 45

9.2 Découpage 46

SECTION II

FABRICATION DE CARTES MULTICOUCHES

10. Introduction 48

11. Préparation des couches internes 49

11.1 Carte multicouche avec trous transversaux de part en part 49

11.2 Carte multicouche avec trous ensevelis ou borgnes 51

11.3 Traitements de conversion de surface 54

12. Accostage 58

13. Déglaçage 62

13.1 L'acide sulfurique 63

13.2 L'acide chromique 64

13.3 Le permanganate de potassium 65

13.4 Le déglaçage au plasma 67

SECTION III

TESTS

14. Introduction 69

15. Les analyseurs de cartes dénudées 70

16. L'inspection visuelle automatique (IVA) 73

SECTION IV

BESOINS MATERIELS

17. Introduction 76

18. Equipements 78

18.1 Equipements de base 79

18.1.1 Cisaille 79

18.1.2 Etuve 79

18.1.3 Insertion de goupilles 80

18.1.4 Perceuse numérique/détourage 81

18.1.5 Ebarbeuse 83

18.1.6 Cuves pour le cuivrage chimique et galvanoplastie . 83

18.1.7 Laminateur de photorésine 87

18.1.8 Unité d'insolation 88

18.1.9 Développeur 88

18.1.10 Décapage de l'épargne 89

18.1.11 Morsure 90

18.1.12 Séchoirs 91

18.1.13 Contacts d'extrémité de carte 92

18.1.14 Déioniseur d'eau 93

18.1.15 Refusion 93

18.1.16 Cuisson aux UV 94

18.2 Equipements connexes 95

18.2.1 Le laboratoire chimique 95

18.2.2 Ventilation 98

18.2.3 Traitement des effluents 99

18.3 Equipements additionnels 104

18.3.1 Ponçage 104

18.3.2 Concordance des couches 105

18.3.3 Déglaçage des trous 106

18.3.4 Traitement de conversion de surface 107

18.3.5 Accostage des couches 109

18.3.6 Nettoyeur ultrasonique 112

18.3.7 Impression directe au laser 112

19. Exigences en infrastructures 113

19.1 Surface requise 113

19.2 Ventilation 115

19.3 Salle hors poussière 116

19.4 Electricité 118

19.5 Tuyauterie 119

SECTION V

COUTS

20. Introduction 122

21. Investissements 124

21.1 Cartes double face 126

21.2 Le laboratoire chimique 128

21.3 Cartes multicouches 129

22. Infrastructures 130

23. Coûts d'opération 132

SECTION VI

RECHERCHE ET FORMATION

24. Recherche 136

24.1 Philosophie d'interconnexion 138

24.2 Fabrication de cartes de circuits imprimés 139

24.3 Activités connexes 141

24.3.1 Fabrication de machines 141

24.3.2 Manutention 141

24.3.3 Supports isolants 142

24.3.4 Laser 143

24.3.5 Pollution 143

24.3.6 Tests 144

25. Formation 145

SECTION VII

CONSTATATIONS ET RECOMMANDATIONS

26. Constatations 148

27. Recommandations 157

CONCLUSION 162

BIBLIOGRAPHIE 165

ANNEXE A Diagrammes synoptiques des étapes de fabrication . . . 168

ANNEXE B Plans du laboratoire 173

ANNEXE C Impression directe par laser 181

ANNEXE D Traitement des eaux usées 194

D.1 Traitement des eaux usées 197

D.1.1 Neutralisation 198

D.1.2 Précipitation des métaux ordinaires 199

D.1.3 Précipitation des métaux chélatés 202

D.1.3.1 Précipitation à haut pH 202

D.1.3.2 Réduction chimique 203

D.1.3.3 Les sulfures 203

D.1.3.4 Autres méthodes 206

D.1.4 Les résines échangeuses d'ions 206

D.1.5 L'osmose inverse 209

D.2 Analyse du procédé 210

D.3 Réduction du volume des effluents 219

ANNEXE E Exigences des cuves 224

ANNEXE F Compilation des coûts 226

GLOSSAIRE 240

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. Comparaison de la résistance d'adhésion des différents procédés de conversion de surface du cuivre. 56

Tableau II. Comparaison des analyseurs. 75

Tableau III. Classes de pureté d'air. 117

Tableau IV. Récapitulation des projets potentiels. 145

Tableau V. Comparaison des étapes pour différents systèmes de report d'image. 191

Tableau VI. Rejets dans un réseau d'égout unitaire ou domestique. 198

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Etapes de fabrication avec film sec. 7

Figure 2. Impression par écran. 22

Figure 3. Effet de la collimation sur la lumière. 25

Figure 4. Galvanoplastie. 29

Figure 5. Profil de morsure. 38

Figure 6. Refusion. 42

Figure 7. Différentes constructions possibles de cartes multicouches. 52

Figure 8. Accostage. 58

Figure 9. Déglaçage et gravure en retrait. 63

Figure 10. Distribution relative des fautes sur une carte sans com-posant. 71

Figure 11. Diagramme des étapes de fabrication d'une carte double côté. 169

Figure 12. Diagramme des étapes de fabrication des couches internes sans trous ensevelis. 170

Figure 13. Diagramme des étapes de fabrication des couches internes avec trous ensevelis. 171

Figure 14. Diagramme des étapes de fabrication d'une carte multicou-che après stratification des couches internes. . . . 172

Figure 15. Effet de la dimension du pixel sur les traces. 184

Figure 16. Effet de différents espacements de pixels sur la précision du bord des traces. 185

Figure 17. Solubilité des hydroxydes et des sulfures vs pH. . . . 200

Figure 18. Diagramme synoptique d'un système typique de traitement des eaux usées. 205

Figure 19. Résine échangeuse d'ions. 208

Figure 20. Traitement des eaux et fabrication de cartes multicouches. 212

Figure 21. Rinçage en cascade. 219

LISTE DES PLANS

Plan 1. Schéma. 174

Plan 2. Equipements. 175

Plan 3. Ventilation. 176

Plan 4. Electricité. 177

Plan 5. Drains et eau. 178

Plan 6. Air comprimé et «push-pull». 179

Plan 7. Séquence des opérations. 180

INTRODUCTION

Depuis maintenant près de 20 ans, le département de génie électrique de l'Ecole Polytechnique de Montréal cherche à se munir d'un laboratoire de circuits imprimés. Bien que la quantité de circuits imprimés dont il a besoin ne soit pas grande, il n'en demeure pas moins que la qualité de fabrication requise est très importante. Or, il existe très peu d'endroits pouvant produire des circuits imprimés en petites quantités avec une haute qualité. Les grands fabricants capables de fournir cette qualité ne sont pas intéressés à produire de petites séries, car leur installation ne le leur permet guère. Ceux capables de produire de petites séries n'ont habituellement pas l'équipement adéquat pour fournir des circuits de très haute qualité.

Une installation artisanale a bel et bien été tentée à l'Ecole, mais la qualité du produit final n'y était pas. Un équipement plus sophistiqué s'avérait nécessaire. Par un pur hasard, les professeurs Gilles Roy et Jean-Guy Deschênes apprirent au cours de l'année 1987 qu'une compagnie de Montréal, D.E.M. Controls of Canada, fabriquait de l'équipement pour les manufacturiers de cartes de circuits imprimés. Lors d'une visite à la compagnie, ils comprirent que les investissements nécessaires pour monter un atelier de fabrication de prototypes de circuits imprimés, même à petite échelle, seraient énormes. Il semblait ne pas y avoir d'issue.

Il devint évident que l'Ecole ne pourrait s'équiper adéquatement pour la seule production de cartes de circuits imprimés répondant à ses besoins internes. Germa alors l'idée d'une association entre D.E.M. Controls et l'Ecole Polytechnique sur l'élaboration conjointe d'un laboratoire de fabrication de cartes de circuits imprimés. D'un côté, l'Ecole pourrait non seulement y fabriquer ses prototypes, mais elle pourrait aussi y adjoindre des activités de formation et de recherche dans divers domaines tels la chimie, la métallurgie, l'instrumentation, le contrôle de procédé, etc. D'un autre côté, D.E.M. Controls y trouverait non seulement un endroit lui permettant de faire des expériences pour le développement de ses machines mais aussi un accès à des ressources humaines spécialisées pouvant contribuer à la R & D. Une entente fut signée en décembre 1987 entre les deux parties. Cette entente prévoit le rapatriement du laboratoire sur le site de l'Ecole Polytechnique pour juillet 1989.

Ce projet a pour but principal d'évaluer les implications de ce transfert. Pour y parvenir, il faudra d'abord faire une étude du procédé de fabrication de cartes de circuits imprimés. Il existe plusieurs cheminements dans le procédé pour arriver au produit final. Tout au long de la description de la fabrication d'une carte, seuls les cheminements les plus adaptés à l'instauration du laboratoire de cartes de circuits imprimés en milieu universitaire seront considérés. Certaines alternatives, souvent mieux adaptées pour la production de masse, seront parfois décrites. Ce projet ne cherche pas à

découvrir de nouvelles techniques. Toutes ces techniques de fabrication ont déjà été éprouvées par l'industrie, à l'exception d'un tout nouveau procédé pour le traitement de conversion de surface. Le laboratoire travaillera en étroite collaboration avec DuPont pour le développement de ce procédé révolutionnaire. La fabrication de cartes double face sera abordée en premier lieu, puis les aspects touchant les cartes multicouches seront adjoints.

Une fois chaque étape identifiée, nous pourrons alors faire un recensement du matériel nécessaire pour le démarrage du laboratoire avec le procédé décrit en première partie. Une description sommaire de chaque pièce d'équipement majeur sera aussi donnée. Les besoins en infrastructure (i.e. électricité, ventilation, plomberie, local, etc.) seront exposés afin de souligner la préparation requise du local préalablement à l'installation des équipements. Soulignons immédiatement que les dimensions physiques du local utilisé tout au long de cet ouvrage étaient imposées. C'est la totalité de l'espace disponible chez D.E.M. Controls pour l'implantation du laboratoire.

Parmi les objectifs secondaires de ce projet, une liste des coûts associés à l'instauration du laboratoire semble fort pertinente. Les coûts seront divisés en investissement en capital pour l'achat d'équipements pour fabriquer des cartes double face et multicouches, en frais d'installation, et en produits consommables devant être renouvelés sur une base régulière. Les coûts d'opération ne

seront qu'effleurés vu la complexité de déterminer le coût unitaire d'une carte. Cet aspect, de même que l'élaboration d'un budget, d'une étude des besoins financiers et des coûts de production, ainsi qu'une étude de personnel seraient plutôt une suite logique à ce projet.

Enfin, ce travail évoquera la pertinence de réintégrer le laboratoire sur le site même de l'Ecole Polytechnique. Nous verrons certains problèmes qui pourraient survenir advenant le rapatriement du laboratoire. Il mentionnera également les avantages qu'apporterait ce laboratoire pour combler les besoins de l'Ecole en matière de recherche et de formation.

Cet ouvrage se divise en trois grandes parties. La première partie donne une description des méthodes actuellement en vigueur pour la fabrication de cartes double face et multicouches. La deuxième partie donne une liste minimale des équipements requis pour la fabrication de ces cartes. Cette liste tient compte du genre d'entreprise que les partenaires désirent mettre sur pied. Elle contient à l'occasion quelques suggestions concernant certains équipements visant à l'amélioration de la qualité. Enfin, des recommandations seront données quant à l'avenir de ce laboratoire.

SECTION I

FABRICATION DE CARTES FACE DOUBLE

1. Introduction

Une carte de circuit imprimé sert à porter et à connecter des composants électriques et électroniques appartenant à un circuit électrique. A partir du schéma de principe du circuit, on élabore un schéma de disposition des composants et des conducteurs. Quoique cette étape puisse être faite manuellement, les concepteurs recourent de plus en plus à des moyens informatiques. Une fois le schéma terminé, les différents masques nécessaires à la fabrication de la carte sont réalisés soit par réduction photographique soit au moyen d'un phototraceur. Le film aux halogénures d'argent ainsi produit servira de dessin modèle pour les clichés diazoïques qui eux serviront à la production.

Les étapes de fabrication peuvent se regrouper en quelques phases, soit le perçage, la métallisation des trous, l'impression, la galvanoplastie, la morsure, puis la finition. La compréhension du texte qui suit est facilitée par l'examen de la Figure 1. A partir de la configuration de perçage, on percera les trous devant être métallisés pour assurer une connexion électrique entre les deux faces

d'un support isolant cuivré. La métallisation des trous se fait au moyen d'un procédé autocatalytique puisque la paroi des trous est composée d'un matériau non conducteur. Une épargne de placage est ensuite laminée à chaud sous pression sur les deux faces de la carte. Un cliché diazoïque positif (l'impression conductrice est noire) sert de masque à l'épargne de placage pendant l'insolation. Lors du développement, les parties non exposées à la lumière ultraviolette sont enlevées de la surface de la carte, laissant à nu le cuivre devant former les conducteurs. On procède alors à la galvanoplastie de la carte, soit une couche de cuivre suivie d'une couche d'un mélange d'étain-plomb devant servir d'épargne à la morsure.

Les conducteurs ayant ainsi été définis, il faut maintenant éliminer le surplus de cuivre pour obtenir l'isolation électrique entre ces conducteurs. La carte est dégarnie de son épargne de placage puis exposée à une solution de morsure dissolvant le cuivre mais laissant intacte la couche d'étain-plomb protégeant les conducteurs. L'impression non conductrice de la carte est maintenant enlevée, ne laissant en évidence que l'impression conductrice. Si nécessaire, les contacts d'extrémité de carte sont dorés pour préserver la continuité électrique et leur donner des propriétés de résistance à l'usure.

La carte est ensuite recouverte d'un vernis servant de masque de soudure. Il assure que la soudure, une fois les composants montés

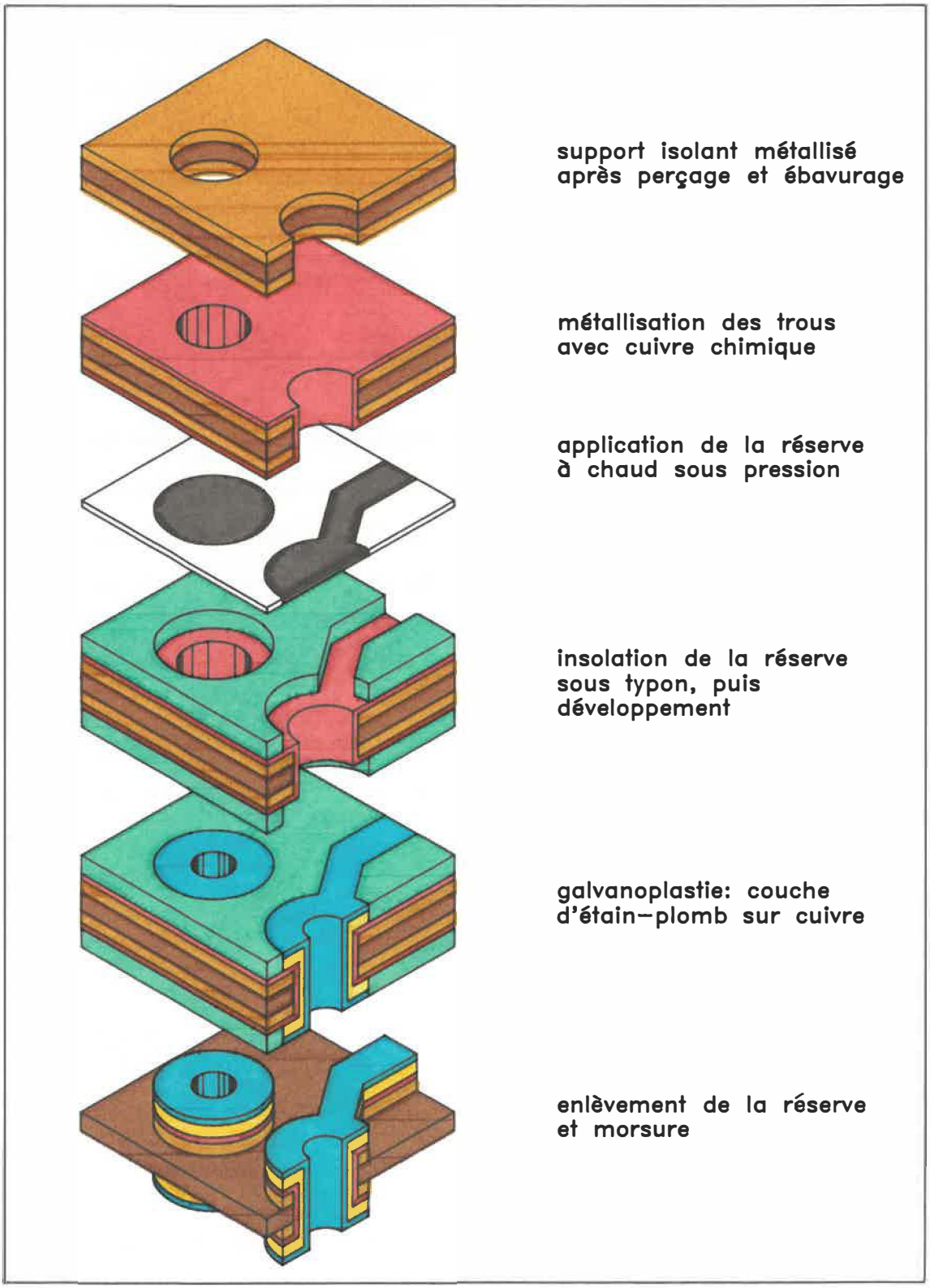


Figure 1. Etapes de fabrication avec film sec.

sur la carte, ne sera appliquée qu'aux endroits désirés. Il protège aussi la carte contre les polluants et les contaminants de l'atmosphère au cours de sa vie de service anticipée.

Le texte qui suit donne une description plus détaillée des différentes étapes de fabrication d'une carte. Le lecteur est invité à consulter les figures à l'annexe A où des diagrammes synoptiques sont donnés pour faciliter la compréhension de l'évolution d'une carte au cours d'un procédé de fabrication. La Figure 11 sera particulièrement utile à cette étape-ci. Chaque rectangle ombragé représente une étape, alors que les robinets symbolisent des rinçages. Un numéro d'opération identifie chaque étape. Un robinet doublé est l'identification d'un rinçage en cascade. Un groupe d'étapes sur une même ligne représente une phase à la fin de laquelle les flans peuvent être stockés et accumulés avant de démarrer la phase suivante. Chaque phase est identifiée en début de ligne.

Le lecteur trouvera également un plan du laboratoire (Plan 7) où il est possible de suivre le cheminement de la carte à l'aide des numéros d'opérations correspondant à ceux des diagrammes synoptiques. La disposition des équipements sur le plan est celle que l'on retrouve actuellement dans le laboratoire sur le site de la compagnie D.E.M. Controls. L'emplacement de chacun des équipements a été soigneusement étudié pour maximiser l'utilisation de l'espace disponible dans ce local. La séquence des étapes de fabrication ne pouvait

justifier à elle seule la disposition du matériel. D'autres contraintes devaient parfois aussi être considérées.

2. Elaboration des masques

Les schémas de principe et de disposition peuvent être faits manuellement ou par ordinateur. La technique manuelle implique de dessiner d'abord le schéma de principe à l'aide de gabarits, de décalques et d'encre. Sur une feuille de mylar superposée à une grille de 2,54 mm (0,1 pouce), le schéma de disposition est ensuite élaboré à une échelle de 2X ou 4X à partir du schéma de principe. L'avantage d'utiliser une telle échelle est de conserver une meilleure définition pour le produit final. On utilisera des rubans rouge et bleu pour définir l'impression conductrice en assignant une couleur unique pour chaque face. Les composants communs à chaque face, tels les trous de liaison, sont noirs. Les dessins modèles sont ensuite réduits à l'échelle réelle par procédé photographique et les copies de travail sont reproduites sur clichés diazoïques. Cette technique permet d'obtenir des traces et des espaces entre 0,3 et 0,4 mm (12 à 16 mil).

L'avantage de la technique informatisée est de pouvoir manipuler les données à volonté. Certains logiciels sont si puissants qu'ils peuvent transposer un schéma de principe en un schéma de disposition avec une intervention minimale de la part de l'opérateur. Un temps

appréciable est ainsi sauvé, surtout dans les cas où il faut apporter des corrections de dernières minutes. Les données numériques stockées sur disquettes ou rubans magnétiques peuvent être dirigées vers un traceur optique ou un traceur au laser pour une impression directe à échelle réelle sur un film aux halogénures d'argent. Les traceurs au laser ont une définition telle qu'ils permettent de réaliser des traces et des espaces de 125 μm (5 mil). Les copies de travail sur clichés diazoïques sont ensuite produites. Jusqu'à 175 μm (7 mil), il est possible de travailler avec des clichés diazoïques, mais en dessous de cette limite il est préférable d'utiliser des films argentiques, car ils possèdent une meilleure définition de contour.

Depuis quelques années, l'évolution des traceurs au laser permet une insolation directe de la résine photosensible. Peu de données sont disponibles sur ces systèmes, mais on affirme pouvoir parvenir à des traces et des espaces de 75 μm régulièrement. Pour le moment, la production de prototypes ou de petites séries est la principale utilisation de ces systèmes très dispendieux. Toutes les étapes de reproduction photographique et de copies sur clichés diazoïques sont éliminées. (L'appendice C donne plus de détails sur cette technologie de pointe.)

3. Préparation des flans

Les feuilles de laminé (généralement cuivre sur résine d'époxyde) sont découpées à la cisaille de façon à optimiser le nombre de circuits pouvant y être disposés: on obtient ce qu'on appelle techniquement un flan. Les flans sont ensuite passés à l'étuve à une température de 135°C pour une période de 4 heures. Il n'est pas question ici de terminer le durcissement de la résine dans les stratifiés, mais bien de les débarrasser de toute contrainte résiduelle et de toute humidité afin de stabiliser leurs dimensions.

A partir des données de la configuration de perçage enregistrées sur support magnétique, les trous de liaison sont percés à l'aide d'une perceuse numérique. Ces trous ont principalement deux fonctions: ils servent d'abord à l'insertion des composants dans la carte et ils permettent une liaison électrique entre chaque couche de la carte.

Après le perçage des flans, on observe la formation de bavures de débouchage des forets même avec l'utilisation de contreplaques d'entrée et de sortie. On doit éliminer ces bavures à l'aide d'un procédé d'abrasion mécanique. Une machine à ébarber avec brosses rotatives verticales permet de supprimer ces copeaux tout en conservant au trou sa forme circulaire contrairement aux machines à brosses horizontales qui ont tendance à "étirer" la surface du trou.

Les deux brosses, une par côté, sont montées sur un rotor vertical. En plus de tourner autour d'un axe vertical, les brosses sont mues dans une direction perpendiculaire à celle des flans sur le convoyeur de la machine. La brosse, fixée à l'extrémité du rotor, est un disque sur lequel on retrouve des poils, faits de fibres synthétiques, sur l'une des faces. Les poils ne font qu'effleurer la surface du flan afin d'éviter d'égratigner le cuivre.

De par leur conception, les machines dont les brosses sont montées sur un axe horizontal ne donnent pas des résultats aussi uniformes. Les poils, encore une fois faits de fibres synthétiques, sont fixés autour d'une tige le long de son axe. Chaque extrémité de la tige est fixée sur les parois de la machine de telle sorte que la tige ne peut que tourner autour de son axe de rotation. Le flan est déposé sur le convoyeur et passe entre les deux brosses. Lorsque les brosses tournent à grande vitesse, la force centrifuge fait en quelque sorte de déformer la brosse en son centre. La forme de la brosse n'est plus cylindrique, mais ovale. Les conséquences sont un brossage plus accentué au centre du flan par rapport aux extrémités. Le mouvement rotatif de la brosse a aussi tendance à donner une forme oblongue au trou.

Dans les deux conceptions, un jet d'eau sous pression est ensuite projeté sur le flan afin de nettoyer les trous de tout débri étant demeuré accroché aux parois.

4. Métallisation des trous

Le matériel de base pour les cartes est un support isolant recouvert d'une couche de cuivre. Ce support isolant est généralement fait d'un mélange de résine d'époxyde et de fibres de verre tissées. Dans certains cas bien particuliers on peut utiliser un matériau plus exotique tel le polyimide ou le téflon. La couche de cuivre laminé est spécifiée en once/pied carré. Par exemple, un support isolant avec un cuivre de 1 oz aura une couche de cuivre de 35 μm (1,4 mil) d'épaisseur.

Puisque la paroi des trous est constituée d'un matériau diélectrique, il faut employer un procédé autocatalytique pour y déposer une couche de métal. Par la suite on peut procéder à un dépôt électrolytique, lequel est beaucoup plus rapide et donne un cuivre plus ductile. Cette propriété de ductilité est importante puisque lors de l'opération de soudure à la vague, le flan sera soumis à des températures dépassant les 240°C. Les coefficients de dilatation thermique du support isolant et du cuivre sont souvent fort différents. Lors de l'application d'une contrainte thermique, la dilatation plus rapide et plus importante de la résine d'époxyde provoque une fissure du

cuivre dans le canon du trou. La spécification militaire américaine MIL-P-55110-D exige aussi que le métal ne présente aucune fracture après une immersion de plus de 10 secondes dans un bain de soudure à 288°C de même qu'après 100 cycles thermiques variant de -55°C à 125°C.

4.1 Dépassivation des flans

La surface de cuivre doit être très propre avant de procéder au dépôt de cuivre chimique afin d'éviter que le dépôt électrolytique subséquent ne s'écaille. Une première étape consiste à la débarrasser de toute souillure et des oxydes qui la recouvrent. Pour ce, on trempe les flans dans un nettoyeur/conditionneur alcalin. On estime que lors du perçage des flans les parois des trous se chargent négativement (1). Cette charge diminue l'adsorption de l'acide stannique présent dans les systèmes d'étain-palladium. Un agent cationique est incorporé au nettoyeur afin de neutraliser cette charge. Le conditionneur contient aussi un agent mouillant devant modifier la surface des parois des trous, la faisant passer d'hydrophobe à hydrophile. Ceci contribue à une meilleure adsorption de l'acide stannique.

Une opération de micromorsure s'ensuit. Son but est de poursuivre le nettoyage et d'enlever une mince couche de cuivre. La surface de contact est augmentée en rendant finement rugueuse la surface du cuivre. La surface devient ainsi très active et propice à

l'adsorption du catalyseur. Diverses solutions de morsure sont disponibles pour cette étape. Après avoir joui d'une forte popularité, le persulfate d'ammonium se voit maintenant remplacé par le persulfate de sodium à cause de la difficulté de traiter les eaux usées contenant de l'ammonium. L'ammonium est un complexant très puissant. Les solutions à base de peroxyde d'hydrogène et d'acide sulfurique sont de plus en plus en usage à cause notamment de la facilité de précipiter le cuivre et du degré de contrôle possible sur la micromorsure. En effet, une morsure de 2 μm est suffisante pour donner à la surface ses qualités recherchées.

Un bain d'acide sulfurique est accolé au bain de micromorsure. Ce bain sert à neutraliser sur le flan la solution alcaline du bain précédent avant son introduction dans la solution acide suivante. Dés lors, si un mordant alcalin est utilisé, le bain d'acide suit la micromorsure et nous avons la séquence nettoyage alcalin, micromorsure, trempage acide, chlore. Dans le cas d'un mordant acide, le bain d'acide sulfurique précédera le mordant afin de neutraliser le conditionneur. Nous aurons alors nettoyage alcalin, trempage acide, micromorsure, chlore.

4.2 Catalyse

Un dépôt chimique de cuivre sur une surface non métallique ne saurait être possible sans la présence d'un catalyseur. Le cataly-

seur provoque le dépôt chimique du cuivre sur une surface telle le verre ou l'époxyde. Le système le plus en vigueur dans la fabrication de cartes de circuits imprimés est basé sur un colloïde de palladium supporté par un colloïde d'étain.

Trois bains distincts sont nécessaires pour cette opération. Le premier est qu'un bain à forte teneur en chlorure sous forme d'acide chlorhydrique ou de chlorure de sodium. L'acide chlorhydrique mélangé avec du chlorure d'étain est le plus employé car il est moins sensible aux variations de température. Le but de ce bain est assez simple: tout entraînement d'eau dans le bain d'étain-palladium cause une dissociation des colloïdes et provoque la précipitation du palladium. Ce bain est donc une barrière contre l'eau.

Le bain suivant est l'activateur. C'est un composé de HCl, NaCl, $SnCl_2$ et de Pd, lequel est un métal précieux avec de très fortes propriétés catalytiques. Dès l'immersion des flans, les surfaces commencent à adsorber les colloïdes de palladium. Les forces d'adsorption sont telles qu'un simple rinçage ne pourrait déloger le palladium.

Un bon rinçage est important ici. Si cette solution venait à être entraînée dans l'accélérateur ou la solution de cuivre chimique, ces bains seraient contaminés et il s'en suivrait de sérieux problèmes de recouvrement et d'adhérence du cuivre chimique.

Après le rinçage à l'eau courante, les sels d'étain s'hydrolysent sous forme d'hydroxyde d'étain et deviennent très adhérents à la surface du substrat. L'accélérateur dissout les sels d'étain qui se sont déposés sur la surface et recouvrent le palladium. Le palladium ainsi mis à nu a un bien meilleur pouvoir catalytique.

4.3 Cuivre chimique

Le bain de cuivre chimique produit un dépôt de cuivre par réaction chimique sans recourir à l'électricité. Les ions cuivriques sont réduits en cuivre métallique sur la surface des flans seulement là où le catalyseur est présent. Une fois le palladium recouvert, le cuivre fraîchement déposé sert à son tour de catalyseur et permet à la réaction de se poursuivre. Ces bains sont principalement constitués de cinq ingrédients, soit:

1. une source d'ions cuivre,
2. des agents complexants pour les ions cuivre,
3. un composé réducteur,
4. un régulateur de pH,
5. des additifs.

La source d'ions cuivre n'est pas importante en soi en autant que l'anion associé n'ait pas une action adverse sur la réaction. On

utilise de façon régulière du sulfate de cuivre pur cristallisé $CuSO_4 \cdot 5H_2O$. C'est une source peu dispendieuse et largement disponible.

Puisque les réducteurs fonctionnent en milieu alcalin à un pH variant de 12 à 13, il faut chélater les ions cuivre afin d'éviter la précipitation d'hydroxyde de cuivre. Un chélate permet de conserver en solution un ion à une valeur élevée de pH. Une grande variété de chélates sont disponibles sur le marché et sont stables en milieu fortement basique. Parmi les plus utilisés, on retrouve l'éthylène diamine tétra acétique (EDTA), le quadrol et les sels de Rochelle.

La majorité des bains commerciaux utilisent une solution à base de formaldéhyde comme réducteur. Ce réducteur n'est efficace qu'en solution alcaline. Son pouvoir réducteur augmente avec le pH en présence d'un complexant. Le formaldéhyde est un produit chimique hautement toxique et volatil. Une bonne ventilation est essentielle pour éviter de provoquer des désagréments aux employés.

Pour maintenir une bonne efficacité de l'agent réducteur, une solution tampon est ajoutée au bain afin de maintenir le pH dans la région optimale d'opération. L'hydroxyde de sodium est généralement utilisé à cet effet. Lorsque le bain est inutilisé pour une période de temps plus ou moins longue comme les fins de semaine et les jours

fériés, on diminue le pH afin de prolonger la vie du bain. On le repart en rajoutant du NaOH.

Une variété d'additifs réalisant diverses fonctions sont ajoutés au bain pour en augmenter l'efficacité. Les stabilisants empêchent le dépôt de cuivre sur les parois des cuves et maintiennent stable la solution en présence de régulateurs de vitesse. Ces derniers ont tendance à déstabiliser le bain. Les régulateurs de vitesse permettent d'atteindre de 1 à 5 microns à l'heure. Les dépôts de cuivre chimique ont été longtemps accusés de ne pas avoir suffisamment de ductilité pour résister aux fractures lors de chocs thermiques. Certains additifs diminuent les contraintes internes dans le dépôt. Certains autres additifs limitent la formation d'hydrogène pendant la réaction. Le gaz, produit à la cathode, devient captif à l'intérieur du dépôt et prend de l'expansion lors des chocs thermiques, la soudure à la vague par exemple, provoquant des fractures dans les trous.

Deux types de dépôts chimiques sont actuellement en utilisation dans l'industrie. Le premier atteint une épaisseur de 0,3 à 0,7 µm (12 µpo à 28 µpo). Ce dépôt est trop mince pour pouvoir continuer son traitement lors des étapes subséquentes. Un renfort électrolytique de 3 à 6 µm (120 à 240 µpo) est alors requis pour éviter d'avoir un cuivre trop fragile. Le deuxième type de dépôt laisse de 2,0 à 2,5 µm (80 à 100 µpo) en 25-30 minutes. Le renfort électrolytique n'est alors plus nécessaire. Le dépôt chimique a une surface

plus rugueuse que le dépôt électrolytique, ce qui permet à la résine photosensible de mieux adhérer au flan.

L'hydroxyde de sodium contenu dans le bain de cuivre chimique laisse sur la surface du flan un film alcalin difficile à rincer. Ce film favorise l'oxydation du cuivre et entrave l'adhérence de la résine photosensible sur le cuivre. Un bain d'acide sulfurique neutralise ce résidu alcalin.

Si la plaque doit être entreposée pendant un certain temps avant de passer à l'étape suivante, on la trempera dans une solution anti-oxydante pour empêcher le ternissement du cuivre.

5. Epargne de placage

Maintenant que la totalité de la carte est recouverte de métal, on peut procéder à un dépôt électrolytique de cuivre, lequel est beaucoup plus rapide et possède les qualités recherchées dont la ductilité. Pour éviter de déposer inutilement du cuivre sur toute la surface du flan, on masque l'impression non conductrice avec une réserve. Ainsi, seules les traces, pastilles et parois des trous recevront une couche supplémentaire de cuivre pour en arriver à une épaisseur de 25 μm (1 mil) à l'intérieur des trous.

Deux types d'épargne sont disponibles. La plus ancienne, qui est encore largement en usage, consiste à faire passer une encre à travers un écran recouvert d'un stencil pour masquer l'impression non conductrice du circuit. L'autre est une pellicule photopolymérisable déposée sur chaque face du flan dont les parties non exposées à la lumière seront dissoutes au moyen d'un révélateur.

Les principes d'application des épargnes de placage, de morsure et des masques de soudure sont les mêmes selon leur type; seul le choix du matériel en fonction de son usage est différent.

5.1 Impression par écran (Sérigraphie)

La méthode par sérigraphie fut la première à être utilisée pour appliquer une réserve sur les plaques de circuits imprimés. Son coût et sa simplicité en font un choix très populaire pour les productions en grande série. Par contre, elle requiert une certaine dextérité de la part de l'opérateur pour obtenir des résultats uniformes d'un lot à l'autre. De plus, on doit se contenter de largeurs de traces et d'espaces de 0,3 à 0,4 mm minimales. Pour des lignes plus fines, l'appel aux films photosensibles secs est inévitable.

La technique (Figure 2) consiste d'abord à déposer sur un **écran** un **stencil** représentant l'impression conductrice. Le stencil peut être fabriqué selon trois méthodes. Avec la méthode directe, on

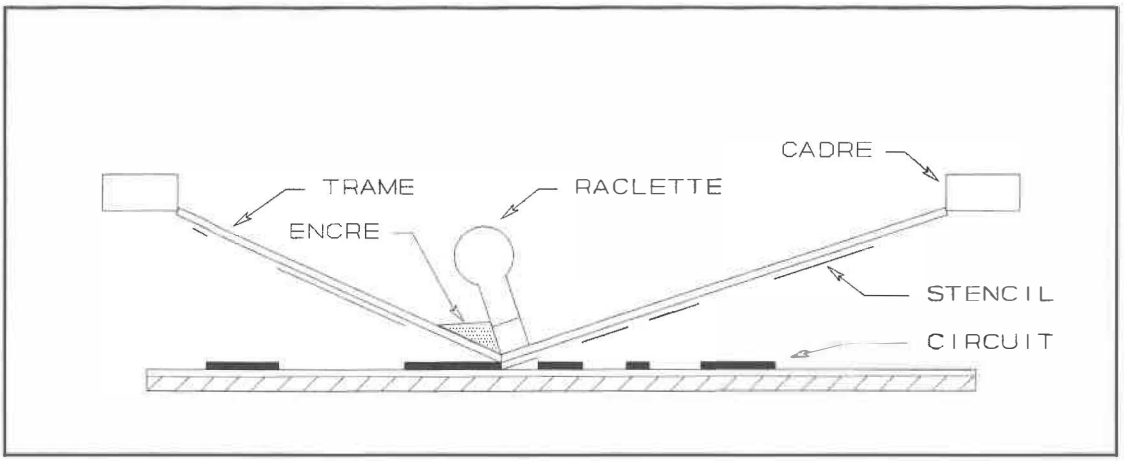


Figure 2. Impression par écran.

recouvre d'abord l'écran d'une émulsion liquide photosensible. Puis un contretype négatif masque l'impression non conductrice pendant l'insolation. La partie insolée se polymérise et devient insoluble au révélateur. Le révélateur dissout les parties de l'émulsion formant l'impression non conductrice. La méthode indirecte utilise une émulsion photosensible en feuille déposée sur l'écran après insolation et développement. Une troisième méthode dite combinée directe-indirecte est aussi disponible.

L'écran, ou trame, est fait de fils de polyester ou d'acier finement tissés et tendus sur un cadre, ou chassis. La tension appliquée sur l'écran est très importante. Une mauvaise tension conduit à une déformation permanente du stencil et présente une mauvaise concordance. La surface des mailles et le diamètre des fils déterminent le volume d'encre déposé sur le flan. On choisit d'abord une grosseur de fil en fonction de sa robustesse puis une densité de

mailles. Une densité de mailles élevée donne une meilleure définition des contours.

A l'aide d'une **raclette** bien équarrie et faite de polyuréthanne, on pousse l'encre à travers les orifices de l'écran. On choisit l'encre en fonction de son utilisation: épargne de placage, épargne de morsure, masque de soudure, marquage. Les encres sont séchées à la chaleur, à l'air ou aux rayons ultraviolets. Les encres UV ont l'avantage de sécher très rapidement et de ne pas dégager de vapeurs nocives.

5.2 Résines photosensibles

Les réserves photopolymérisables sont disponibles sous deux formes: liquide ou film sec. La variété liquide est rarement utilisée, sauf peut-être pour les masques de soudure. Les films secs sont très répandus et leur part du marché ne fait que s'accroître. La tendance à augmenter la densité des traces sur les cartes de circuits imprimés est en grande partie responsable de cette faveur populaire puisqu'ils permettent des largeurs de conducteurs et d'espaces beaucoup plus fines, soit jusqu'à environ 50 microns. Ils conviennent aussi très bien aux productions de petites séries.

Le film sec vient en rouleau. Un film de photopolymères, qui est la résine photosensible proprement dite, est coincé entre un film

de polyoléfine et un film de polyester. La couche de résine est constituée principalement de monomères, photo-amorceurs, promoteurs d'adhésion et d'un liant. Le liant donne la forme et sert de support aux autres ingrédients. Lorsque les photo-amorceurs sont exposés à des rayons UV, ils génèrent des radicaux libres qui se joignent aux monomères liquides. Une réaction en chaîne s'ensuit et un réseau de polymères se développe, rendant la résine dure et chimiquement résistante. Les parties polymérisées deviennent insolubles aux solutions de révélateur. La polymérisation se continue plusieurs minutes après le retrait de la résine aux UV (2). C'est pourquoi le film ne doit pas être développé immédiatement après son insolation. On suggère plutôt d'attendre une période de 30 minutes.

L'oxygène inhibe la réaction en chaîne. Un film de polyester transparent protège la résine de l'air environnant. Il ne devrait être pelé que lorsque le flan est prêt pour le développement. Le film de polyoléfine permet de rouler la réserve sans qu'elle ne colle à elle-même. Il est pelé lors de l'application de la réserve sur le flan.

Le film sec est laminé simultanément sur chaque face du flan à l'aide d'un laminateur de résine photosensible. Le film de polyoléfine est pelé et collecté sur un rouleau séparé. La réserve est apposée sur la surface de cuivre puis le flan est introduit entre deux rouleaux de caoutchouc chauffés. La pression et la chaleur des

rouleaux rendent momentanément la résine fluide et assurent son adhérence au flan.

Un typon, où l'impression conductrice est opaque, est apposé sous vide sur la réserve dans l'unité d'insolation. La lumière ultraviolette déclenchera la réaction en chaîne de polymérisation de la résine sous la partie transparente du typon. Une lampe aux vapeurs de mercure est généralement utilisée comme source UV. La lumière est préférablement collimatée afin d'éviter la dispersion des photons dans la résine photosensible. Comme on peut l'observer à la Figure 3, une lumière non collimatée diminue la largeur des traces car les photons atteignent la résine sous les parties opaques du typon.

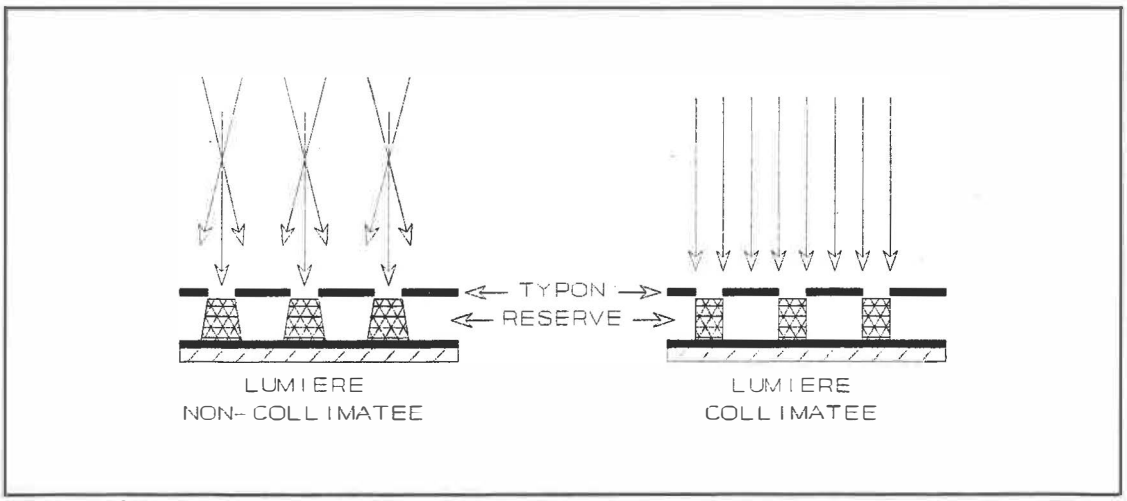


Figure 3. Effet de la collimation sur la lumière.

Le but du développement est d'éliminer toute partie non polymérisée de la résine. Les films secs sont développés dans trois types de solution: solvant, aqueux, semi-aqueux. La composition du liant détermine le choix du révélateur. Des solvants chlorurés tel le 1,1,1-trichloroéthylène sont à la base des révélateurs solvants. La volatilité de ces produits exige une ventilation adéquate. Les effluents doivent être traités par distillation ou transportés dans des barils de plastique hermétiquement fermés. Les révélateurs aqueux sont à base de carbonate de sodium. Les effluents sont composés de matières organiques et certaines lois de l'environnement, à la Communauté Urbaine de Montréal entre autres, permettent le déversement direct de ces eaux dans les égouts domestiques après un simple ajustement de pH. Les révélateurs semi-aqueux ont une faible teneur en solvant.

Les principes du développement sont les mêmes pour chaque catégorie de révélateur. De façon générale la solution chimique pénètre les parties non polymérisées et solubles. La résine gonfle et est dissoute dans le révélateur.

6. Placage métallique sélectif

Lors du cuivrage chimique, nous n'avons obtenu qu'un dépôt de l'ordre de 2 à 6 μm (80 à 240 μpo). Ceci n'est pas suffisant pour répondre à la norme de 25 μm (1 mil) sur la paroi des trous. Un

dépôt électrolytique permet d'atteindre cette épaisseur en moins de 30 minutes. Une couche additionnelle d'étain-plomb sert à la fois de soudure et d'épargne à la morsure.

6.1 Préparation de la surface

Les flans sont d'abord submergés dans un nettoyeur acide qui enlève les traces de doigts, souillures et oxydes de la surface. Un nettoyeur alcalin attaquerait la réserve. Lors du développement, des résidus de liant sont demeurés fixés sur la surface du cuivre. S'ils ne sont pas enlevés, ils risquent de provoquer des manques lors du placage et le cuivre pourrait aller jusqu'à s'écailler subséquemment.

Un agent mouillant ajouté au nettoyeur lui permet de mieux pénétrer les contaminants et les résidus de photorésine, et de les détacher de la surface. Des inhibiteurs empêchent l'acide d'attaquer le cuivre. Un bon rinçage doit suivre ce bain. Si on provoque une certaine turbulence avec de l'air ou en procédant à un rinçage par aspersion, le mouillant forme une mousse. L'absence de cette mousse indique que le rinçage est adéquat. Si des traces de mouillant sont entraînées dans le bain de cuivre électrolytique, la surface du cuivre sera piquetée.

Une étape de micromorsure enlève une mince couche de cuivre en surface. Les mêmes solutions de morsure que celles précédant le cui-

vrage chimique peuvent être employées. La solution doit être contrôlée de très près car l'épaisseur de cuivre dans les trous est minime surtout si on a procédé avec un cuivrage chimique épais sans renfort électrolytique. La surface de cuivre devient dès lors très réceptive au dépôt électrolytique subséquent. Le bain d'acide suivant, compatible avec la solution d'électrolyse, précipite les sels de la solution de morsure relativement peu solubles en milieu acide par rapport à un milieu aqueux. Ce bain est notamment important dans le cas des systèmes de morsure au persulfate.

6.2 Galvanoplastie

Le passage d'un courant unidirectionnel dans une solution appelée **électrolyte** est accompagné d'un mouvement de particules chargées appelées **ions**. Une propriété fondamentale d'un électrolyte est l'**ionisation**. Dans le cas qui nous concerne, lorsque du sulfate de cuivre est dissous dans une solution aqueuse, une certaine proportion formant un équilibre se sépare en ions Cu^{2+} et SO_4^{2-}. Ce sont ces ions qui sont responsables du transport du courant dans l'électrolyte, et non les molécules non dissociées de sulfate de cuivre.

Tel qu'illustré à la Figure 4, lors du passage du courant dans la solution, les cations sont attirés vers la **cathode**, l'électrode négative du système. Lorsque les ions cuivre, chargés positivement puisqu'ils leur manquent deux électrons, sont suffisamment près de la

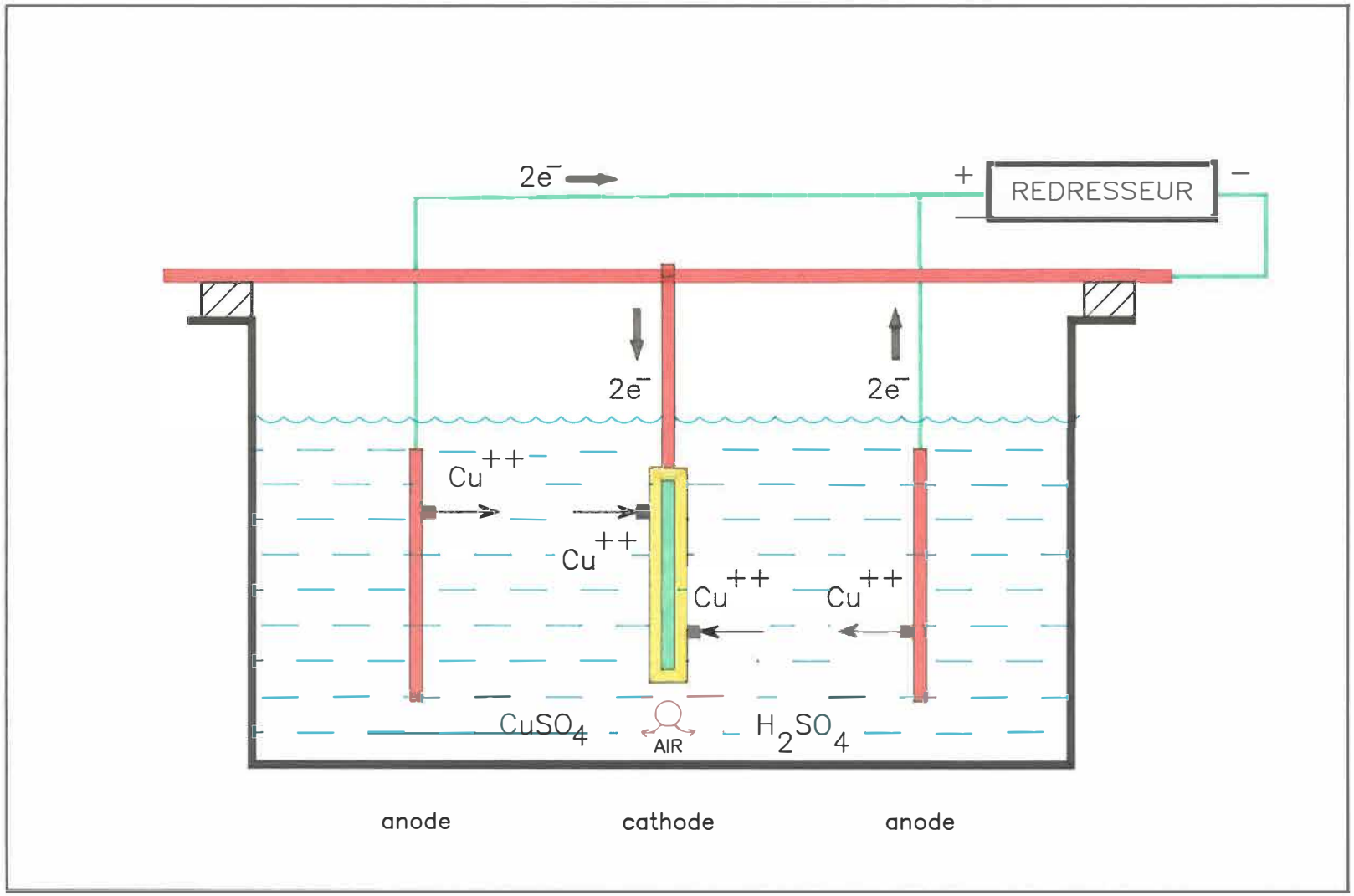


Figure 4. Galvanoplastie.

cathode, deux électrons quittent cette dernière et pénètrent le nuage d'ions cuivre environnant. L'ion cuivre se décharge et forme un atome de métal qui normalement adhère à la cathode. A l'**anode**, l'électrode positive, les ions sulfate sont déchargés et se combinent avec des atomes de cuivre pour reformer du sulfate de cuivre, de telle sorte que la quantité de **cations**, ions positifs, et d'**anions**, ions négatifs, libres demeure toujours en équilibre.

Puisque la quantité de cuivre déposé est proportionnelle au nombre d'électrons quittant la cathode, soit deux électrons pour un atome de cuivre, il est possible de calculer le volume théorique de cuivre déposé à la cathode en mesurant le courant et le temps. (Le lecteur est invité à consulter des ouvrages de galvanoplastie pour approfondir cet aspect du procédé.) On parle bien de volume et non d'épaisseur car l'épaisseur du dépôt dans les trous n'est pas toujours la même qu'à la surface. Ceci dépend du **pouvoir de pénétration** de la solution. Il faut bien souligner que les spécifications exigent une certaine épaisseur du dépôt à <u>l'intérieur des trous.</u> Le **facteur de pénétration** d'une solution est le rapport trou:surface de l'épaisseur d'un dépôt métallique, i.e. l'épaisseur mesurée à l'intérieur des trous versus l'épaisseur mesurée sur les conducteurs à la surface du flan. On a donc intérêt à utiliser une solution ayant un facteur de pénétration aussi près de l'unité que possible. Le diamètre du trou et sa longueur sont des facteurs importants qui influent sur le pouvoir de pénétration. Plus le trou sera petit et long, plus

il sera difficile pour la solution de pénétrer le trou sur toute sa longueur. Aussi, plus la solution parvenant au centre du trou sera épuisée en ions cuivre. Des ratios longueur:diamètre de 10:1 semblent être la limite actuelle de la technologie.

6.2.1 Cuivrage électrolytique

La plupart des bains de cuivrage électrolytique de nos jours sont basés sur une solution de sulfate de cuivre. Les bains de pyrosulfate de cuivre furent à une époque non lointaine très utilisés pour leur pouvoir de pénétration. Mais les bains de sulfate de cuivre, qui sont plus simples d'emploi et dont les effluents sont plus faciles à traiter, ont été améliorés à un point tel qu'ils ont maintenant recouvert la plus grande part du marché.

Le sulfate de cuivre est la source en ions cuivre. Il amène les ions cuivre dans la région de la cathode (carte de circuits imprimés). A l'application d'un courant, les ions cuivriques sont réduits à l'état métallique sur la cathode, alors que les ions sulfate sont oxydés à l'anode. Le sulfate de cuivre est donc en partie responsable de la conductivité du bain.

Mais le sulfate de cuivre ne saurait être efficace seul. De l'acide sulfurique est ajouté au bain pour en augmenter la conductivité. Il diminue la polarisation autour des électrodes et favorise

la corrosion de l'anode. Il donne au bain un pouvoir de pénétration accru et un dépôt plus uniforme sur la cathode.

Une faible quantité d'ions chlore sous forme d'acide chlorhydrique fait partie intégrante des bains de sulfate de cuivre. Ces ions aident à corroder l'anode et à donner un dépôt de meilleure qualité. Ils augmentent aussi l'efficacité globale du bain.

Les bains commerciaux contiennent des additifs organiques susceptibles d'accroître le rendement. Leur fonctionnement est quelques fois obscur, mais disons simplement que le but de ces additifs est de donner au dépôt une structure avec des grains plus fins, un dépôt plus nivelé et plus brillant. Un contrôle serré quant à leur incorporation, souvent automatisée, dans la solution est primordial pour prévenir toute instabilité.

L'agitation du bain est la façon la plus efficace de transporter les ions cuivre dans le voisinage de la cathode. Un mouvement de va-et-vient horizontal de la cathode est efficace car il fait bouger la solution dans les trous. Il est aussi souvent recommandé d'incorporer de l'air dans le bain. Seule une faible quantité d'air provenant d'un ventilateur sous la cathode est nécessaire. L'agitation apporte une solution fraîche dans la région épuisée en ions cuivre.

Le bain galvanoplastique doit être filtré de façon continue pour retirer les particules de poussière et les contaminants s'étant introduits dans le bain. A défaut de filtrer le bain, les particules incluses dans le dépôt provoqueront une rugosité non souhaitée et des manques. La filtration doit faire circuler au moins le volume de deux bains à l'heure avec un filtre de polypropylène dont les pores sont de l'ordre de 5 microns.

Les anodes, de cuivre très pur avec une trace de phosphore, sont de 13 à 21 cm de part et d'autre de la cathode. On les suspend ensachées à un crochet de titane. Elles sont légèrement plus longues que la cathode. En éloignant l'anode de la cathode, on obtient un dépôt plus uniforme et diminue le risque de brûler le dépôt. Le courant appliqué est fonction de la surface de la cathode. Il gravite habituellement autour de 3,2 A/dm² (30 ASF) et peut parfois atteindre 4,2 A/dm² (40 ASF). Un courant plus faible, de l'ordre de 1 à 2 A/dm² (ampère par décimètre carré) (10 à 20 ASF), augmente le pouvoir de pénétration.

6.2.2 Le dépôt étain-plomb

Dans la majorité des cas, on rajoute une couche supplémentaire de métal par-dessus le cuivre pour principalement trois raisons:

1) préserver la soudabilité du circuit,

2) protéger le cuivre des agressants environnants qui pourraient provoquer son oxydation et changer ses caractéristiques électriques,

3) servir d'épargne à la morsure.

Divers métaux peuvent être utilisés à cette fin, mais l'étain et l'étain-plomb sont les plus populaires. L'étain est surtout employé en Europe. Il est peu employé ici à cause de la formation d'excroissances monocristallines d'étain lors de la galvanisation. Ces protubérances sont très résistantes malgré leur fin diamètre de l'ordre de 25-50 μm. Si elles sont assez longues, elles causent des courts-circuits entre les traces. De plus l'étain ne peut être refondu après la morsure parce que sa température de fusion est relativement élevée (232°C) et les flans risqueraient d'être endommagés pendant l'opération. Les dépôts d'étain pur sont surtout utilisés lorsque le métal est enlevé après l'opération de morsure pour appliquer le masque de soudure directement sur le cuivre à nu.

L'étain-plomb a l'avantage de pouvoir être refondu à des températures plus basses. Le point eutectique de cet alliage est une combinaison 63% étain et 37% plomb avec une température de 183°C. Mais on a plutôt tendance à utiliser un mélange 60/40 car au point eutectique l'alliage se solidifie trop rapidement et cause des soudure froides. Des combinaisons ayant entre 57% et 65% d'étain donnent des résultats acceptables lors de la refusion (3).

Avant de procéder au dépôt d'étain-plomb sur le flan, il faut d'abord bien le rincer. En effet, toute intrusion de soufre dans le bain d'étain-plomb risque de précipiter le plomb sous forme de sulfate de plomb. Un double rinçage est fortement recommandé. Un bain d'acide fluoborique est aussi incorporé pour enlever les oxydes sur la surface du cuivre et servir de barrière supplémentaire pour les résidus provenant des bains précédents.

L'acide fluoborique est le principal électrolyte du bain d'étain-plomb. Il augmente la conductivité du bain et son pouvoir de pénétration. La source ions d'étain provient de fluoborate stanneux. Les ions plomb proviennent de fluoborate de plomb. De l'acide borique contenue dans un sac sert à prévenir la formation de fluorure de plomb et la décomposition de l'acide fluoborique en acide fluorhydrique, lequel est extrêmement dangereux.

Le bain doit être agité, mais sans air. En effet, l'air oxyde les ions stanneux en ions stanniques, lesquels ne se déposent pas sur la cathode et sont perdus à jamais. Ils n'ont alors plus aucune utilité pour ce bain. L'agitation doit plutôt provenir de la filtration constante du bain ou de l'agitation mécanique de la cathode. Un filtre de Dynel enlève les particules de sulfate introduites par entraînement.

Les anodes suspendues à des crochets de Monel doivent être très pures. Le bain exige un contrôle strict de ses divers ingrédients, surtout des fluoborates d'étain et de plomb, si l'on veut maintenir une proportion constante d'étain-plomb. Certains additifs favorisent un dépôt uniforme, des grains fins et minimisent la formation de dendrites sur la surface du dépôt. Un bon rinçage débarrasse la surface de résidus de fluoborate.

7. Morsure

7.1 Décapage de la réserve

Avec le procédé soustractif, il est maintenant temps de briser la continuité électrique entre les conducteurs pour les isoler les uns des autres. Selon le procédé additif, le point de départ serait un support isolant sans couche métallique. On perce les trous, on applique une réserve sur l'impression non conductrice puis on dépose une couche de cuivre chimique jusqu'à l'épaisseur requise, soit 25 μm dans les trous et sur les traces. Quoique le facteur de pénétration de cette méthode est de l'ordre de 1, la technique n'est pas encore au point et n'a été le sujet d'aucune homologation militaire jusqu'à présent.

La discontinuité électrique doit s'effectuer en enlevant le cuivre joignant chaque conducteur entre eux. Il faut tout d'abord

dégarnir la plaque de circuit imprimé de son épargne de placage. Dans le cas de la sérigraphie, des solvants sont utilisés. Avec les résines photosensibles, le type de solution est le même que celui employé pour le développement: solvant, aqueux, semi-aqueux.

Le principe de fonctionnement de ces solutions est similaire aux révélateurs. La solution chimique pénètre la résine et la fait gonfler. La composition de la solution détermine le mode de décapage. Certaines dissolvent complètement la résine, alors que d'autres la morcèlent en particules de diverses dimensions. Enfin, quelques-unes n'attaquent que l'interface cuivre-réserve (4).

7.2 Facteur de morsure

Quoique la morsure puisse sembler être une opération simple, elle est probablement l'étape la plus critique du procédé de fabrication. Deux problèmes fréquents associés à la morsure sont le surplomb et la morsure sous-jacente. Pendant la morsure, le mordant attaque non seulement le fond du flan (le cuivre recouvrant initialement le support isolant), mais aussi les flancs des traces. Nous obtenons un profil de conducteur tel qu'illustré à la Figure 5. L'excroissance est la partie du recouvrement métallique qui a débordé par-dessus la réserve. Cette situation survient lorsque la réserve n'est pas suffisamment épaisse. La morsure sous-jacente est la rainure sur la paroi du conducteur causée par la morsure. Le surplomb

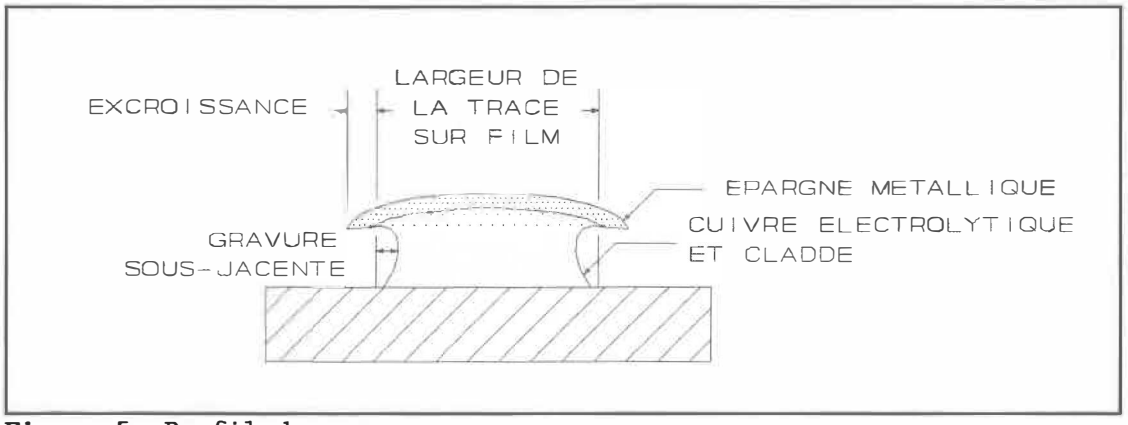


Figure 5. Profil de morsure.

est la somme des deux.

A partir de ce profil, on peut définir un facteur de morsure:

$$\text{facteur de morsure} = \frac{\text{épaisseur du cuivre}}{\text{gravure sous-jacente}}$$

On apprécie souvent la qualité d'une morsure par le facteur de morsure. Plus le rapport est élevé, plus la paroi est droite. L'une des conséquences de la morsure sous-jacente est de réduire la largeur des conducteurs et par ricochet de diminuer la qualité du circuit imprimé. La façon commune de compenser est de définir des conducteurs plus larges sur le schéma de disposition. Une autre conséquence est la formation d'éclats de métal provenant du surplomb qui se brisent et provoquent des courts-circuits entre les conducteurs. La refusion est souvent nécessaire afin de fondre l'étain-plomb et le faire couler le long des parois des conducteurs.

7.3 Les mordants

Plusieurs solutions de morsure peuvent être utilisées sur le cuivre. Parmi les plus populaires on retrouve l'ammoniac alcalin, le chlorure cuivrique et un mélange d'eau oxygénée et d'acide sulfurique. Le chlorure ferrique de même que le persulfate de sodium (qui a délogé le persulfate d'ammonium à cause de la difficulté de traiter ses effluents) font aussi partie des solutions toujours utilisées.

7.3.1 L'ammoniac alcalin

L'ammoniac alcalin domine avec plus de 90% du marché pour la fabrication de cartes de circuits imprimés multicouches et double côté et 20% pour les couches internes (5). Quoique ses rinçures causent un problème de traitement à cause de la forte teneur en ammoniac, ce dernier étant un puissant complexant, ce mordant agit rapidement tout en offrant un bon facteur de morsure. Il est compatible avec la plupart des réserves utilisées, tant organiques que métalliques.

La réaction de base est donnée par:

$$Cu + Cu(NH_3)_4^{2+} \text{ --> } 2Cu(NH_3)_2^{+}$$

$$4Cu(NH_3)_2^{+} + 8NH_3 + O_2 + 2H_2O \text{ --> } 4Cu(NH_3)_4^{2+} + 4OH^{-}$$

On obtient un bon facteur de morsure en maintenant un contrôle strict sur le pH et en utilisant des agents spéciaux surnommés "agents d'atténuation". Ces substances agissent de telle sorte que lorsque le jet de mordant pulvérisé sous pression frappe la surface à angle droit, la force du jet est suffisante pour enlever l'agent et mordre le métal, alors que les parois des conducteurs sont laissées intactes ou presque. Un facteur de morsure de 5 peut ainsi être atteint (6).

Une ventilation adéquate doit être assurée en tout temps. Non seulement les gaz sont-ils très désagréables pour l'opérateur, mais un mauvais contrôle de la ventilation peut apporter un déséquilibre de la solution.

7.3.2 Le chlorure cuivrique

En Amérique du Nord, le chlorure cuivrique est la solution de choix pour près de 80% des couches internes des circuits multicouches. Peu dispendieux et simple d'emploi, il est plus facile de traiter ses eaux de rinçage. Il ne peut être employé sur des circuits comportant de l'étain-plomb car il dissout ce dernier en même temps que le cuivre.

La réaction de base est:

$$Cu + CuCl_2 \dashrightarrow 2CuCl$$

Il est possible d'utiliser les eaux du bain de rinçage immédiatement après la morsure pour regénérer le chlorure de cuivre en ajoutant du chlore à l'état gazeux dans le mordant. Ceci allège beaucoup les besoins de traitement des eaux usées. La solution de morsure peut être vendue pour son contenu en cuivre lorsque la concentration de ce dernier est trop élevée.

7.3.3 Le mélange peroxyde d'hydrogène/acide sulfurique

L'avantage du mélange d'eau oxygénée et d'acide sulfurique est la facilité avec laquelle on peut traiter ses eaux de rinçage et le mordant lui-même. On n'a qu'à abaisser la température du bain pour précipiter le sulfate de cuivre sous forme de cristaux. Il est surtout utilisé pour les bains de micromorsure précédant les bains de cuivrage chimique et électrolytique.

Les équations décrivant la réaction générale sont:

$$Cu + H_2O_2 + H_2SO_4 \text{ --> } CuSO_4(aq) + 2H_2O$$

$$H_2O_2 \text{ --> } H_2O + O_2\uparrow$$

$$CuSO_4(aq) + 5H_2O \text{ --> } CuSO_4 \cdot 5H_2O \text{ (cristal)}\downarrow$$

Alors que la première équation décrit la morsure, une réaction exothermique, la seconde nous indique une réaction secondaire. Le peroxyde d'hydrogène se décompose en eau et en oxygène qui s'échappe sous forme de gaz. Malgré l'utilisation d'inhibiteurs, c'est la raison principale pourquoi ce mordant n'est pas employé dans des machines automatisées à jets sous pression. La troisième équation démontre comment on peut récupérer les cristaux de sulfate de cuivre. Un simple abaissement de température et une addition d'acide sulfurique provoquent cette réaction.

7.4 Refusion

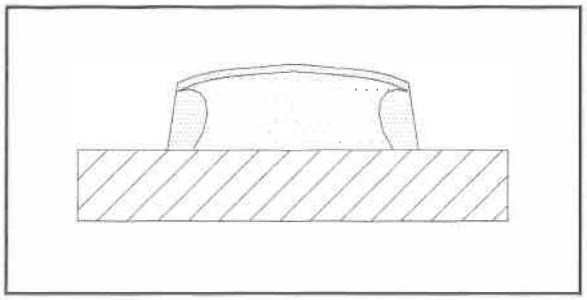


Figure 6. Refusion.

La couche d'étain-plomb déposée sur les conducteurs n'est pas encore un alliage résistant à la corrosion. Pour obtenir cet alliage, il faut faire fondre le métal. En plus de faire couler le surplomb sur les côtés des parois des conducteurs et de nous débarrasser des éclats

d'étain-plomb dangereux pour le bon fonctionnement du circuit imprimé (voir une vue de coupe à la Figure 6), la refusion a d'autres avantages. L'esthétisme du circuit imprimé est meilleure, sa soudabilité est accrue et est conservée pour une période de temps plus longue.

L'immersion dans l'huile chaude et le four convoyeur à infrarouges sont les techniques les plus employées pour faire fondre l'étamage. L'immersion dans l'huile chaude est simple, peu coûteuse et plus douce pour le flan. Elle convient particulièrement bien pour les flans épais, les flans ayant une grande surface de cuivre comme les plans de masse, et les supports isolants composés de PTFE (polytétrafluoroéthylène, communément appelé Téflon).

Le four convoyeur à infrarouges est plus rapide, procure des résultats plus uniformes d'un lot à l'autre et il élimine les risques d'incendie associés à l'huile. Il est efficace pour des productions à grande échelle.

8. Contacts d'extrémité de cartes

Il est parfois intéressant de relier entre elles plusieurs cartes exécutant chacune une fonction spécifique sur un bus. On y parvient au moyen de câbles ou de connecteurs d'extrémité de cartes. Avec ces derniers, on peut insérer et retirer la carte à volonté pour fins de réparation ou de modification. Mais le recouvrement d'étain-

plomb n'est pas assez résistant pour subir les nombreuses insertions et rétractions. On applique plutôt une couche d'or sur les contacts. En plus d'être un excellent conducteur, l'or est très résistant à l'usure et à la corrosion.

Il faut débuter par décaper la couche d'étain-plomb recouvrant les contacts. Après avoir masqué le circuit avec un ruban adhésif juste au-dessus des contacts, on trempe la carte dans une solution corrosive de façon à ce que le niveau du décapeur ne dépasse pas le ruban. Il n'est pas nécessaire de recouvrir de ruban la carte en entier, mais il faut être vigilant pour ne pas éclabousser le reste du circuit avec la solution. Il est bien important que le flan n'aille à la refusion qu'après l'étape de dorure, sinon l'alliage serait beaucoup trop difficile à enlever.

On ne peut procéder à la dorure directement sur le cuivre nu. En effet, le cuivre a tendance à migrer au travers de l'or et s'oxyde éventuellement à la surface. On doit plutôt auparavant appliquer une couche de nickel de 2,5 à 5 μm. Le nickel sert de barrière à la migration du cuivre. Il améliore aussi la résistance de l'or.

Après avoir décapé l'étain-plomb des contacts, on pratique une micromorsure sur les contacts. La solution de décapage attaque aussi le cuivre et laisse une surface ayant des trous. La micromorsure

nivèle et nettoie la surface. Puis, la carte est trempée dans un bain acide de dépassivation avant de procéder au placage du nickel.

Le dépôt électrolytique de l'or se fait préférablement au moyen d'une machine automatisée. Cette dernière assure une épaisseur plus régulière de l'or sur les contacts. Les dépôts manuels ont tendance à déposer plus d'or au milieu des contacts qu'aux extrémités. L'or étant un métal très dispendieux, on évite d'en déposer inutilement à certains endroits pour arriver partout à l'épaisseur requise de 0,6 à 1,2 μm.

9. Finition

La fabrication du circuit imprimé arrive maintenant à sa fin. Nous avons en notre possession un flan contenant un ou plusieurs circuits imprimés dont seulement l'impression conductrice est métallisée. Il ne reste plus qu'à protéger le circuit imprimé contre les intempéries, couper les cartes à la dimension voulue et effectuer des tests pour vérifier la qualité de la carte.

9.1 Masque de soudure

Le masque de soudure est un vernis polymérisable devant restreindre l'application de la soudure aux endroits prescrits, soit les pastilles des trous devant éventuellement recevoir des composants

électroniques. Son application est très similaire aux réserves de placage décrites précédemment: impression par écran, films photosensibles secs ou liquides. Le masque de soudure sert aussi dans bien des cas comme protection permanente contre l'environnement.

Une technique de plus en plus populaire consiste à décaper complètement le flan de sa réserve de morsure et d'appliquer le masque de soudure directement sur le cuivre à nu. Les résultats sont nettement supérieurs à ceux obtenus avec une couche d'étain-plomb laissée en permanence sur la carte. En effet, lorsque la carte est soumise à la soudure à la vague, le vernis a tendance à plisser sur l'étain-plomb fondant. Les résultats sont parfois inacceptables.

9.2 Découpage

Chaque circuit imprimé sur le flan est découpé selon les dimensions requises. La cisaille a été utilisée pour découper le flan dans le matériau de base, mais ici une détoureuse donne une coupe beaucoup plus nette et précise pour la découpe finale. Elle permet aussi de chantourner des profils internes sur la carte.

Certaines perceuses numériques sont équipées pour servir aussi de détoureuse. Elles sont intéressantes pour les fabricants de prototypes qui n'ont pas un débit assez élevé pour faire fonctionner la

perceuse à temps plein. Elles offrent une économie d'espace appréciable.

On peut aussi utiliser une scie pour découper le contour avec précision et clarté, mais elle est peu commode pour les coupes non rectilignes. La détoureuse est le seul outil efficace pour les contours irréguliers sur la carte. Les contacts d'extrémité de carte et le détrompeur ne peuvent être faits qu'à l'aide d'une détoureuse.

SECTION II

FABRICATION DE CARTES MULTICOUCHES

10. Introduction

Les cartes de circuits imprimés multicouches sont devenues progressivement nécessaires avec l'évolution croissante des circuits intégrés. Les temps de réaction de ces derniers étant constamment raccourcis, il fallait trouver une solution pour diminuer la longueur des chemins reliant les différents composants afin que les traces de cuivre demeurent purement résistives. Parmi les situations où il est avantageux d'utiliser des cartes multicouches comparativement aux cartes double face ou à d'autres méthodes d'interconnexion, on retrouve:

1. limitations de poids et d'espace,
2. raccourcissement des interconnexions entre les composants,
3. traces à impédance contrôlée,
4. diminution de la diaphonie,
5. lorsque l'utilisation d'un plan de masse est nécessaire,
6. et autres.

Une carte multicouche est ni plus ni moins qu'une succession de circuits superposés, simple ou double face, électriquement reliés entre eux et dont la concordance entre chaque couche est étroitement contrôlée. Les couches internes sont faites d'un matériau flexible, parfois rigide, et sont collées les unes aux autres pour finalement former une carte de circuits imprimés multicouche.

11. Préparation des couches internes

La fabrication des couches internes dépend du type de carte multicouche. On retrouve deux types de liaisons entre les couches. Il y a d'abord les trous traversant la carte de part en part. Ces trous ne sont pas obligatoirement connectés à chacune des couches. Mais certaines conceptions ne peuvent accepter qu'un trou les traverse sans connexion à cause de l'espace vital ainsi perdu pour le parcours des traces. On utilise alors différents types de trous. Ces trous n'ont qu'une seule, et parfois aucune, extrémité en contact avec une couche externe. Le procédé de fabrication diffère quelque peu pour chaque type de construction.

11.1 Carte multicouche avec trous transversaux de part en part

Dans la majorité des cas, les trous traverseront tous la carte de part en part. Cette façon de procéder est la plus simple et la

moins coûteuse. Il suffit d'abord de nettoyer les flans dans une solution d'acide sulfurique puis de les poncer. Le but du ponçage est de modifier la topographie de la surface du cuivre afin de fournir à la réserve un meilleur support d'ancrage. La résine photosensible est ensuite laminée à chaud et sous pression puis insolée sous contretype négatif et développée. Notons qu'aucun trou n'a été percé jusqu'à présent.

Rarement recourra-t-on à la sérigraphie pour l'impression des couches internes car la densité des traces est telle que nous ne pourrions pas obtenir la définition requise. Seules les résines photosensibles sous forme de films secs ou liquides seront employées.

Suite au développement de la résine photosensible, le flan sera immergé dans une solution de chlorure ferrique ou de chlorure cuivrique. Ces mordants ont l'avantage de ne pas contenir de chélates, ce qui facilite le traitement des effluents. Ils ont la propriété de pouvoir fonctionner avec une grande concentration de cuivre en solution et ont un taux de morsure intéressant. On procédera ensuite au décapage de la résine. Le flan est à toutes fins pratiques prêt pour le traitement de conversion de surface.

11.2 Carte multicouche avec trous ensevelis ou borgnes

Lorsque les trous traversent chaque couche de la carte mais ne sont en réalité connectés qu'à quelques couches seulement, ils enlèvent un espace important pour le parcours d'autres traces. Il arrive donc que certains trous ne traversent que certaines couches spécifiques. Ces trous sont alors désignés sous le nom de trous ensevelis et borgnes. Un trou enseveli est un trou dont aucune des extrémités n'a de connexion avec une couche externe alors qu'un trou borgne n'a qu'une seule extrémité en contact avec une couche externe. Certaines de ces possibilités sont illustrées à la Figure 7. Il va de soi que la fabrication de ces types de cartes est plus compliquée. Ces types de construction sont surtout utilisés lorsque la densité des traces est très élevée.

Pour la fabrication de cartes avec trous ensevelis, il s'agit d'abord de fabriquer les couches internes spécifiques devant être reliées entre elles par un ou plusieurs trous ensevelis tel que décrit à la section 11.1, de faire le traitement de conversion, de les accoster et de les presser. On considère ensuite ce sous-ensemble comme une carte de circuit imprimé double face. Elle passe ensuite par toutes les étapes déjà décrites, du perçage au décapage de l'étamage, en passant par la métallisation des trous, la galvanoplastie et la morsure. Le décapage de l'étamage est nécessaire si d'autres couches doivent être collées à ce sous-ensemble, sinon la

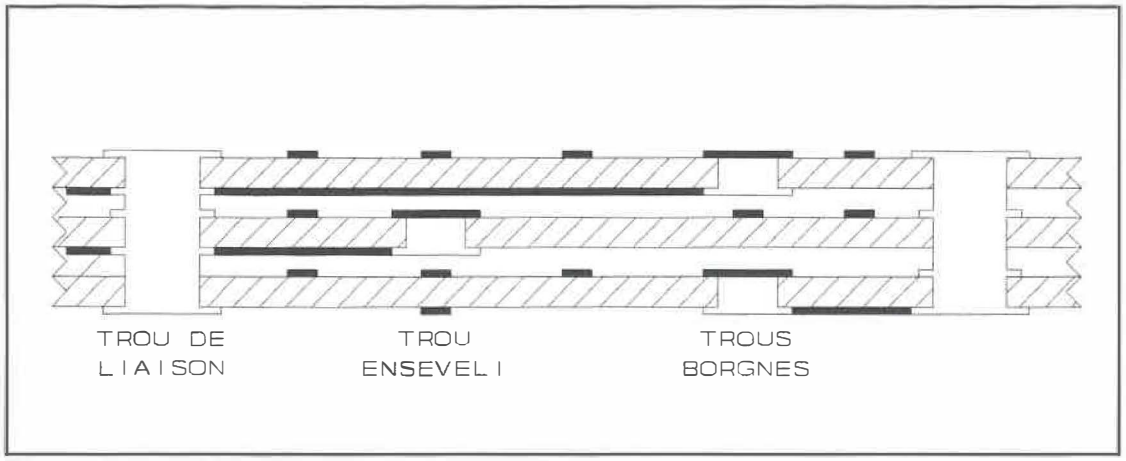


Figure 7. Différentes constructions possibles de cartes multicouches.

carte subirait une exfoliation lors de la refusion ou de la soudure à la vague.

Il existe une alternative pour la fabrication de ce sous-ensemble. Une fois les couches accostées et pressées, les trous sont percés puis on procède immédiatement à la métallisation des trous avant même d'y appliquer une réserve. On dépose ensuite une couche de cuivre électrolytique sur la totalité de la carte. Ce n'est qu'après cette étape qu'une résine photosensible positive est laminée sur le flan. La morsure s'effectue dans une solution de chlorure ferrique ou de chlorure cuivrique. L'inconvénient de cette technique est la sévérité de la gravure sous-jacente. En effet, l'épaisseur de cuivre à mordre est supérieure à celle que l'on retrouve lorsqu'une réserve de morsure métallique est utilisée. Par contre, l'étape de décapage de la réserve métallique après la morsure est éliminée. Il est évident que cette technique ne peut être employée sur des traces

fines. Si les trous touchent à plus de deux couches de cuivre, il faudra procéder au déglaçage des trous afin d'enlever les coulées de résine résultant du perçage.

La construction de cartes comprenant des trous borgnes est un peu plus compliquée. L'une des techniques consiste à percer les trous borgnes sur les couches externes puis les accoster avec les autres couches internes de la carte. On doit alors employer des techniques de déglaçage au plasma et de dépôt de cuivre par procédé additif plutôt qu'électrolytique pour parvenir à déglacer et à métalliser ces trous. Les techniques régulières nécessitent une circulation de liquide dans les trous.

Une technique différente pour les trous borgnes débute par l'emploi d'un stratifié mince dans lequel les trous borgnes sont percés puis métallisés. Par la suite, seule la couche qui se retrouvera à l'intérieur du stratifié est recouverte d'une réserve puis mordue. Lorsque tous les sous-ensembles de la carte ont été fabriqués, ils sont accostés et pressés ensemble. La carte multicouche peut maintenant être traitée comme une carte double face si ce n'est qu'il faudra y rajouter des opérations de déglaçage et optionnellement de gravure en retrait pour remédier aux dégâts causés par le perçage sur les anneaux de cuivre des couches internes. Les trous borgnes et ensevelis sont surtout employés avec les composants montés en surface.

11.3 Traitements de conversion de surface

Il a été réalisé depuis longtemps que la résine servant à coller les couches internes ensemble donne de piètres résultats sur le cuivre. En effet, les métaux purs adhèrent difficilement aux polymères. De plus, le cuivre sur ces couches est bien souvent celui qui a été laminé sur le support isolant. Sa surface est extrêmement lisse et ne fournit que très peu de points d'ancrage à la résine. Par contre, l'adhérence des surfaces de contact résine-résine est excellente.

Pour pallier à ce problème, les fabricants ont développé des traitements de conversion de surface. Ces systèmes sont faits à base de solutions oxydant la surface de cuivre. Ces solutions contiennent généralement du chlorite de sodium ($NaClO_2$) comme oxydant et de l'hydroxyde de sodium comme stabilisateur dans une solution aqueuse à des températures assez élevées. La surface oxydée devient alors fortement rugueuse et procure plusieurs points d'ancrage pour la feuille préimprégnée de résine à l'état B.

Malheureusement, la couche d'oxyde, qui ressemble étrangement à du velours, est mécaniquement faible. Une simple pression des doigts est suffisante pour la faire disparaître. De plus, lors du pressage, il arrive que l'oxyde s'écrase sous la pression et la chaleur de telle sorte que la résistance d'adhésion entre la feuille préimpré-

gnée et le cuivre est parfois inférieure après l'application de l'oxyde.

Pour rajouter au problème, une fois la carte multicouche stratifiée et percée, les acides dans lesquels la carte est trempée, principalement lors de la métallisation des trous, attaquent la couche d'oxyde à l'intérieur des trous, donnant naissance au phénomène des «anneaux roses». Ces acides concentrés diluent la couche d'oxyde de telle sorte qu'il y a un mince espace libre entre le cuivre et la feuille préimprégnée. Les conséquences sont fâcheuses, allant jusqu'à l'exfoliation de la carte.

Alors pourquoi continuer à utiliser ces produits? Simplement parce qu'à l'heure actuelle il n'y a aucun produit disponible sur le marché pouvant remplacer les oxydes. Aussi, l'oxyde remplit tout de même un rôle en tant que barrière contre la migration du cuivre dans le support isolant. Le cuivre réagit avec certains composants ou produits de décomposition des supports isolants. Par exemple, le cuivre peut entrer en compétition avec les amines contenues dans les agents durcisseurs des résines d'époxyde. Ces réactions chimiques et physiques, aggravées par le cycle thermique, peuvent se perpétuer pour la vie du produit, provoquant éventuellement des fautes de fonctionnement (7).

Récemment, la compagnie DuPont a mis au point un nouveau procédé sous le nom de DuraBOND™ que plusieurs considèrent comme révolutionnaire. Il vise à remplacer totalement le traitement à l'oxyde et tous ses maux de tête. DuPont a fait appel à D.E.M. Controls pour le développement de machines à convoyeur horizontal spécifiquement conçues pour ce procédé.

Le procédé se divise en 4 étapes (8): nettoyage, micromorsure, immersion dans l'étain, post-traitement. Un bon rinçage sépare chaque phase. Le nettoyeur alcalin est spécialement formulé pour enlever toutes traces de souillures et les résidus tenaces de résine photosensible. La micromorsure s'effectue dans un mélange de poudre de monopersulfate, d'eau et d'acide sulfurique. Il procure une surface uniforme avec un taux de morsure prévisible.

Le dépôt galvanique d'étain peut se faire par immersion ou par vaporisation. Une épaisseur de près de 0,2 μm est atteinte en 1 à 4 minutes. Le dépôt est si mince qu'il épouse parfaitement la topographie du cuivre. Bien que l'étain fonde à une température inférieure au choc thermique des tests d'approbation (232°C et 288°C) et que l'on pourrait conséquemment s'attendre à une exfoliation de la carte, il n'en est rien. En effet, le cuivre et l'étain s'unissent pour former du bronze dont la température de fusion est nettement supérieure à celle du choc thermique.

Tableau I. Comparaison de la résistance d'adhésion des différents procédés de conversion de surface du cuivre.

	EPOXYDE		POLYIMIDE	
	après presse	vieilli	après presse	vieilli
DuraBOND™	7-8	5-7	2-4	2-4
oxyde brun	6-8	3-5	0-3	0-2
oxyde noir	3-5	1-3	0-1	0-1
cuivre nu	1-2	0-1	0-1	0-1

Note: Les unités de mesure employées lors de cette étude étaient en livre/pouce. Le vieillissement simule les multiples étapes où une carte multicouche est exposée à la chaleur après la stratification. Il est d'une période de 6 heures à 180°C pour l'époxyde et de 6 heures à 220°C pour le polyimide.

L'étain en lui-même adhère difficilement à la feuille préimprégnée. Il faut trouver une interface adéquate pouvant renforcir le lien. Un silane remplit très bien cette fonction. Avec une résine d'époxyde, l'emploi du silane accroît la résistance d'adhésion de 0,66 à 1,13 kg/cm alors qu'avec le polyimide elle passe de 0,04 à 0,5 kg/cm.

L'avantage du DuraBOND™ sur le dépôt d'oxyde est avant tout l'élimination des anneaux roses, véritable fléau dans l'industrie. L'exfoliation des cartes multicouches provoquée par les anneaux roses donne d'imposants taux de rejets à une étape avancée de la production. Le Tableau I compare les données obtenues par DuPont pour différents procédés. On peut voir que DuraBOND™ est moins affecté par le vieillissement et qu'il adhère beaucoup mieux au polyimide que les dépôts d'oxyde conventionnels.

12. Accostage

Une fois la préparation des couches internes complétée, il faut songer à les superposer. Cette opération requiert beaucoup de minutie et d'attention pour maintenir la concordance entre les couches. L'ordre de déposition des différentes composantes a une importance primordiale. La Figure 8 illustre cet ordre.

Tout d'abord, il faut des plaques de pressage. Elles permettent de superposer les couches de la carte dans un endroit isolé de la presse où la température et le taux d'humidité sont relativement bas. Une fois les cartes montées, sur les plaques de pressage, l'assemblage est introduit entre les plaques de la presse pour leur stratification. Les plaques de pressage comportent des chevilles d'assemblage qui serviront au montage des éléments de la carte. Ces chevilles sont situées exactement en concordance avec les trous de montage qui ont été préalablement percés dans le flan. Ces trous, un minimum de trois, seront situées de préférence au centre de chacun des côtés en bordure du flan. Les chevilles empêcheront les diverses couches de bouger l'une par rapport à l'autre. Lorsqu'elles sont centrées en bordure des côtés, elles minimisent le déplacement des couches en le restreignant autour de ce point central.

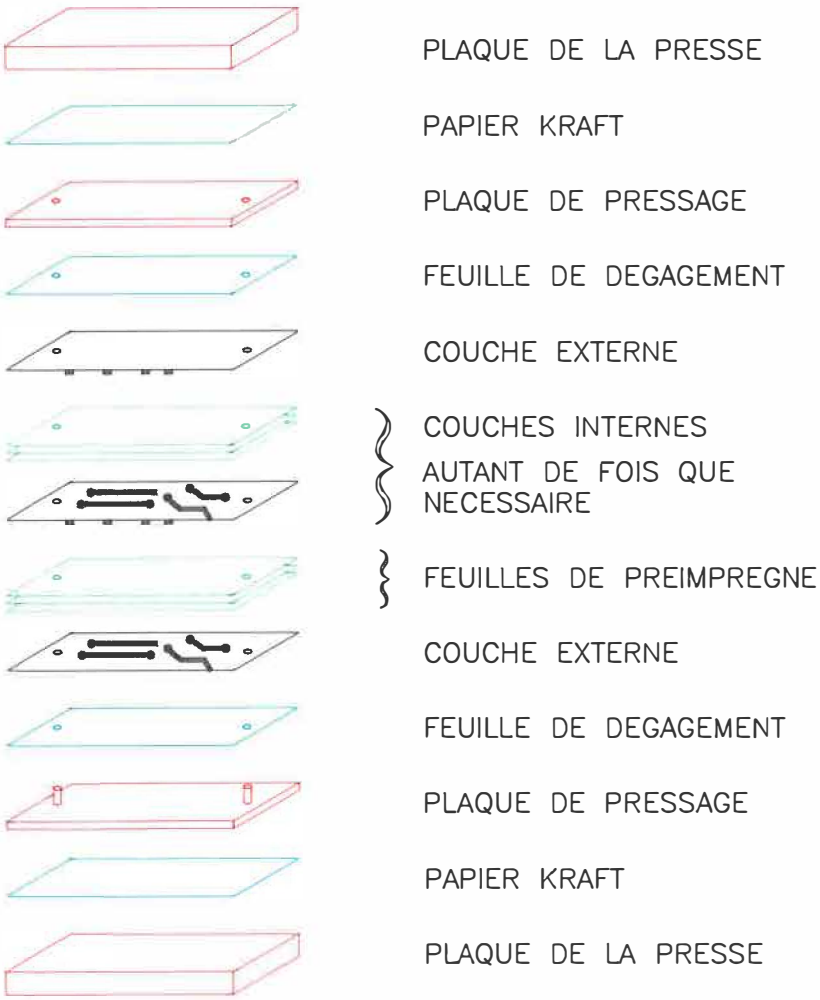


Figure 8. Accostage.

Les plaques de pressage servent aussi à mieux distribuer la chaleur provenant des plaques de la presse et à prévenir les chocs thermiques causés par un démarrage à chaud de la presse. Elles sont faites d'acier de 6 mm d'épaisseur pour prévenir toute distorsion et pour s'assurer d'une masse thermique suffisante pour jouer le rôle de diffuseur thermique. Elles devraient être environ 5 cm plus grandes que le flan pour éviter que la résine ne rejoigne les plaques de la presse. L'acier choisi doit avoir un coefficient de dilatation thermique voisin de celui d'un composé de verre et de résine d'époxyde, afin de diminuer les contraintes induites sur le flan lors du pressage. Les taux de dilatation thermique des matériaux doivent demeurer le plus près possible.

Il n'arrive que très rarement que la distribution du cuivre à l'intérieur d'une carte procure une répartition uniforme de la chaleur. Aussi, si plusieurs cartes doivent être empilés entre les plaques de la presse, il faudra les séparer par une mince feuille d'acier inoxydable d'environ 2 mm d'épaisseur. La surface des séparateurs doit être très lisse car sa topographie est transférée à la carte sous la pression et la chaleur.

Des feuilles préimprégnées de résine à l'état B sont placées entre les diverses couches de la carte et servent à les unir entre elles. Ces feuilles doivent être entreposées dans un endroit frais et à l'abri de l'humidité (10°C et 50% HR) à cause des propriétés

hygroscopiques de la résine. Lors de l'application de la chaleur et de la pression par la presse, la résine se liquéfie et coule à l'intérieur de la carte pour enrober les traces et chasser l'air emprisonné.

L'application continue de la chaleur entraîne la polymérisation et la réticulation de la résine. Il faut s'assurer qu'il y ait assez de matériel pour ne pas laisser d'endroits dépourvus de résine. C'est pourquoi plus d'une feuille est utilisée entre les couches. Une fois les liens chimiques et physiques complétés, la chaleur est d'abord diminuée jusqu'à ce que la température soit bien inférieure à celle de la température de transition vitreuse, ceci afin d'éviter le vrillage du flan. Ce n'est qu'ensuite que la pression sera retirée et que le débordement de résine autour des flans sera enlevé. Les flans sont alors prêts pour le perçage.

Un agent de dégagement est appliqué entre les plaques de pressage et les couches externes de la carte. Le plus souvent, ce sera une feuille de Téflon ou un film de Tedlar. Des feuilles de papier Kraft sont aussi optionnellement disposées entre les plaques de la presse et les plaques de pressage pour contrôler le taux de transfert de chaleur de la presse vers les flans.

Les caractéristiques de la presse doivent accommoder les matériaux de construction de la carte multicouche qui seront employés.

La majorité des résines d'époxyde requièrent des pressions allant de 1,7 à 2,4 MPa (250-350 psi) et des températures de 175 à 190°C. Le nombre d'ouvertures détermine en grande partie la capacité de la presse. La surface des plaques de la presse doit être 5 cm plus longue que la grandeur maximale que l'on désire produire. On spécifie souvent la force maximale que peut fournir une presse plutôt que la pression puisque cette dernière varie en fonction de la surface de la carte.

13. Déglaçage

Le fluage de la résine est un problème insidieux et particulier à la fabrication de cartes multicouches. Le perçage de cartes multicouches s'effectue souvent à des vitesses de rotation atteignant de 45 000 à 120 000 RPM. A de telles vitesses, la friction du foret sur les parois du trou provoque le ramollissement de la résine d'époxyde qui a tendance à couler le long du trou. Cette mince pellicule a une adhérence médiocre sur le stratifié et recouvre même les anneaux de cuivre des couches internes, causant une isolation électrique et empêchant la métallisation adéquate du trou.

Il faut traiter les flans afin d'enlever ce film nuisible. A l'heure actuelle, il existe quatre méthodes connues pouvant «dissoudre» la résine sans effets secondaires majeurs sur la carte: l'acide

sulfurique, l'acide chromique, le permanganate de potassium et le déglaçage au plasma.

Pour respecter certaines normes militaires, il faut à l'occasion pousser plus à fond le déglaçage. Il s'agit alors d'une gravure en retrait. Son effet est plus prononcé que le déglaçage en ce sens qu'elle découvre légèrement la surface horizontale des pastilles en dissolvant plus de résine. La surface accrue de cuivre découvert augmente l'adhérence du cuivre chimique sur la paroi du trou. Puisque des fibres de verres demeurent protubérantes, il faut adjoindre une étape de morsure de verre après la gravure en retrait. L'évolution de cette étape est illustrée à la Figure 9.

13.1 L'acide sulfurique

L'acide sulfurique concentré fut l'une des premières méthodes à être utilisée et est largement dominante dans l'industrie. Ce procédé est peu dispendieux et est très efficace à dissoudre la résine.

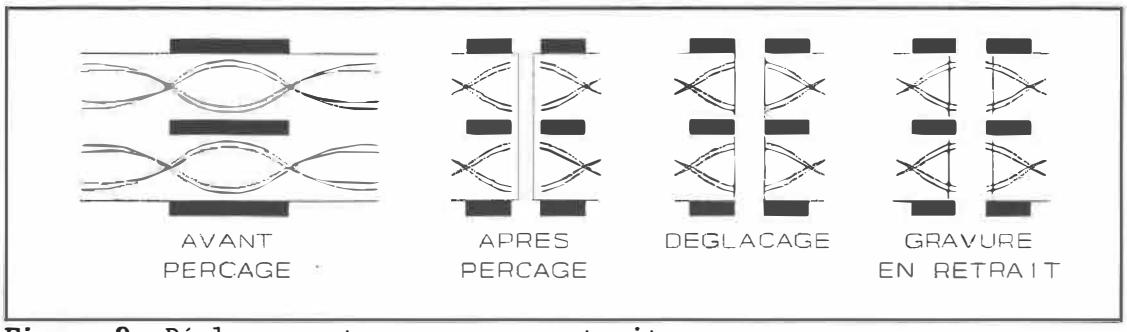


Figure 9. Déglaçage et gravure en retrait.

Une immersion de 30 secondes à température ambiante est suffisante. Malheureusement, son emploi amène plusieurs inconvénients.

Premièrement, l'acide sulfurique concentré, dont la concentration doit être supérieure à 90%, est hygroscopique ce qui conduit à une dilution rapide du bain par l'absorption de l'humidité de l'air et à une vie utile courte.

Ensuite, la rapidité de la réaction est telle que cela devient un inconvénient. Il est difficile de la contrôler et d'obtenir des résultats consistants. Le temps que les flans sont suspendus au-dessus du bain pour leur permettre de s'égoutter est suffisant pour provoquer une dissolution accrue de la résine sur le côté inférieur du trou.

L'acide sulfurique n'attaque que la résine et laisse intactes les fibres de verre protubérantes. Le cuivre chimique n'adhère que très difficilement à la fibre de verre, provoquant une défaillance du trou. L'acide pénétrant la résine est déplacé par l'eau lors du rinçage subséquent. Quoique l'acide sulfurique soit soluble dans l'eau, la résine ne l'est pas du tout. Il s'ensuit une précipitation de la résine sous forme de résidus sulfonés gélatineux sur les parois du trou, nuisant encore plus à l'adhérence du cuivre chimique (9).

13.2 L'acide chromique

L'attaque de la coulée de résine par l'acide chromique est plus lente et procure ainsi un meilleur contrôle sur le procédé. Les résultats sont constants et prévisibles. Pourtant, les manufacturiers sont réticents à l'utiliser pour les à-côtés qui lui sont associés.

Les déversements contenant du chrome hexavalent sont fortement réglementés. Leur élimination dans les eaux usées occasionne des problèmes suffisamment importants pour en tenir plus d'un à l'écart de ce produit. Le chrome hexavalent est aussi un poison pour le bain catalyseur du dépôt de cuivre chimique. L'adhérence du cuivre chimique à une surface ayant été traitée avec une solution de chrome est médiocre.

13.3 Le permanganate de potassium

Eliminant la majorité des problèmes des autres procédés humides, le permanganate de potassium gagne lentement la faveur populaire. La longévité du bain peut être prolongée pour de très longues périodes en dosant l'addition continuelle d'une solution régénératrice au bain de permanganate.

L'opération de déglaçage se fait en trois phases (10). La première consiste en un sensibilisateur faisant gonfler la résine par l'immersion des flans dans un bain de solvant organique. Des surfactants nettoient la surface du diélectrique des débris du perçage alors que des agents polarisants la conditionnent pour favoriser l'attaque de la solution de permanganate. Un double rinçage en cascade est nécessaire pour éviter tout transport de cette solution dans le bain oxydant.

Le permanganate de potassium est un puissant oxydant arrêtant l'action du sensibilisateur et attaquant la résine. La réaction est relativement lente, augmentant le contrôle sur le procédé. La topographie finale de la surface du diélectrique est microporeuse. Les produits de dégradation sont facilement éliminés par un double rinçage en cascade.

Le neutralisateur réduit les composés de manganèse en résidus solubles et enlève les oxydes de la surface du cuivre. Optionnellement, un additif permet de faire une gravure en retrait (Figure 9). Cette mesure est surtout requise par les militaires. Pour des raisons de fiabilité et de qualité du produit, il est nécessaire de pousser plus avant le déglaçage en grugeant une épaisseur supplémentaire de 10 à 20 microns dans le support isolant. Les dépôts subséquents de cuivre chimique et électrolytique y trouvent un meilleur appui pour leur adhérence à la paroi du trou.

Ce procédé ne peut être employé sur les supports isolants ayant un adhésif à base d'acrylique, comme c'est le cas avec les flex-rigides qui sont une combinaison de verre époxy et de polyimide. Le permanganate attaque préférentiellement l'acrylique par rapport au polyimide, conduisant à un éventuel décollement interlaminaire.

13.4 Le déglaçage au plasma

Technique datant d'à peine un peu plus de 10 ans, le déglaçage au plasma est un procédé sec peu répandu principalement à cause des investissements initiaux énormes qu'il requiert. Le prix de ces unités varie de 100 000 à 200 000 dollars américains selon leur capacité et leur degré d'automatisation.

Le procédé se fait en trois phases: formation d'un gaz plasma contenant des ions chimiquement actifs ou radicaux, réaction du polymère avec ces réactifs et enlèvement des produits de réaction.

Dans une enceinte à vide, on introduit un mélange d'oxygène O_2 et de tétrafluorure de carbone CF_4. Un champ électrique à haute fréquence ionise les gaz, brisant ainsi les liens moléculaires. On obtient du fluor et des radicaux d'oxyfluor. Une fois formés, les radicaux entrent en contact avec la chaine de carbone du polymère du support isolant, brisant le polymère en molécules d'eau, bioxyde de

carbone et en acide fluorhydrique, lesquels sont volatiles et se transforment en gaz à la pression d'opération du procédé (11). Il semblerait que l'oxygène attaque principalement la résine et que le silicium constituant la fibre de verre soit attaqué par le fluor.

L'inconvénient de ce procédé est un résidu sous forme de cendres dans les trous laissant la surface de la paroi inerte. Le dépôt de cuivre chimique subséquent ne peut y adhérer que difficilement. Sur certains modèles, la très grande dépendance de la localisation du trou dans l'enceinte conduit à un manque d'uniformité sur un même flan et d'un flan à l'autre.

SECTION III

TESTS

14. Introduction

La complexité croissante des circuits, principalement les circuits multicouches, oblige les manufacturiers de cartes de circuits imprimés à détecter le plus tôt possible toute anomalie pouvant empêcher la carte de fonctionner correctement. Il est généralement admis que les coûts de détection et de réparation des fautes décuplent à chaque niveau d'assemblage de la carte. Ainsi, de $0,50 que peut coûter une faute sur une carte sans composant, la même faute sur une carte en service peut grimper jusqu'à 500 $. Dans certains cas, la faute ne peut être réparée. On n'a qu'à penser aux satellites en orbite pour s'en convaincre. Dès lors est-il nécessaire d'insister sur l'importance de détecter et de corriger une faute le plus tôt possible après sa création.

L'attention que requiert l'inspection d'une carte de la part d'un humain est telle que sa concentration diminue rapidement dans le temps, entraînant une augmentation des erreurs passant inaperçues. Angstenberger (12) cite que la capacité de détecter un défaut décroît exponentiellement avec le temps, à un tel point qu'après une heure

d'inspection intense 70% des fautes existantes ne seront pas identifiées. De plus, la finesse des conducteurs de certaines cartes à forte densité empêche l'oeil humain d'être efficace quel que soit l'appareil servant à amplifier l'image. C'est pourquoi les machines pouvant effectuer ce travail monotone connaissent un essor considérable depuis quelques années. Deux types d'équipement ont été développés pour répondre à ce besoin. Le premier effectue des tests électriques sur la carte alors que le second vérifie ses caractéristiques géométriques.

15. Les analyseurs de cartes dénudées

Les analyseurs de cartes sans composant vérifient l'intégrité électrique de la carte. Ils permettent de détecter les courts-circuits, les circuits ouverts sur une trace ainsi que les fuites entre pastilles ou conducteurs causées par la contamination ionique. D'après Hroundas (13), la répartition des fautes électriques sur une carte s'illustre selon la Figure 10. La majorité des analyseurs de cartes sans composant utilise les "lits à clous" pour établir un contact électrique avec la pastille à vérifier. Ils ressemblent étrangement aux tapis de clous qu'utilisent les fakirs. Un mécanisme pneumatique ou à vide exerce une pression sur le circuit sous analyse pour le pousser sur les sondes à ressort.

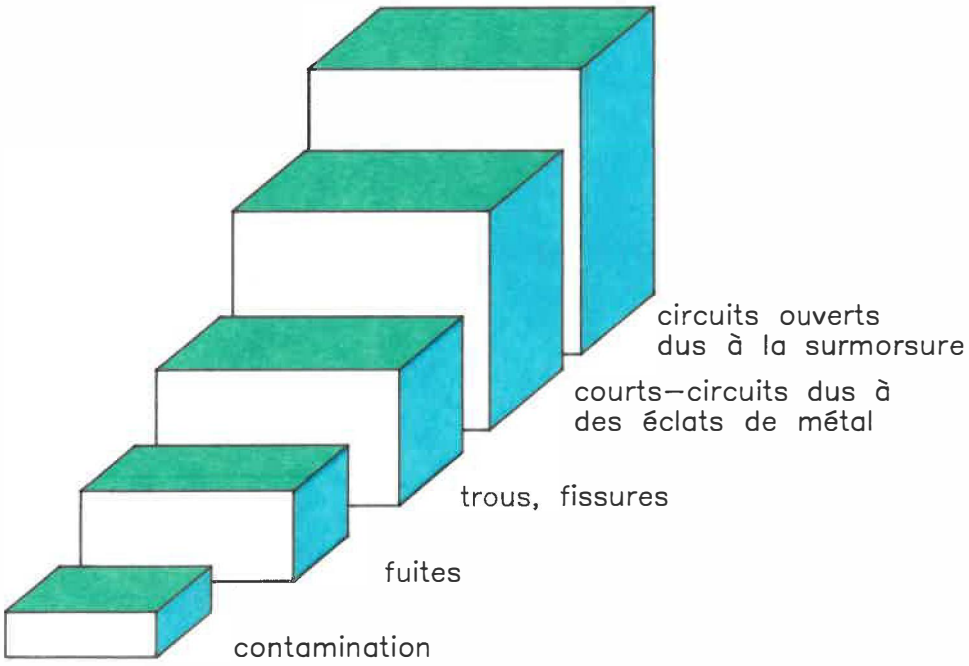


Figure 10. Distribution relative des fautes sur une carte sans composant.

Leur simplicité de fonctionnement a permis leur vaste distribution. Ils permettent de vérifier la continuité des mailles et l'isolation entre chacune d'elles en un laps de temps relativement court grâce à des commutateurs électroniques. Différentes tensions sont utilisées par ces analyseurs, mais l'étude du pour et du contre des diverses théories s'y rapportant sort du cadre de ce texte. Suffit-il de dire qu'il est préférable de détecter un court-circuit avec une basse tension (≈40 V) et une faute d'isolation à plus haute tension (≈250 V).

Le coût de préparation d'un lit à clous s'élève à quelques centaines de dollars. Lors de la fabrication de prototypes, ce coût ne peut pas être amorti sur plusieurs cartes comme en production, ce qui rend les tests prohibitifs dans plusieurs cas. C'est pourquoi certains manufacturiers ont développé un système différent. Il consiste en un robot muni de deux sondes mobiles. Deux facteurs jouent en faveur du robot. Premièrement, il évite les coûts de préparation du lit à clous. Ensuite, avec la venue des nouvelles familles de composants dont les broches ne sont plus séparées du 2.5 mm (0.1") standard mais de 1.25 mm et 0.63 mm, les coûts pour peupler et préparer un lit à clous avec autant de sondes deviennent exorbitants.

Le robot n'est pas restreint à des points de grille, ce qui lui confère beaucoup de souplesse. Le prix à payer pour cette flexibilité est une perte de vitesse pour l'exécution des tests; le temps

d'exécution peut passer de quelques secondes à plus d'une heure dans certains cas.

16. L'inspection visuelle automatique (IVA)

Les analyseurs d'intégrité électrique ne peuvent détecter certaines anomalies, telles deux pastilles trop rapprochées ou un conducteur surmordu. De plus, les couches internes des circuits multicouches sont trop délicates pour résister à la piqûre des sondes de ces analyseurs. Les systèmes d'inspection visuelle automatique ont donc évolué pour répondre à ce besoin.

Leur principal attribut est de vérifier l'intégrité géométrique de la carte. Ils signalent les violations des règles de design (proximité des pastilles et des conducteurs entre eux, largeur des traces, etc.), les éclats de métal provoquant un court-circuit, les traces discontinues causant un circuit ouvert, etc. Ils peuvent aussi servir à analyser l'outillage photographique. Ceci est particulièrement intéressant lorsque le fabricant n'a aucun contrôle sur l'outillage photographique qui lui est soumis.

Les manufacturiers de systèmes d'inspection visuelle automatique utilisent à ce jour trois méthodes d'analyse:

1) La **méthode de référence**: la carte sous analyse est comparée à une référence. Cette référence peut être fournie soit par une "carte en or", i.e. une carte que l'on sait sans défaut, soit par les données provenant du système de CAO ayant servies à la conception de la carte. Cette méthode exige un alignement très précis de la carte à analyser sur l'analyseur pour éviter de fausses alarmes.

2) La méthode selon les **règles de design**: un ensemble de règles de design (largeur(s) de traces minimale(s) et maximale(s), diamètre des pastilles, distance entre les pastilles, etc.) sont entrées dans l'unité centrale de l'analyseur. La carte sous test est analysée en fonction de ces règles quel que soit le design particulier du circuit. Deux circuits totalement différents pourraient utiliser le même ensemble de règles. Cette méthode risque d'ignorer certaines fautes comme un pont entre deux traces qui serait de la même largeur qu'un conducteur ou encore de signaler une faute intentionnelle de la part du concepteur.

3) La troisième méthode est une combinaison des deux premières. C'est elle qui obtient le plus grand succès, signalant les violations de design et minimisant les fausses alertes.

Tableau II. Comparaison des analyseurs.

	électrique	IVA
court-circuit	x	x
circuit ouvert	x	x
fuite entre pastilles	x	
fissure du canon	x	
largeur de traces incorrectes		x
trous minuscules		x
microfissures		x
surmorsure		x
morsure de souris		x

Somme toute, les deux types d'analyseurs sont nécessaires et se complémentent l'un et l'autre. L'analyseur d'intégrité géométrique joue un rôle important lors des étapes initiales de la fabrication. Il permet d'identifier les fautes potentielles qui sont très coûteuses si l'on attend trop longtemps pour les réparer, surtout dans le cas de cartes multicouches après l'accostage et la stratification des couches. L'analyseur d'intégrité électrique effectue une analyse finale du circuit à la fin de la fabrication. Il est le seul pouvant détecter une fissure des trous métallisés, les bris de continuité entre les couches et les fuites dues à la contamination de surface.

SECTION IV

BESOINS MATERIELS

17. Introduction

Après ce bref aperçu général sur la fabrication d'une carte de circuits imprimés, il est évident que le nombre des différentes étapes est imposant. Chacune d'elles est plus ou moins critique. Tout demeurerait relativement aisé si nous pouvions nous en tenir à de simples cartes double face. Or, avec la complexité croissante des circuits intégrés et les nouvelles générations de circuits à intégration à très haute échelle (ITGE), le nombre de traces que doit accommoder une carte augmente lui aussi de façon impitoyable. Les solutions à cette situation sont tri-dimensionnelles dans l'espace. La première option consiste à augmenter la surface de la carte et/ou diminuer la largeur des conducteurs. La deuxième joue avec la troisième dimension de la carte, i.e. modifier son épaisseur en ajoutant de nouvelles couches internes où circulent les conducteurs. Cette dernière solution est de plus en plus populaire car elle permet de maintenir le concept de miniaturisation tant associé avec l'électronique en plus de conserver le contrôle sur certains paramètres comme l'impédance des conducteurs par exemple. La proportion de cartes

multicouches produites dans l'industrie ne fait que grandir. On l'évalue actuellement à environ 38% de la production totale.

Et ce n'est pas tout. Il y a aussi d'autres types de circuits ou modes de fabrication qui sont pleins de potentiel, ne pensons qu'aux circuits flexibles, la technologie en saillie, les circuits micro-ondes, les modules multipuces, ainsi que d'autres noms exotiques qui atteignent parfois nos oreilles.

Les investissements requis en équipements pour démarrer un tel laboratoire de recherche et développement sont bien au-delà du million de dollars. Actuellement, l'équipement acquis par D.E.M. Controls permet de produire des cartes multicouches. Tout le côté chambre noire, i.e. fabrication de l'outillage photographique, devra être fait à l'extérieur car nous n'avons pas assez d'espace disponible. Malheureusement, les appareils servant à effectuer les tests brilleront eux aussi par leur absence pour un certain temps, faute d'espace encore une fois. Il y a aussi que le coût d'acquisition de ces équipements peut rapidement atteindre des sommes imposantes.

Ne nous leurrons pas! Si l'Ecole Polytechnique veut éventuellement acquérir elle-même un laboratoire de fabrication de cartes de circuits imprimés et réaliser des projets ambitieux à la hauteur de la technologie, elle devra trouver les fonds nécessaires et aussi l'espace. Le laboratoire occupe présentement 300 m² et nous serons

très à l'étroit. Il faudrait envisager près du double de cette superficie. D.E.M. Controls évoque déjà l'idée d'agrandir la surface disponible en construisant un deuxième niveau au-dessus d'une section de la bâtisse existante, rajoutant de la sorte 500 m². Cet ajout jouera un rôle important pour l'avenir du laboratoire.

Dans le texte qui suit, nous donnerons une brève description des exigences en équipements et en infrastructures pour la fabrication de cartes de circuits imprimés de haut niveau.

18. Equipements

Pour être en mesure de mieux comprendre la quantité d'équipements nécessaires pour fabriquer des circuits imprimés, séparons-les en trois groupes: équipements de base, équipements connexes et équipements additionnels. Définissons les équipements de base comme étant ceux entrant directement dans la fabrication. C'est le strict minimum que nous devons nous procurer pour être en mesure de fabriquer de simples cartes double face. Chacun d'eux est primordial pour obtenir une carte de circuits imprimés de qualité.

Les équipements connexes assistent à la production. Ils sont tout aussi indispensables que les équipements de base, mais un arrêt de fonctionnement de l'un de ces éléments pour une courte période n'entraverait pas nécessairement la production. Les équipements

additionnels permettent de fabriquer des circuits imprimés plus complexes et de meilleure qualité. Ils offrent la possibilité au laboratoire d'entrer dans un secteur hautement spécialisé.

L'utilisation des figures et des plans des annexes A et B facilite la compréhension dans l'énumération de chacun des équipements ci-après mentionnés.

18.1 Equipements de base

18.1.1 Cisaille

La cisaille est une espèce de guillotine utilisée pour couper les stratifiés de base à la dimension des flans au tout début du procédé. Chaque flan peut contenir un ou plusieurs circuits imprimés. Il s'agit ici d'optimiser l'utilisation de la surface et la production. Elle donne une coupe grossière mais rapide. Sa précision est amplement suffisante à cette étape-ci du procédé.

18.1.2 Etuve

Chaque flan ira en étuve à quelques reprises au cours de la fabrication. Au début de l'opération, le flan passe quelques heures en étuve afin de le libérer des contraintes résiduelles et de minimiser tout changement dimensionnel ultérieur. Il est important que

le flan conserve ses dimensions après le perçage, surtout dans le cas des cartes de circuits imprimés à haute densité de traces ultrafines, des cartes multicouches ou celles ayant une grande surface. Lors des étapes ultérieures, l'étuve servira à préchauffer les flans multicouches ou épais avant d'y laminer la résine photosensible sous forme de film sec.

On l'utilise aussi pour la réticulation de certains masques de soudure et de certaines encres de marquage. L'étuve doit pouvoir contenir plusieurs flans à la fois car ils y passent plusieurs heures avant d'en ressortir. Il devrait être possible d'atteindre une température minimale de 175°C. Un traceur, habituellement fourni avec l'appareil, sert à suivre l'évolution de la température à l'intérieur de l'étuve dans le temps.

18.1.3 Insertion de goupilles

Pour accélérer le perçage, les flans sont empilés trois de haut puis percés. Une machine perce simultanément deux trous dans la pile, un du côté droit et un du côté gauche des flans. Une goupille est alors automatiquement insérée dans chaque trou. Ces deux goupilles empêchent les flans de bouger l'un sur l'autre pendant le perçage et servent de repères de concordance pour cette étape.

18.1.4 Perceuse numérique/détourage

Une perceuse numérique est sans contredit supérieure à une perceuse manuelle. Avec la complexité croissante des circuits, il n'est pas rare de voir une carte avec quelques milliers de trous. La largeur des traces de ces circuits est souvent réduite afin de pouvoir faufiler plus de conducteurs entre les pastilles. La précision de l'emplacement de chaque trou est alors très importante. Seules les perceuses numériques permettent d'atteindre la précision requise. Elles sont aussi beaucoup plus rapides. La perceuse déjà acquise pour le laboratoire, une DAC TRIDENT, peut percer de 100 à 300 trous à la minute avec une précision de 36 μm. Une perceuse manuelle atteint à peine quelques trous à la minute avec une précision de 0,1 mm avec l'aide d'un système optique grossissant l'image. La vitesse de rotation de la broche devrait idéalement atteindre 120 000 RPM si l'utilisateur désire percer des trous de calibre 80 (0,343 mm ou 13,5 mil).

Notre perceuse numérique peut recevoir la configuration de perçage de la carte par voie numérique (disquette, modem, ruban perforé) si les données sont encodées selon le format EXCELLON. Plusieurs logiciels servant à assister à l'élaboration du schéma de disposition peuvent déjà fournir les données en accord avec ce format prédominant dans l'industrie. Si tel n'est pas le cas, il est possible d'utiliser la perceuse et son ordinateur pour numériser manuellement l'em-

placement de chaque trou ainsi que son diamètre à partir d'un dessin. Cette opération est toutefois longue et demande beaucoup de minutie pour bien s'assurer du diamètre des trous à numériser et pour ne pas en oublier.

Le laboratoire n'aura pas une production suffisante pour toujours occuper la perceuse à temps plein. Afin de maximiser son utilisation, nous emploierons aussi la perceuse pour le détourage, i.e. le découpage précis de chaque carte selon les spécifications des devis. Les perceuses permettant aussi de faire le détourage ne sont pas forcément beaucoup plus dispendieuses et elles permettent de sauver de l'espace. Il s'agit simplement de changer le programme d'opération de la perceuse et de mettre une fraise sur la broche à la place d'un foret.

Il y a souvent plusieurs trous de diamètres différents sur une même carte. La perceuse peut changer elle-même ses forets dans la broche jusqu'à concurrence de 8 forets différents, capacité maximale du porte-forets. Le changement des forets, ou fraises dans le cas du détourage, se fait automatiquement en accord avec le programme. Pour ce, un apport d'air comprimé à une pression minimale de 689 kPa (100 psi) est requis avec un débit de 300 litres par minute (10 cfm).

Notre perceuse possède pour le moment une seule broche. Advenant le cas où la perceuse ne suffirait pas à la production, il est

possible d'augmenter le nombre de broches jusqu'à concurrence de trois, permettant de percer trois piles de flans simultanément. L'addition d'une broche réduit l'aire de perçage accessible pour une broche de 610 x 460 mm à moins de 445 x 460 mm, et l'addition de deux broches à 340 x 460 mm.

18.1.5 Ebarbeuse

Lors du perçage, les forets laissent des bavures de débouchage sur les rebords de chaque trou. On enlève ces copeaux de métal par un procédé d'abrasion mécanique. Des brosses rotatives fixées à un axe vertical se promènent selon un mouvement perpendiculaire au mouvement des flans sur le convoyeur de la machine. Des buses d'aspersion projettent de l'eau sous pression afin d'enlever les particules détachées du flan.

18.1.6 Cuves pour le cuivrage chimique et galvanoplastie

Un minimum de 17 bacs en série est nécessaire pour le cuivrage chimique. Pour des raisons d'économie d'eau et de temps, il est préférable de doubler 3 des bains de rinçage et de les configurer en cascade. Eason (14) soutient qu'un système de rinçage par débordement double peut faire économiser jusqu'à 50% d'eau, et qu'un système triple peut aller jusqu'à 90% dans certains cas bien particuliers. Pour nos propres besoins, nous nous contenterons de doubler 3 des

bacs où le rinçage est plus critique, ce qui porte le nombre de bacs à 20 au total pour cette ligne.

L'annexe E indique les matériaux autorisés pour la fabrication des bacs, des éléments chauffants et des égouttoirs. La composition de la solution chimique dans chaque bac détermine les matériaux admissibles à la fabrication du bac. Les deux matériaux les plus communs sont le polyéthylène et le polypropylène. Notre choix s'est arrêté sur le polypropylène pour sa longévité supérieure et sa meilleure résistance à des températures plus élevées. Puisque chaque bac nécessite une bride pour renforcir la structure, on peut sauver de l'espace en fabriquant une grande cuve à l'intérieur de laquelle on soude des partitions pour délimiter et isoler chaque bac. En procédant de la sorte, nous avons pu raccourcir les lignes de dépôt métallique de 2,8 mètres.

La dimension des cuves est fonction de la grandeur maximale des flans que l'on veut produire. Dans l'industrie, des flans de 460 x 610 mm sont pratique courante. Afin de se rapprocher le plus possible des conditions qui prévalent dans l'industrie, nous aurons la capacité de produire des flans de cette dimension. Des bacs de 300 x 700 x 750 mm chacun feront l'affaire. Le polypropylène étant disponible en panneaux de 1,5 x 3 m, nous pouvons faire 2 grandes cuves de 10 compartiments chacune. Nous obtenons ainsi les 20 bacs requis pour le cuivrage chimique. Chaque bac a une largueur de 30 cm. Il

est nécessaire de faire les cuves plus profondes que les panneaux car certains bacs ont un élément chauffant ou un tube pour l'apport d'air dans le fond, et il faut maintenir les flans totalement submergés lorsqu'ils sont dans un bain.

Les cuves pour le dépôt électrolytique de métal peuvent être fabriquées selon le même principe. Cependant, deux bains doivent avoir une largeur supérieure à 30 cm. Il s'agit du bain de dépôt électrolytique de cuivre et celui d'étamage. Le bain galvanoplastique pour le dépôt de cuivre est souvent perçu comme celui où se produit un embouteillage. Alors que le temps d'immersion de la plupart des autres bains varie de 1 à 5 minutes, le bain de cuivre requiert une immersion de 30 minutes. On doit donc être en mesure de traiter plusieurs flans à la fois. Les anodes doivent être de part et d'autre de la cathode à une distance moyenne de 13 à 21 cm. Plus la distance est longue, meilleure est la régularité du dépôt. Une cuve de 1,5 m de longueur nous permet de traiter simultanément 4 flans à une distance de 17 cm des anodes. L'immersion dans le bain d'étamage nécessite beaucoup moins de temps et une largeur de 60 cm est suffisante. Un seul flan à la fois peut être introduit dans ce bac.

La ligne de galvanoplastie comprend donc 3 cuves. La première a 6 compartiments de 30 cm chacun. La deuxième a 1,5 m de longueur sans séparation. La dernière a 5 compartiments de 30 cm et un de

60 cm pour l'étamage. Des éléments chauffants de 4 kW seront installés au fond des bacs qui en exigent.

Plusieurs de ces bains doivent opérer à des températures supérieures à la température ambiante. Un minimum de 7 bains ont absolument besoin de chauffage, dont l'un requiert préférablement chauffage et refroidissement car sa plage de température pour un fonctionnement adéquat est très étroite. Trois autres bains pourraient nécessiter du chauffage, surtout en hiver.

Les bains de dépôt de cuivre électrolytique et chimique ont besoin d'un apport d'air à même la solution. L'air procure une agitation autour du flan et remplace la solution appauvrie en cuivre par une solution plus fraîche. Par la même occasion, il déloge les bulles d'hydrogène s'étant fixées sur les surfaces. L'air assure aussi un meilleur équilibre de la solution. Un faible volume d'air provenant d'un simple ventilateur est suffisant.

Un système d'agitation mécanique sur rail permet de maintenir une agitation continue et uniforme dans tous les bains. Deux rails disposés de part et d'autre des cuves oscillent dans le sens longitudinal. Les flans sont suspendus sur les rails qui leur communiquent le mouvement de va-et-vient. L'agitation mécanique réduit les zones surchauffées dans les bains et déplace la solution appauvrie du voisinage des flans. Dans les bains de rinçage en cascade, elle accé-

lère la dilution. C'est d'ailleurs la principale source de turbulence dans le bain qui est approvisionné en eau par débordement du bain adjacent dans un système de rinçage en cascade.

Les 3 bains de dépôt métallique ont aussi besoin de filtration pour contrôler la clarté de la solution et la régularité du dépôt. Le bain de cuivre chimique peut être filtré de façon continue ou quotidienne. Les bains d'étamage et de cuivre électrolytique requièrent une filtration continue. Règle générale, le filtre devrait pouvoir faire circuler entre le double et le triple du volume d'un bain en une heure. Puisqu'aucune addition d'air n'est autorisée dans le bain d'étamage, la filtration doit être suffisamment puissante pour générer l'agitation requise pour le bon fonctionnement de cette solution. Chacune de ces solutions doit aussi être filtrée régulièrement avec un filtre au carbone pour maintenir la contamination organique à un minimum.

18.1.7 Laminateur de photorésine

Le laboratoire ne peut produire que des prototypes ou de petites séries. Dès lors, il est beaucoup plus avantageux d'utiliser des épargnes photosensibles sous forme de film sec. D'autant plus que seul le film sec peut nous donner la définition nécessaire pour produire des lignes fines et ultrafines. Un appareil spécial est requis pour laminer le film sec à la chaleur sous la pression de deux rou-

leaux de caoutchouc chauffants. Le film devient plus fluide et adhère mieux à la surface du support isolant et du cuivre.

Cet appareil peut aussi servir à l'application du masque de soudure s'il est aussi sous forme de film sec. Dans ce cas, il est préférable d'avoir un laminateur pouvant faire le vide entre le film sec et le flan car la surface de ce dernier n'est plus aussi uniforme à cause des conducteurs de cuivre, occasionnant des problèmes d'adhérence.

18.1.8 Unité d'insolation

La résine photosensible se polymérise lorsqu'elle est soumise à une radiation ultraviolette. Un mécanisme maintient l'outillage photographique en contact intime avec l'épargne pour minimiser la dispersion de la lumière dans le film. Ceci résulte en une meilleure définition des conducteurs et un flanc de trace plus vertical. Pour la production de lignes fines, la lumière doit être collimatée car on ne peut permettre le moindre évasement des traces (cf. Figure 3). Le PC-130 de DuPont est une unité d'insolation avec lumière collimatée.

18.1.9 Développeur

Une fois l'épargne soumise aux radiations ultraviolettes, il faut dépouiller la surface du flan des parties non polymérisées. Un

révélateur effectue cette tâche. La solution peut être aqueuse ou à base de solvants, mais la variété aqueuse a l'avantage d'être beaucoup plus facile d'utilisation. La vitesse du convoyeur doit être ajustable de telle sorte que l'épargne sera complètement développée à mi-chemin de la chambre de développement. Des jets de révélateur sont projetés avec force sur chaque surface de la carte. La force du jet déplace les morceaux de résine partiellement dissous de la surface du flan et soumet la résine encore non attaquée aux effets du révélateur.

Les matériaux utilisés dans la fabrication du développeur varient en fonction du type de révélateur. Un révélateur à base de solvants exige une machine faite d'acier inoxidable, alors que le PVC est adéquat pour les solutions aqueuses. Les machines faites d'acier sont plus dispendieuses à l'achat, mais les solutions à base de solvants sont moins chères. La plus grande difficulté de traiter les eaux usées contenant des solvants fait souvent pencher la balance en faveur des systèmes à solutions aqueuses.

18.1.10 Décapage de l'épargne

Après la galvanoplastie, il faut enlever la couche d'épargne de placage pour permettre au mordant d'attaquer le cuivre non protégé et de le dissoudre. Cette solution de décapage doit être compatible avec le type d'épargne, i.e. aqueux ou à base de solvants. La solu-

tion est pulvérisée simultanément sur chaque surface du flan et réduit la résine photosensible en morceaux de plus en plus petits. La force d'impact de la solution détache les fragments de la surface du flan. La machine est fortement similaire à celle employée pour le développement, si ce n'est qu'on lui rajoute un filtre pour récupérer les morceaux de film sec.

18.1.11 Morsure

La morsure est l'opération qui consiste à enlever le cuivre de la surface du flan non protégée par une couche d'épargne. L'ammoniac alcalin est fréquemment utilisé pour les couches externes des cartes de circuits imprimés car il est efficace à dissoudre le cuivre sans pour autant trop gruger latéralement les parois des conducteurs. Ce mordant attaque quelque peu la surface de la couche d'étain-plomb en y laissant des taches. Pour des raisons d'esthétique, un brillanteur d'étamage est souvent annexé à cette machine pour nettoyer et faire reluire l'étamage.

Une bonne ventilation sur la machine est très importante pour évacuer les vapeurs d'ammoniac avant que celles-ci n'envahissent l'aire de travail. Il faut être en mesure de bien contrôler cette ventilation car si elle n'est pas ajustée correctement, le pH de la solution s'en trouve perturbé et la morsure est bousillée.

Les couches internes des cartes multicouches n'étant habituellement pas soumises à la galvanoplastie, on emploie du chlorure ferrique ou du chlorure cuivrique pour la morsure. Une épargne organique est alors employée comme épargne de morsure. Ces mordants ne peuvent être utilisés sur les couches externes des flans car ils dissolvent aussi bien le cuivre que l'étamage. Ils sont appréciés pour leur grande capacité à retenir le cuivre en solution avant de devoir être rejetés ou regénérés.

Il n'est pas recommandé d'utiliser différents mordants dans une même machine. La production de cartes multicouches réclame donc deux machines pour les opérations de morsure. Nous utiliserons deux machines de modèles différents pour la morsure fabriquées par D.E.M. Controls. Celle de plus grande dimension servira à la morsure alcaline pour les couches externes alors que les couches internes seront traitées dans une machine de la série Mini Lab.

18.1.12 Séchoirs

Un séchoir sert à retirer le liquide de la surface de la carte et à l'intérieur des trous par évaporation. Un convoyeur amène les flans dans une chambre où de l'air chaud est projeté sur les flans afin de sécher les trous d'un accès plus difficiles. Le séchoir permet d'accélérer la production et minimise l'oxydation de la surface de cuivre. Attendre que les surfaces sèchent à l'air libre

nécessiterait une grande surface d'entreposage et prendrait trop de temps. Un premier séchoir trouve sa place à la fin de la ligne de décapage de résine photosensible et morsure. Un second est employé après la phase de ponçage des couches internes des cartes multicouches.

18.1.13 Contacts d'extrémité de carte

Les contacts d'extrémité de cartes peuvent se faire manuellement ou dans une machine automatique. Bien que le coût de l'or soit très élevé, la quantité utilisée est si minime sur chaque carte que les coûts de main d'oeuvre sont prépondérants. L'avantage des machines automatiques est leur rapidité et l'uniformité de leurs dépôts. On n'a qu'à masquer la carte à l'aide d'un ruban adhésif avant son introduction dans la machine. A la fin du procédé, on retire le ruban.

Le laboratoire de circuits imprimés ne produisant que des prototypes, l'acquisition d'une machine spéciale pour cet usage n'est pas justifiée pour le moment. D'abord, l'espace ne le permet tout simplement pas, ensuite ce ne sont pas toutes les cartes qui demandent des contacts d'extrémité.

Des petits bacs peu profonds sont suffisants. Le niveau du liquide ne doit pas dépasser le bord supérieur du ruban qui est

apposé juste au-dessus des contacts d'extrémité. Cinq petits bassins d'une largeur suffisante pour accommoder tous les types de cartes produites sont requis pour décaper la couche d'étamage recouvrant les contacts, la micromorsure, le bain d'acide et les dépôts électrolytiques de nickel et d'or. Ces petits bassins sont préférablement installés dans un bac plus grand et un peu plus profond en cas de débordement ou d'éclaboussures. L'espace minime requis par cette façon de procéder nous permet d'utiliser le laboratoire chimique pour dorer les contacts d'extrémité.

18.1.14 Déioniseur d'eau

Tous les bains de solutions chimiques doivent être formés à partir d'eau déionisée (D.I. sur les plans d'installation) ou déminéralisée; l'eau du robinet ne peut être employée. Quant aux rinçages, il est souvent suggéré d'utiliser aussi de l'eau déionisée dans certains cas critiques. L'eau du robinet contient des particules en suspension qui peuvent perturber certaines étapes ultérieures, notamment la galvanoplastie et le nouveau procédé DuraBOND™ de DuPont.

18.1.15 Refusion

La refusion est nécessaire pour débarrasser l'étamage des éclats de métal que la morsure a produits. L'étamage fond et coule sur les parois des conducteurs, assurant ainsi une protection accrue des

conducteurs. Ce n'est qu'au moment de cette fusion que le mélange d'étain-plomb deviendra un véritable alliage résistant contre les attaques de la corrosion. La soudabilité de l'alliage est aussi supérieure à celle du mélange et dure plus longtemps. Deux méthodes différentes sont particulièrement employées: le trempage dans l'huile chaude et le four à infrarouges.

Avec une production de prototypes, un système d'immersion dans l'huile chaude est préférable pour sa polyvalence et est suffisant pour nos besoins. Il permet de traiter une plus grande variété de cartes et a peu de chances de provoquer des effets secondaires néfastes particuliers à certaines applications.

18.1.16 Cuisson aux UV

Plusieurs encres de marquage ainsi que certains masques de soudure liquides ou sous forme d'encre sont polymérisés et réticulés par une exposition à une radiation ultraviolette. Un tapis roulant amène les flans dans la chambre d'exposition. La vitesse du convoyeur et le nombre de lampes déterminent le temps d'insolation.

18.2 Equipements connexes

18.2.1 Le laboratoire chimique

Le laboratoire chimique est indispensable à la bonne marche des opérations. Deux de ses principales fonctions sont les analyses chimiques des bains (pH, densité, composition des bains, contamination organique, etc.) et l'assurance de la qualité.

Les analyses du laboratoire permettent de maintenir les bains à l'intérieur de leur fenêtre d'opération optimale. Les sources de contamination affectant les performances des bains peuvent être identifiées beaucoup plus efficacement et tout épuisement de la solution est signalé avant qu'il n'y ait de conséquences néfastes.

L'assurance de la qualité est un élément primordial pour la réputation et la survie d'un emplacement de recherche et de production de prototypes, surtout lorsque ceux-ci doivent répondre à des normes strictes, e.g. les spécifications militaires. Ces spécifications visent entre autres à s'assurer d'une qualité adéquate des trous métallisés. Le bon fonctionnement d'une carte de circuits imprimés dépend souvent d'un bon contrôle sur la qualité de la fabrication.

Une liste exhaustive de tout le matériel nécessaire pour le laboratoire est trop longue pour être donnée ici. Cependant il est possible de regrouper ensemble plusieurs de ses éléments. Tout d'abord, une série de produits chimiques pour effectuer les analyses sont requis. Certaines de ces analyses sont nécessaires à chaque démarrage quotidien du bain. Les fournisseurs de solutions chimiques pour les bains communiquent sur demande les directives de même que les noms des produits nécessaires pour ces analyses.

Ensuite il faut une variété de petits contenants, préférablement de verre, pour conserver et mélanger ensemble les solutions (pipettes, Erlenmeyer, cylindres gradués, etc.). Thermomètres, agitateurs magnétiques, pH mètre, balance analytique font aussi partie de la quincaillerie. Une cellule Hull est souvent la façon idéale d'analyser les bains de galvanoplastie. Une hotte pour l'évacuation des vapeurs nocives de même qu'un petit four sont de mise.

Pour la vérification de la qualité des trous métallisés, on incorpore sur le flan une section permettant d'effectuer différents tests. Lorsque la mesure de l'épaisseur du dépôt à l'intérieur des trous doit être faite, la seule façon exacte de procéder exige l'utilisation d'un microscope. La préparation des éprouvettes nécessite l'emploi d'une scie à diamants pour couper une section, d'un nécessaire d'encapsulation, d'une polisseuse avec des papiers sablés de différents degrés d'abrasion, et d'une caméra afin de pouvoir conser-

ver des photos dans les dossiers. Une variété de méthodes non destructives peuvent aussi être employées, mais les appareils de mesure requis exigent des dépenses supérieures.

Si l'espace le permet, un analyseur de carte sans composant et un inspecteur visuel automatique peuvent y trouver place. Bien que ces tests ne soient pas toujours exigés, ils permettent néanmoins à un fabricant d'établir un contrôle sur la qualité de sa production et de maintenir sa réputation surtout lorsqu'il s'agit de circuits spécialisés et à haute densité de traces. Les vérificateurs automatiques sont plusieurs fois supérieurs aux tests manuels et à l'inspection visuelle par un humain. Plus un circuit nécessite d'étapes de fabrication et est dispendieux à produire, plus il est important d'effectuer ces tests avant d'arriver au produit final ou à la livraison.

A défaut d'avoir ces analyseurs, il est possible de recourir à des firmes externes pour ces analyses lorsqu'elles sont exigées. Il faut compter une journée ou deux à chaque fois qu'un lot est expédié pour vérification. C'est l'option que devra prendre le laboratoire, pour un certain temps du moins, faute d'espace et d'argent. Les cartes multicouches ayant des traces et des espaces de 75 μm devront obligatoirement être inspectées tout au long de la fabrication afin de détecter toute anomalie le plus tôt possible. Si un défaut n'est signalé qu'après l'assemblage final des couches, il cause alors soit

une réparation fort onéreuse, soit le rejet de la carte à un moment où beaucoup a été investi dans le produit.

18.2.2 Ventilation

Chaque solution chimique émanant des vapeurs nocives doit avoir une ventilation appropriée. La plupart des machines comportant de telles solutions sont déjà munies d'un système contrôlant leur émission. Il suffit de les raccorder au système de ventilation. Par contre, les cuves de placage sont une source importante de vapeurs pouvant incommoder les personnes travaillant dans le lieu de travail.

Une étude des vapeurs émises et de leur niveau d'admissibilité dans la zone de travail devrait être faite par des experts afin de pouvoir concevoir un système de ventilation balancé. Cette façon de procéder est de beaucoup préférable à l'utilisation de registres pour contrôler le débit d'air, façon qui nécessite beaucoup d'essais et d'erreurs avant de trouver l'ajustement adéquat. Notons que certains bains ont des émanations particulièrement déplaisantes, ceux contenant de l'ammoniac ou du formaldéhyde entre autres.

L'installation souvent suggérée comporte une hotte latérale sur l'un des bords des bacs et une amenée d'air à faible vélocité de l'autre côté. Ce système est communément appelé «push-pull». Des déflecteurs peuvent être ajoutés pour forcer le flux d'air vers la

hotte, minimisant ainsi le débit d'air nécessaire à l'évacuation des vapeurs.

Les vapeurs corrosives émanant du système de ventilation peuvent causer des dommages sérieux aux bâtiments environnants de même qu'aux véhicules. Un purificateur d'air permet de précipiter une grande proportion des contaminants par gravité avec un simple contact des vapeurs avec un liquide. La vélocité des vapeurs est réduite à l'entrée de l'unité pour favoriser la précipitation de gouttelettes. Un liquide est ensuite vaporisé sur les vapeurs. Ce liquide est souvent de l'eau ou parfois une solution de soude caustique. L'unité s'installe sur le toit et il faut prévoir qu'une partie du liquide recirculé doit être périodiquement rejeté dans les effluents.

18.2.3 Traitement des effluents

La très grande majorité des effluents provenant de la fabrication de cartes de circuits imprimés sont acides avec une certaine teneur en métaux lourds. Les règlements municipaux interdisent le déversement de ces effluents directement dans les égouts sans traitement préalable. Il suffit souvent de neutraliser la solution à un pH acceptable et de diminuer la teneur en métal par précipitation ou autres méthodes. Certaines de ces techniques sont décrites à l'annexe D.

Les opérations de cuivrage chimique et de morsure à l'ammoniac alcalin engendrent des effluents contenant du cuivre chélaté et complexé. Dans cet état, il est beaucoup plus difficile de précipiter le cuivre par les procédés usuels. Il est donc souvent préférable de séparer les effluents contenant des chélates des autres effluents afin de faciliter le traitement et d'en augmenter l'efficacité.

Pour la neutralisation, l'acide sulfurique est couramment employé comme réactif acide. Le réactif alcalin de choix est souvent sous la forme d'hydroxyde de sodium (soude), de calcium (chaux) ou de magnésium. Typiquement la soude donne une précipitation et des volumes de boues moyens et occasionne des coûts d'opération modérés.

D'autres réactifs de précipitation alcalins peuvent être employés, tels les sulfures d'aluminium et de sodium de même que le carbonate de calcium. Leur capacité de précipitation est supérieure, mais ils donnent des volumes de boues plus considérables et sont d'une opération plus compliquée. La possibilité d'odeurs désagréables est à considérer avec l'utilisation de sulfures.

La majeure partie du volume des effluents provient des eaux de rinçage. La concentration de contaminants y est faible mais il peut y en avoir plus d'une variété. Il y a ordinairement lieu de construire deux systèmes de drains pour l'évacuation des eaux. Le premier collecte les eaux contenant des chélates et les accumule dans de

grandes cuves en attendant leur traitement. Le deuxième fait de même avec le reste des eaux. Ce type d'installation nécessite donc trois grandes cuves: deux pour la collection et une pour le traitement.

Le système de traitement des eaux que le laboratoire a déjà acquis, un CPU-4000 de la firme américaine Environmental Technologies (U.S.) Inc., fonctionne un peu différemment. Avec ce système, tous les effluents sont dirigés vers une cuve de rétention unique. Il est très compact et est conçu spécialement pour des volumes relativement faibles. Cet appareil peut traiter de 11 000 à 19 000 litres en 8 heures.

L'unité comme telle se divise en deux parties: l'une électronique contrôlée par un automate programmable, et une seconde où le traitement des eaux de vidange a lieu. L'automate programmable contrôle le transfert des liquides, le pH et les temps de réaction. La section traitement comprend une chambre de réaction et une cuve-filtre en plus de pompes et d'un compresseur d'air. A l'extérieur de l'unité, on retrouve 4 barils de 240 litres. Le premier contient un agent d'enduction pour les tubes-filtres de la cuve-filtre, favorisant le travail du filtre. Le second et le troisième renferment l'agent de précipitation, du sulfure de sodium (Na_2S), et l'agent pour le contrôle du pH, de la soude caustique (NaOH). Ces réactifs sont transférés à l'unité de traitement au moyen de pompes sur ordre de l'automate programmable. Enfin le dernier baril reçoit les boues

pour leur assèchement. Une cuve de rétention, où toutes les eaux sont acheminées, est aussi nécessaire. Elle accumule ces eaux pendant que l'unité de traitement neutralise un lot.

Le procédé débute par le transfert des eaux de vidange de la cuve de rétention à la chambre de réaction au moyen d'une pompe. Un filtre, placé en amont de la chambre de réaction, récupère les agrégats solides. La première phase du traitement utilise la soude caustique. Elle vise à précipiter la plus grande partie des métaux en suspension. Après un certain temps, suffisamment long pour permettre l'agglomération des particules, le liquide est envoyé à la cuve-filtre. Le filtrat est retourné à la chambre de réaction et les solides sont envoyés au module d'assèchement des boues. Cette première phase épure partiellement le liquide en précipitant une bonne part des métaux non chélatés.

De retour à la chambre de réaction, le sulfure de sodium, auquel est incorporé un floculant polyélectrolytique, est ajouté au liquide. Cette deuxième phase du traitement conduit à la précipitation des métaux chélatés. Le liquide est ensuite retourné une deuxième fois à la cuve-filtre. Les boues iront au module d'assèchement et le filtrat sera dirigé une dernière fois à la chambre de réaction pour l'ajustement final du pH. Le liquide est ensuite déversé dans les égouts par l'intermédiaire de la cuve-filtre et le cycle recommence.

L'emploi de la soude caustique a pour dessein de réduire la consommation de sulfure de sodium dont le coût est plus élevé. L'hydroxyde de sodium est disponible localement, alors que le mélange de sulfure de sodium et du floculant polyélectrolytique doit être obtenu du fabricant du CPU-4000 par l'intermédiaire d'un distributeur local.

Les bains de solutions chimiques du procédé sont très concentrés. Il est souvent plus simple de les traiter séparément que de déverser leur contenu directement avec les autres effluents. La solution épuisée est transvidée dans un autre contenant pour ensuite subir le traitement approprié. Moins il y a de variétés de contaminants dans un effluent, plus il est facile de le traiter efficacement. Les feuilles d'instructions des fournisseurs contiennent les indications pour la neutralisation des solutions avant leur déversement. Les mordants peuvent fréquemment être retournés aux fournisseurs qui en extraient le métal fortement concentré.

Le règlement 87 de la Communauté Urbaine de Montréal énonce les normes à respecter pour le déversement d'eaux usées dans les réseaux d'égout et les cours d'eau. Une demande de permis doit être faite avant la mise en marche des opérations. La présentation et la description d'un diagramme des procédés de même que la quantité et le mode de gestion des déchets doivent accompagner la demande de permis.

Un délai minimal de trois semaines est requis entre l'application et l'émission du permis.

18.3 Equipements additionnels

Nous avons jusqu'à maintenant décrit les équipements essentiels à la fabrication de circuits imprimés double face. Certains autres équipements, quoiqu'ils ne soient pas obligatoires, peuvent améliorer la qualité du produit mais ils permettent surtout de produire des circuits beaucoup plus complexes et à la hauteur de la technologie actuelle. Ces équipements sont principalement dédiés aux cartes multicouches car il s'avère que la grande majorité des circuits complexes sont fabriqués sur des cartes multicouches.

18.3.1 Ponçage

Le nettoyage par pierre ponce pulvérisée est utilisé à deux étapes de la production de cartes multicouches. Préalablement à l'application du film sec photosensible ou de l'oxyde sur les couches internes, il augmente la rugosité sans pour autant enlever de métal. Une surface rugueuse permet au film sec de mieux adhérer et offre à la couche d'oxyde une plus grande surface pour une meilleure croissance. Un module de nettoyage est requis avant l'attaque à la pierre ponce afin de débarrasser la surface des oxydes et des souillures qui la recouvrent.

Ce mode de nettoyage est une exclusivité chez D.E.M. Controls. Ce type d'équipement nécessite des matériaux spéciaux dans la fabrication de certains composants de la machine afin de résister aux immenses forces d'abrasion auxquels ils sont soumis.

18.3.2 Concordance des couches

Il est très important dans une carte multicouche que les couches superposées soient précisément alignées l'une en rapport avec l'autre. Imaginons le scénario suivant: une carte multicouche comporte plusieurs trous servant uniquement de liaison entre les couches et où aucun composant ne sera inséré. Ces trous étant plus petits que les autres, la précision du positionnement du foret lors du perçage est d'autant plus importante. Imaginons le scénario suivant. Les couches internes sont assemblées ensemble mais l'une d'entre elles n'est pas proprement alignée avec les autres. Lors du perçage du trou, le foret passe au centre des pastilles en concordance mais rate sa cible sur la couche fautive. La connexion électrique entre le conducteur sur la couche interne mal positionnée et les autre couches ne se fera jamais sans que la carte ne soit retouchée par un technicien, à un coût évidemment élevé.

Pour éviter une telle situation, on perce des repères de concordance sur chaque couche de la carte à l'aide d'une poinçonneuse de

précision. Ces trous serviront de référence pour la suite du procédé, aussi bien lors du positionnement de l'outillage photographique avant l'insolation de la résine photosensible que lors de l'accostage des couches internes.

18.3.3 Déglaçage des trous

Pendant le perçage des trous d'une carte multicouche, la chaleur dégagée par la friction du foret sur la paroi du trou est suffisante pour liquéfier localement la résine. Il s'ensuit une coulée de la résine le long du trou selon le mouvement du foret. Après le retrait du foret, une mince couche de résine recouvre la surface du trou, même le cuivre des couches internes. Afin d'assurer une conductivité électrique entre la pastille interne et le canon du trou lors de la métallisation, il faut enlever cette pellicule de résine.

Le laboratoire utilisera deux méthodes pour le déglaçage des trous. Le permanganate de potassium est une technique chimique relativement nouvelle dans l'industrie. Elle donne des résultats supérieurs aux autres méthodes humides (acide chromique, acide sulfurique). La ligne de déglaçage comprend onze bacs. Le premier bac est préférablement fait d'acier inoxydable à cause de la trop haute température du bain, et celui contenant le permanganate de potassium doit être fait ou recouvert de titanium. Les autres sont fabriqués

en polypropylène. La dimension des bacs est la même que celle des lignes de dépôt de cuivre, soit 300 x 700 x 750 mm.

Le permanganate fonctionne bien avec la majorité des supports, mais il donne de piètres résultats avec le polyimide et les supports flexibles à cause de l'emploi d'acrylique dans leur fabrication. Les unités de déglaçage au plasma semblent être les seules à donner des résultats acceptables sur ces supports. Pour le moment, ces unités sont peu répandues dans l'industrie à cause de leur coût d'acquisition relativement élevé. Par contre, on voit poindre des indices dans la littérature laissant croire que la technologie du plasma offre des possibilités de dépôt de cuivre (15) et de morsure par un procédé sec. Le laboratoire a fait l'acquisition d'une unité de déglaçage au plasma.

18.3.4 Traitement de conversion de surface

Les techniques de fabrication des couches internes n'étant en soi qu'un procédé d'impression et de morsure, la surface du cuivre après morsure et décapage de la couche d'épargne est celle originalement sur le support isolant métallisé. C'est une surface très lisse. Même si elle a été poncée, la surface n'offre pas suffisamment de points d'ancrage pour s'assurer que les feuilles préimprégnées de résine à l'état B lui adhèreront correctement par la suite et résisteront aux tests de pelage.

Un dépôt d'oxyde sur la surface du cuivre favorise la croissance de crystaux. La surface obtenue est très rugueuse, mais quelque peu fragile. Différentes topographies résulteront selon le type d'oxyde employé. Avec cette conversion de surface, la résistance d'adhésion passe de 0,2 kg/cm pour une surface de cuivre non traitée à 1,2 kg/cm avec la couche d'oxyde (1). Les flans sont introduits dans une machine avec des convoyeurs où ils sont submergés dans la solution. Un module de nettoyage précède la déposition de l'oxyde.

Après l'assemblage des couches internes, les flans sont éventuellement envoyés à la ligne de dépôt chimique après perçage et déglaçage. Les solutions acides dans lesquelles ils sont trempés attaquent la couche d'oxyde, créant des «anneaux roses» sur le cuivre. Suivant cette attaque, il y a souvent perte d'adhérence entre les couches et décollement interlaminaire, ce qui conduit au rejet de la carte.

Tout récemment, la compagnie DuPont a mis au point un tout nouveau procédé révolutionnaire pour remplacer l'oxyde. Il s'agit dans l'ensemble d'un dépôt galvanique d'étain sur le cuivre. Son principal avantage est l'élimination des anneaux roses autour des trous après leur métallisation, un véritable fléau dans l'industrie, tout en maintenant une resistance d'adhésion de 1,4 kg/cm.

Le laboratoire sera l'un des premiers emplacements au monde à être équipé de ce procédé. Le laboratoire de DuPont à Wilmington au Delaware a déjà reçu livraison de la première ligne pilote conçue par D.E.M. Controls spécifiquement pour le procédé DuraBOND™. Notre laboratoire sera le deuxième à être ainsi équipé. Nous travaillerons en étroite collaboration avec DuPont pour les expérimentations sur ce procédé novateur dans l'industrie.

18.3.5 Accostage des couches

Une fois la fabrication des couches internes terminée, il est temps de les assembler pour obtenir la carte multicouche. Les différentes couches de la carte sont déposées sur un gabarit, appelé plaques de pressage, ayant des chevilles d'assemblage placées au même endroit que les repères de concordance. Des feuilles préimprégnées de résine à l'état B sont interposées entre chaque couche. Après l'accostage, les flans sont placés entre les plaques de la presse hydraulique pour leur stratification.

La presse hydraulique est un équipement robuste qui durera plusieurs années avant de faillir à la tâche si elle n'est pas abusée. Elle comprend deux sections: l'une mécanique où la pression et la chaleur seront appliquées et une section comprenant les instruments indiquant la pression et la température aux flans. Des chronomètres sont parfois inclus pour faciliter l'indication des fins de cycle.

La section mécanique comprend une plaque supérieure fixe et un cylindre hydraulique poussant sur la plaque inférieure mobile. Chaque plaque est chauffée par électricité, vapeur ou huile. L'électricité est souvent le choix préféré des manufacturiers pour la simplicité de l'installation et de l'opération. La vapeur et l'huile chaude requièrent des temps de chauffe plus courts, mais un générateur de vapeur ou un échangeur de chaleur, selon le cas, sont requis. Les plaques sont refroidies par de l'eau courante froide ou en circuit fermé.

Des plaques intermédiaires, elles aussi chauffées et refroidies, peuvent être insérées entre les deux plaques principales. Elles augmentent le nombre d'ouvertures où l'on peut insérer les piles de flans et du même coup la capacité de la presse. Il est aussi possible de mettre plus d'un flan entre deux plaques de la presse en autant que des séparateurs sont utilisés pour les séparer et répartir la chaleur. Une presse comprenant deux ouvertures est suffisante pour de faibles volumes.

Certaines presses ont un système de vacuum intégré. Ceci permet de retirer l'air emprisonné entre les couches lors de la stratification. Plus il y a de couches, plus il y a de risques que de petites bulles d'air demeurent prisonnières dans le stratifié. Dans certaines étapes ultérieures, notamment lors de la soudure à la vague, les

bulles d'air prennent de l'expansion et provoquent l'exfoliation du stratifié, causant ainsi le rejet de la carte.

La majorité des résines d'époxyde requièrent des pressions variant de 1,7 à 2,4 MPa (250 à 350 psi) et une température d'environ 175 à 190°C. La surface des plaques de la presse détermine la grandeur maximale des cartes pouvant être fabriquées. Une distance de 5 cm est requise en périphérie pour les trous de montage et l'écoulement de la résine débordant des flans pressés.

Le gabarit, plus communément appelé plaques de pressage, est généralement fait d'acier trempé. L'acier a un coefficient de dilatation thermique voisin de celui d'un flan composé d'un mélange de fibre de verre et de résine d'époxyde et de cuivre. La surface doit être très dure pour minimiser les égratignures et les bosselures. L'épaisseur est d'environ 6 mm par plaque, soit un poids de 7 kg pour une plaque de 30 x 45 cm. Chaque séparateur pèse en plus environ 1 kg. Un opérateur doit donc soulever un peu plus de 16 kg lorsqu'il doit mettre une pile de flans entre les ouvertures de la presse. Il est donc souhaitable d'avoir un petit monte-charge hydraulique sur trépied roulant pouvant soulever les piles de flans jusqu'au niveau des plaques de pressage et les transporter de la table où l'assemblage est fait aux ouvertures de la presse.

18.3.6 Nettoyeur ultrasonique

La production de cartes à haute densité de traces comporte souvent des trous de diamètre très petit. Dans de telles circonstances, certains corps étrangers produits lors de l'ébarbage ou du ponçage se coincent dans les trous et ne peuvent être enlevés par les techniques usuelles de nettoyage. L'implosion de cavités induites par les ultrasons produit une agitation locale violente qui déloge les particules des parois du trou. Il en résulte une action nettoyante puissante.

18.3.7 Impression directe au laser

L'impression directe au laser de la couche d'épargne est une technique très récente qui ne semble malheureusement pas encore au point (voir l'annexe C). Néanmoins, il semble que ce soit une méthode particulièrement adaptée à la fabrication de prototypes complexes de haute qualité. Son utilité pour le démarrage du laboratoire est discutable, mais il est évident que ce type d'unité trouvera sa place dans un environnement où la qualité et la précision seront des priorités à tenir compte dans la fabrication de circuits imprimés complexes.

Les divers manufacturiers associés au développement de cette technologie cherchent encore la solution à certains problèmes

sérieux. L'évolution de cette technologie pleine de promesses sera à surveiller de près. On peut se permettre de penser que le laboratoire pourrait éventuellement devenir un instrument pour la résolution de ces problèmes qui freinent son aboutissement.

Pour le moment, cette technologie demeurera hors de portée de notre bourse. La seule façon envisageable où nous pourrions nous porter acquéreur de ce type d'équipement serait de participer activement à son développement. De toutes façons, advenant la possession d'une somme d'argent suffisante pour couvrir un tel achat, elle serait employée à meilleur escient pour d'autres équipements plus prioritaires, comme les vérificateurs visuels et électriques, ou encore une salle hors poussière.

19. Exigences en infrastructures

19.1 Surface requise

Le laboratoire exige un espace fort appréciable pour l'installation de ces équipements. La superficie actuelle est de 260 m^2 pour le premier niveau. Une surface additionnelle de 40 m^2 au rez-de-chaussée est nécessaire pour les équipements de traitement des effluents. Avec la quantité de matériel que nous avons, nous sommes déjà à l'étroit.

Cette superficie devait être suffisante pour le projet initial de fabriquer des cartes double face, mais il s'est avéré en cours de route que ce ne serait pas suffisant pour parvenir à décrocher d'intéressants contrats de recherche et de production. Nous avons donc été contraints de considérer l'acquisition de matériel pour la fabrication de cartes de circuits multicouches.

La compagnie D.E.M. Controls songe déjà à l'expansion du laboratoire. Selon des études en cours, une surface additionnelle de 500 m^2 se grefferait à l'emplacement actuellement occupé par le laboratoire. Un local serait aussi prévu pour la formation de personnel, de chercheurs ou d'étudiants. L'annexe serait construite en fonction des besoins d'une telle installation. Il serait alors permis de dégager les équipements trop rapprochés les uns des autres. Selon la disposition présente, il serait difficile d'introduire un groupe de plus de 3 ou 4 personnes à la fois pour une visite ou une démonstration. Certaines zones du laboratoire ne sont accessibles qu'à une seule personne à la fois.

Une certaine division de l'espace est nécessaire. Tout d'abord, il y a lieu de séparer la partie humide de la partie sèche. Les appareils n'entrant pas en contact avec des solutions chimiques sont préférablement mis à part des autres. Le four, la cisaille, la presse, la machine pour l'insertion des goupilles et l'unité de déglaçage au plasma devraient avoir leur petit coin bien à eux. La

chambre inactinique est isolée du reste du laboratoire et devrait avoir son propre système de ventilation. Seule une lumière dont la longueur d'onde est supérieure à 450 nm peut être admise dans ce local pour éviter la polymérisation prématurée de la résine photosensible. La perceuse contient des équipements électroniques et ne doit pas entrer en contact avec l'atmosphère corrosive provenant des cuves ouvertes. On pourrait aller jusqu'à cloisonner ces cuves pour les isoler totalement du reste du laboratoire.

19.2 Ventilation

Une bonne ventilation est primordiale pour ce type d'installation. Tout au long du procédé, plusieurs vapeurs toxiques se dégagent des différentes solutions chimiques et doivent être évacuées au dehors. Le volume d'air expulsé de l'environnement de travail est probablement suffisant pour justifier l'utilisation d'un échangeur de chaleur pour préchauffer l'air frais en hiver.

Tel que déjà mentionné à la section 18.2.2, une étude des volumes d'air à évacuer permettrait de concevoir un système balancé répondant aux exigences actuelles. Durney (16) et Menkel (17) sont un bon point de départ pour le calcul des quantités d'air devant être évacuées au dessus de chaque cuve de placage. Malheureusement, de telles informations ne semblent pas aussi facilement disponibles pour le procédé de déglaçage.

Lorsque la production de traces fines et ultrafines est considérée, la construction de la chambre inactinique doit se faire selon des normes différentes. La pureté de l'air de même que le contrôle de la température et de l'humidité sont importants. Une salle propre et le port de vêtements immaculés sont de rigueur.

19.3 Salle hors poussière

Dans la fabrication de circuits à haute densité de traces, la propreté des lieux dans la chambre inactinique est d'une importance capitale. Toute saleté, que ce soit poussière ou morceau de peau ou cheveu, sur l'outillage photographique peut résulter en un défaut de fabrication conduisant au rejet de la carte. Sur les couches internes, un grain de poussière sur l'outillage photographique laisse une fine ligne de réserve non polymérisée pouvant conduire à la morsure non voulue d'une trace. Sur une couche externe, le résultat serait le contraire et produirait un court-circuit entre deux traces.

La norme américaine Federal Standard 209B définit les différentes classes de pureté d'air. Chaque classe détermine la quantité maximale de particules d'une certaine grosseur pouvant être admises dans un certain volume d'air. Le Tableau III illustre cette norme. L'une des installations fréquemment suggérées est d'avoir un environnement de classe 10,000 ou mieux dans la chambre inactinique avec des

Tableau III. Classes de pureté d'air.

Nombre maximum de particules par pi. cu. (par litre) 0.5 microns et plus gros	Classe, Système Impérial (SI)	Nombre maximum de particules par pi. cu. (par litre) 5.0 microns et plus gros
100(3.5)	100(3.5)	*
10,000(350)	10,000(350)	65(2.3)
100,000(3500)	100,000(3500)	700(25)

* Les comptes sous 10(0.35) particules par pied cube(litre) ne sont pas fiables sauf lorsqu'un grand nombre d'échantillons est pris.

Référence: Federal Standard No.209B

hottes de classe 100 au-dessus de certains endroits de travail critiques (20). Ces hottes, appelées HEPA (High Effiency Particulate Air), filtrent l'air de façon très localisée. Elles permettent l'installation d'un système de filtration d'air efficace à moindre coût.

Un contrôle sur la température et l'humidité est aussi nécessaire. Un variation de l'un ou l'autre de ces paramètres occasionne un changement de dimension de l'outillage photographique qui est souvent composé d'un support de gélatine, substance hygroscopique. Quoique sur des circuits avec des traces de 200 μm et plus ce changement ne soit pas aussi critique, il peut engendrer de graves problèmes de concordance sur les cartes multicouches. Des températures raisonnables sont de l'ordre de 21°C ± 1° avec une humidité relative de 45% ± 5% (21).

19.4 Electricité

L'installation électrique se fait en deux temps. La première étape consiste à installer l'éclairage, si ce n'est déjà fait, et à amener les fils dans le plafond jusqu'à l'emplacement approximatif des machines. La connexion des machines au système électrique se fait plus facilement si les machines sont déjà en place. Une fois que l'emplacement des machines est déterminé pour de bon, les fils sont extraits du plafond et la machine est reliée par connexion directe sans prise de raccordement. Ceci évite d'avoir des câbles jonchant sur le plancher.

Lorsque possible, les raccordements sont faits sur tension de 600 V. Sinon, des tensions de 460 V et 208 V sont utilisées. L'unité d'insolation PC-130 est de fabrication allemande et requiert exceptionnellement 380 V. Un transformateur 460/380 V est fourni avec cet appareil.

Rappelons que l'éclairage de la chambre inactinique doit se faire au moyen de tubes fluorescents jaunes, ambre ou or dont l'émission ne contient aucune longueur d'onde dans les régions du bleu, violet ou ultraviolet. Un maximum de 750 lux devrait être alloué sur les surfaces de travail, bien que 2150 lux peuvent être permis pour une durée maximale de cinq minutes lors de la concordance (18).

Toute lumière pénétrant dans la chambre inactinique doit être filtrée contre les radiations au-delà du bleu.

19.5 Tuyauterie

Seuls les bains de rinçage sont raccordés aux drains. Les autres bains sont transvidés dans d'autres contenants lorsqu'ils sont épuisés pour être traités séparément. Il est beaucoup plus facile et efficace de traiter un bain concentré qu'un bain dilué avec les eaux de rinçage. Le même principe s'applique aux machines. Les mordants sont habituellement retournés aux fournisseurs qui en extirperont le contenu en métal.

Dans une installation à grand débit, l'importance de la ségrégation des effluents n'est pas à négliger. Dans les eaux contenant des chélates, il est beaucoup plus difficile d'en arriver à une précipitation des métaux en suspension. La soude caustique ne parvient pas à elle seule à précipiter le cuivre chélaté. Un traitement spécial est requis pour ces effluents. Il n'est donc pas nécessaire de se compliquer la vie en augmentant le volume de chélates à précipiter.

Les chélates et les complexes sont produits en trois endroits différents dans le laboratoire. Le premier est le cuivre chimique. On y remarque la présence de quadrol, EDTA et autres substances qui maintiennent le cuivre en solution à pH élevé afin que le réducteur

puisse accomplir sa tâche efficacement. L'ammoniac est un puissant complexant et il se retrouve dans le bain de morsure alcaline. Enfin, le nouveau procédé de DuPont que nous évaluerons dans le laboratoire est une troisième source de complexants. Il contient de la thio-urée, lequel forme un complexe avec le cuivre. Il peut être bon de souligner qu'à l'occasion certaines solutions employées pour décaper le film sec contiennent des amines, un autre complexant.

L'eau courante doit être amenée à chaque bain de rinçage ainsi qu'à plusieurs machines. Le débit est fonction des produits chimiques et de la concentration des contaminants à rincer de la surface des flans. De l'eau déionisée est employée pour le montage des bains. Certaines étapes critiques dans le placage pourrait nous forcer éventuellement à utiliser de l'eau déionisée pour les rinçages précédant le bain de dépôt métallique.

De l'air comprimé doit être acheminé à la perceuse numérique et à la machine pour nettoyage par pierre ponce pulvérisée. La perceuse nécessite une pression de 689 kPa minimale sinon elle interrompt son fonctionnement jusqu'à ce que la pression se rétablisse.

Les bains de cuivrage chimique et électrolytique ont aussi besoin d'une faible quantité d'air provenant d'un ventilateur. Trop d'air devient néfaste pour le dépôt. L'air est acheminé à la cuve au moyen d'un tuyau de 1,5 cm de diamètre à une distance de 2,5 cm du

fond. Le tuyau est percé de trous de 0,75 mm espacés de 2,5 cm et dirigés à 45 degrés vers le fond de la cuve. Enthone (19) donne une évaluation de la quantité d'air requise: 0,09 m^3 par minute à 15 kPa pour chaque mètre perforé de tuyau et pour chaque mètre de profondeur du tuyau dans la solution. On peut assumer que le cuivrage chimique a un besoin d'air comparable. L'air parvenant à ces bains doit être filtré et exempt de tout contaminant. Le bain d'étamage ne doit pas être agité avec de l'air à cause de son action désastreuse sur l'étain.

Un deuxième ventilateur est utilisé pour le système «push-pull». Il faut envoyer juste assez d'air pour pousser les vapeurs nocives vers la hotte. Trop d'air créerait une turbulence qui disperserait les vapeurs dans l'atmosphère de travail et aurait un effet adverse.

SECTION V

COUTS

20. Introduction

Les coûts d'implantation du laboratoire peuvent se répartir en trois niveaux:

1) équipements,
2) infrastructures,
3) opération.

Quoiqu'il soit possible de se procurer du matériel usagé, celui-ci proviendrait presque assurément de l'étranger, principalement des Etats-Unis. L'évaluation de son état s'avérerait difficile sans l'expertise d'une personne qualifiée, et nécessiterait de nombreux déplacements pour en évaluer son état. On ne considérera donc que le coût d'équipements neufs dans l'évaluation.

Pour ce qui est des infrastructures, il est très difficile de fixer un prix sans avoir préalablement défini exactement les besoins de l'Ecole. Après cette étape, des plans et devis peuvent être élaborés et des estimations de coûts avancées par la suite. Aussi nous

contenterons nous de donner des estimations pour un laboratoire de la même taille que celui déjà installé chez D.E.M. Controls. Rappelons que ce local s'avère déjà trop petit et que l'on songe à son expansion.

Les coûts d'opération d'une telle entreprise sont fonction de son utilisation. Or, pour la seule production de circuits répondant aux besoins de l'Ecole, ce laboratoire n'aurait pas sa place. Par contre, si on y rajoute des travaux de recherche et d'ordre pédagogique, cela devient plus intéressant. Mais le laboratoire demeurerait toujours sous-utilisé. Si en plus on pouvait offrir un service de production de prototypes de haute qualité pour des gens en dehors de l'Ecole, l'entreprise pourrait alors possiblement rencontrer ses frais. Le but serait de maintenir le taux d'utilisation aussi haut que possible sans sacrifier les côtés académique et recherche. Nous nous en tiendrons donc à une simple énumération de certains points dont il faudrait tenir compte pour évaluer les coûts d'opération puisque l'utilisation sera évidemment assez basse au début pour augmenter dans le temps après la période de rodage.

L'énumération des coûts majeurs est donnée à l'annexe F.

21. Investissements

Les équipements sont regroupés selon la phase de fabrication à laquelle ils appartiennent. Certains n'ont pas fait l'objet d'une description dans la section précédente. Ainsi, les items sous le titre «concordance» dans la préparation des stratifiés servent à aligner de façon précise l'outillage photographique sur les flans. Le poinçon de film est situé dans un endroit propre, la chambre inactinique jaune par exemple.

Tous les items donnés dans les listes sont des équipements que le laboratoire a ou compte acquérir pour le démarrage des opérations. Ils sont pour la plupart d'un format équivalent à celui qu'on retrouverait dans l'industrie mais de capacité parfois réduite. Les prix mentionnés proviennent soit de soumissions, confirmations téléphoniques ou encore sont le résultat d'une enquête auprès de gens de l'industrie. Pour certains items, il ne fut malheureusement pas possible d'obtenir une évaluation.

Plusieurs des équipements majeurs sont de source américaine ou ont un prix de base en monnaie américaine quoiqu'ils parviennent du Canada. Un taux de change de 25% a été appliqué sur ces prix pour les convertir en équivalent canadien. Ce taux est légèrement pessimiste dans la conjoncture économique actuelle.

Les taxes et les frais de transport ne figurent pas dans cette compilation. L'Ecole Polytechnique n'est fort probablement pas soumise à la taxe de vente fédérale, mais certains frais de douanes pourraient possiblement s'appliquer. Les frais de transport varient selon l'origine du matériel et aussi selon le type d'équipement. Par exemple, la perceuse doit être transportée sur un camion avec des amortisseurs à air.

Ces listes de prix ne sont pas exhaustives. Certains items pourraient encore être ajoutés, alors que d'autres pourraient être retirés ou remplacés par un modèle différent. Par exemple, nous pourrions décider d'ajouter un dispositif automatique qui contrôlerait le mouvement des flans sur les lignes de cuivrage chimique et de galvanoplastie. La possibilité de démarrer le chauffage des bains avant l'arrivée du personnel le matin pourrait aussi être envisagée. L'unité de soudure à la vague était en notre possession avant le début du projet. Nous avons donc décidé de l'intégrer au laboratoire. Par contre, son utilité est douteuse. Nous ne prévoyons pas pour le moment de faire suffisamment d'assemblage pour justifier une unité de ce format.

D.E.M. Controls fabrique des machines servant pour la partie humide du procédé. Ainsi donc, pour le développement et le décapage de la photorésine, la morsure, le ponçage, l'ébarbage et le traitement de conversion de surface du cuivre DuraBOND™, les équipements de

D.E.M. Controls étaient le choix de facto. La décision du choix du modèle de ces équipements fut prise par la compagnie.

21.1 Cartes double face

Comme le lecteur peut le constater, la somme des investissements en équipements monte à 772 274 $. Ces équipements sont pour la plupart indispensables pour le démarrage des opérations du laboratoire.

Les produits consommables sont des matières nécessaires à la fabrication d'une carte et dont il faut renouveler le stock sur une base régulière. Les quantités données ici sont valables pour deux semaines de production à raison de 100 flans par jour. Il est difficile de donner les quantités exactes nécessaires pour la production. Plusieurs de ces matières sont consommées différemment selon le design de la carte. Le perçage des trous est un exemple typique. Deux cartes de dimensions identiques peuvent avoir un rapport de 4:1 quant au nombre de trous à percer. Ce stock est considéré par l'auteur comme nécessaire pour le démarrage des opérations du laboratoire. Par la suite, il faudra les renouveler au besoin tout en conservant à l'esprit que certains délais de livraison peuvent parfois atteindre quelques semaines. La valeur des produits consommables pour le démarrage du laboratoire s'élève à environ 70 150 $.

L'aspect des solutions chimiques est un peu différent. Quoiqu'il faille encore une fois se procurer toute cette liste pour le démarrage, la durée de vie de ces solutions est beaucoup plus difficile à évaluer. Trop de paramètres ont une influence sur les solutions. Par exemple, une solution inutilisée dure beaucoup moins longtemps si on chauffe le bain que si le bain est à la température. Mais alors pourquoi chauffer la solution si on ne s'en sert pas? La question n'est pas tellement de savoir pourquoi un bain est chauffé inutilement, mais de déterminer l'influence de chauffer et refroidir un bain de façon régulière. Car c'est le type d'opération qu'aura le laboratoire: chauffer le bain, traiter quelques flans, refroidir le bain, et recommencer le cycle au bout de quelques jours.

Certaines de ces solutions devraient durer un an. Des solutions de remplissage fortement concentrées sont versées occasionnellement dans les bains afin de maintenir certaines de leurs propriétés. Mais n'empêche qu'après un certain temps l'ajout de ces solutions de remplissage n'est plus suffisant et il faut alors se débarrasser du bain pour le remonter à neuf. D'autres solutions, e.g. les trempages à l'acide sulfurique, sont remplacées plus fréquemment. Au total, nous aurons besoin de plus de 7 150 $ en solutions chimiques pour démarrer le laboratoire.

21.2 Le laboratoire chimique

Le laboratoire chimique est indispensable à la bonne marche des opérations. On y effectue les analyses chimiques des bains et le contrôle de la qualité. La liste des contenants et accessoires et celle des réactifs furent dressées en examinant les feuillets des manufacturiers où chaque analyse quotidienne des bains est décrite. La compilation de ces données nous a permis de déterminer nos besoins. La colonne «pq» indique le nombre d'unités dans l'emballage. Plusieurs prix proviennent du catalogue Fisher Scientifics 1987, le seul disponible au moment d'établir ces listes. Un facteur de conversion global tenant compte de l'inflation pourrait actualiser ces prix à une valeur d'aujourd'hui.

Le matériel nécessaire pour le laboratoire chimique varie très peu lorsque nous ajoutons la capacité de produire des cartes multicouches. Aussi, la liste des réactifs englobe déjà les réactifs requis pour l'analyse chimique des solutions entrant dans la fabrication des cartes multicouches. Le format d'emballage des réactifs est souvent le format le plus petit disponible. Il faut tous ces réactifs pour démarrer le laboratoire et ils dureraient en moyenne un mois si tous les bains étaient analysés quotidiennement.

Au total, le coût du laboratoire chimique s'élève à 50 238 $. A cela, nous pourrions ajouter une option de balayage par rayon Beta.

Cet appareil, au coût approximatif de 20 586 $, permet de mesurer l'épaisseur des placages en surface par une méthode non destructive. Ce ajout porte le montant à 70 824 $. Un appareil similaire permet aussi de mesurer l'épaisseur de métal dans les trous.

21.3 Cartes multicouches

Le matériel requis pour fabriquer des cartes multicouches comprend une unité de déglaçage au plasma. L'acquisition de cette unité peut être très discutable pour un petit emplacement de fabrication de cartes de circuits imprimés. Son coût est très élevé à l'achat, mais très bas pour l'exploitation. Selon le manufacturier, une bouteille pré-mélangée de gaz CF_4/O_2 durera 6 mois en opérant 24 heures par jour, 7 jours par semaine, à un coût approximatif de 2 250 $. On peut traiter 18 flans simultanément, et un cycle dure de 15 à 30 minutes. C'est aussi la seule méthode donnant des résultats supérieurs avec le polyimide. Avec les objectifs de qualité que s'est fixé le laboratoire, cette unité mérite sa place.

L'item «contrôle de l'atmosphère» est un prix très approximatif. Il fut obtenu par téléphone auprès d'une firme se spécialisant dans l'installation de salles hors-poussière avec contrôle sur la température et sur le taux d'humidité. Or, il faut des spécifications beaucoup plus précises afin de pouvoir fixer un prix précis. De plus, une liste d'accessoires devrait aussi accompagner une salle hors-

poussière, e.g. vêtements, tapis antistatique, nettoyage, etc. Le lecteur devrait user de beaucoup de prudence envers ce prix. Il n'est qu'un ordre de grandeur.

Somme toute, le coût additionnel pour produire des cartes multicouches s'élève à 684 950 $ pour le matériel. Les produits consommables et les solutions chimiques suivent le même raisonnement que pour les cartes double face. Les produits chimiques pour le procédé DuraBOND™ seront gratuits pour le temps des expérimentations conjointes avec DuPont. Le coût des produits consommables est difficile à évaluer faute de données suffisantes sur notre production de cartes multicouches. Les solutions chimiques ont une valeur approximative de 3 450 $.

22. Infrastructures

Les infrastructures pour un laboratoire tel que présenté jusqu'ici sont d'abord un local suffisamment grand pour contenir tout cet équipement. Des espaces pour des bureaux n'ont pas à être considérés dans la situation actuelle puisque nous utiliserons en partie des espaces appartenant à D.E.M. Controls pour cette fonction. Toutefois, dans l'éventualité d'un déménagement du laboratoire à l'Ecole Polytechnique, il faudrait compter sur quelques dizaines de mètres carrés de plus. Quelques mètres carrés de plus sont aussi nécessaires pour le stockage des produits chimiques dans un endroit

sécuritaire. Sans les bureaux, l'espace nécessaire est de 300 m^2 pour fabriquer des cartes double face, et 150 m^2 de plus pour les cartes multicouches. Si on considère le coût moyen de l'agrandissement actuel de l'Ecole qui est de 1 720 $/$m^2$, nous aurions besoins d'environ un demi million de dollars pour 300 m^2 et un quart de million additionnel pour atteindre 450 m^2. Une installation industrielle en dehors du site de Polytechnique serait sûrement moins onéreuse.

Les coûts afférents aux installations sont ceux exigés pour modifier le local existant pour permettre de faire fonctionner les équipements. Les coûts désignés ici comprennent les matériaux et la main-d'oeuvre pour l'installation complète du laboratoire, cartes double face et multicouches ensemble.

Les murets de protection sont une mesure de sécurité en cas de débordement ou d'une fissure survenant sur une cuve ou une machine. Ils forment une sorte de bassin sans drain, fait de PVC mince et ayant un rebord de 5 cm. Chaque ligne de machines a son propre bassin. L'aire des cuves a un seul bassin de 13,2 x 2,9 m.

Les frais relatifs à la plomberie peuvent sembler élevés, mais suffit-il de mentionner que chaque joint est soudé et non pas simplement collé. Ce petit détail augmente énormément les coûts de la main-d'oeuvre.

Enfin, les débours pour l'installation s'élèvent à 90 500 $.

23. Coûts d'opération

Les coûts d'opération d'un laboratoire de recherche dépendent trop de l'utilisation qui en est faite pour pouvoir y rattacher facilement des chiffres. Nous laisserons donc tomber les coûts d'électricité, de chauffage, de téléphone, etc. et n'évaluerons que les coûts reliés aux matières premières.

La quantité de matières premières nécessaires à la fabrication d'une carte est variable d'un lot à l'autre. Le nombre de trous et leur diamètre, la surface des conducteurs, le nombre de couches, le type de support isolant métallisé, etc., sont autant de facteurs à prendre en considération. Nous nous contenterons donc de ne spécifier que le coût des matières premières entrant dans la fabrication de la plupart des cartes.

Il est possible de déterminer la longévité approximative d'une solution chimique pour une utilisation continue, mais il est beaucoup plus difficile de faire de même pour un emploi occasionnel, plusieurs solutions se dégradant avec le temps par une simple exposition à l'air ou à la chaleur. Le cuivrage chimique en est un exemple. Pour

une utilisation continue, Enthone évalue à 6,5 m^2/L la longévité moyenne d'un bain.

La durée de vie des anodes dépend principalement de la surface et de l'épaisseur des dépôts. Un plan de masse grugera évidemment plus de cuivre sur l'anode qu'un circuit n'ayant que des conducteurs. L'épuisement des solutions de dépôt métallique suit le même principe. Un dépôt supérieur de métal nécessitera un emploi accru d'additifs.

Il faut aussi tenir compte des produits chimiques pour les analyses dans le laboratoire chimique. Des analyses quotidiennes doivent être faites sur la majorité des bains. Certains de ces produits peuvent durer plusieurs années, e.g. les indicateurs, alors que d'autres doivent être renouvelés environ chaque mois.

Les forets de la perceuse ont une longévité moyenne de 2 000 trous en supposant des supports de type FR-4 et 1 oz de cuivre. Cette longévité change avec un type de support différent ou un feuillard de cuivre plus mince.

Pour d'autres matières premières, leur consommation n'est fonction que de la surface du flan. La dimension du flan est choisie de telle sorte qu'elle optimise l'utilisation de la surface en y disposant une ou plusieurs cartes. Les épargnes sous forme de film

sec doivent recouvrir la surface entière du flan. Elles viennent en rouleaux de largeurs standards.

La structure de fixation des prix est souvent complexe. Le nombre de facteur affectant le coût de production d'une carte est assez considérable. Le design de la carte et la manière d'opérer de l'emplacement de production sont certes à considérer. Un laboratoire ne produisant que des prototypes a certainement des coûts unitaires plus élevés pour fabriquer des cartes qu'une entreprise à grand volume. Une étude poussée sur la façon de déterminer le coût unitaire de chaque prototype à produire devrait faire suite à ce projet.

Nombre de trous, surface de cuivre à plaquer, finition, nombre de couches internes, sont des facteurs influençant la consommation des matières premières. La largeur des traces et des espaces, trous borgnes ou ensevelis, un grand nombre de couches internes, sont des éléments ayant un effet important sur le taux de rejet. Le taux de rejet est un reflet de l'efficacité de la production. Il devrait être assez bas pour le laboratoire puisqu'il sera possible de porter une attention plus particulière sur le produit. Par contre, trop peu de données existent pour nous permettre d'évaluer ce taux en regardant ce qui se passe dans l'industrie des prototypes.

Un personnel de quatre personnes devrait être suffisant pour démarrer le laboratoire. Il comprendrait deux opérateurs de machi-

nes, un technicien en chimie pour les analyses, et un ingénieur pour s'occuper de la coordination des projets, du contrôle de la qualité, du maintien de l'inventaire. L'ingénieur devrait également voir au rayonnement du laboratoire dans l'industrie.

SECTION VI

RECHERCHE ET FORMATION

24. Recherche

Le laboratoire de fabrication de circuits imprimés doit être perçu comme un incubateur de recherche, une usine miniature où plusieurs types d'activités peuvent avoir lieu simultanément. Il doit pouvoir jouer le rôle de moteur à la recherche et au développement. L'Ecole a le personnel compétent tant chez ses professeurs que chez ses chercheurs pour y arriver. Le département de génie électrique ayant déjà les capacités de concevoir les masques avec l'aide de différents logiciels (P-CAD, Mentor Graphics, CBDS), ce laboratoire lui procure l'accès à un procédé complet, de la conception au produit fini, pouvant servir de modèle en temps réel pour la formation d'étudiants tant au baccalauréat qu'aux études supérieures.

En ayant accès au laboratoire, certaines compagnies trouveraient un intérêt à s'y joindre pour le développement de leurs produits. En ce moment, les sites fabriquant des circuits imprimés sont dédiés soit à la production, soit à la recherche. Le peu de sites de recherche existants sont malheureusement captifs, i.e. seule la compagnie mère y a accès. Lorsque de nouvelles expérimentations

doivent être effectuées pour l'évaluation d'un produit ou d'une nouvelle technique de production, il faut souvent arrêter une chaîne de production complète, ce que très peu de compagnies sont prêtes à faire à cause des coûts impliqués.

Ce projet que nous sommes à mettre sur pied est unique. Le laboratoire aura l'avantage distinct de pouvoir faire recherche et production simultanément tout en étant accessible à l'industrie. Aucune autre installation de ce type n'est à l'heure actuelle disponible dans l'industrie. Nous devrions être en mesure de reproduire certaines situations typiques à un contexte de production à grand volume et de résoudre les problèmes techniques qui y sont rattachés. Le laboratoire ouvre la porte à d'éventuelles autres associations ou coopérations avec différents partenaires industriels.

Les possibilités de recherche sont variées et impliquent la participation de plus d'un département de génie. L'un peut s'attarder au niveau de la fabrication comme telle de cartes de circuits imprimés, tout comme il serait aussi possible d'utiliser ce procédé pour développer de nouvelles techniques ou théories de contrôle de procédé. Le potentiel est grand.

Le département le plus impliqué serait assurément celui de génie chimique. A la lumière des explications données jusqu'à présent, le lecteur a déjà pu se rendre compte que le procédé est principalement

de nature chimique. Le département de génie métallurgique est aussi visé par les dépôts métalliques et l'analyse de leurs propriétés.

Voici quelques exemples de projets potentiels auxquels l'Ecole Polytechnique pourrait éventuellement s'intéresser.

24.1 Philosophie d'interconnexion

Il semble qu'il faudra un jour développer de nouvelles manières d'interconnecter les composants électroniques. Comme nous l'avons déjà mentionné, la complexité croissante des circuits intégrés fait en sorte que le nombre de connexions entre les composants augmente à un rythme fou. Il en découle des pressions énormes sur les cartes de circuits imprimés. Il existe deux façons à l'heure actuelle de faire face à cette situation. La première consiste à diminuer la largeur des traces, la deuxième à augmenter le nombre de couches. Des barrières physiques sont rapidement rencontrées si seule la surface de la carte est augmentée.

Certains fabricants rêvent du jour où ils pourront produire des circuits avec des conducteurs d'une largeur d'aussi peu que 12 microns. Mais il faudra alors développer de nouvelles techniques de fabrication car avec les procédés actuels, une ligne si fine disparaît complètement lors de la morsure. Encore faudrait-il qu'elle soit mécaniquement assez résistante.

Il semble y avoir une limite à la largeur des conducteurs que l'on ne cesse de diminuer et au nombre de couches que l'on peut superposer. Ici le problème vient du fait qu'il est très difficile de faire concorder un nombre croissant de couches. Il y a aussi qu'avec une épaisseur accrue de la carte et un diamètre de trou très petit, le pouvoir de pénétration des solutions de galvanoplastie n'est pas suffisant pour obtenir un dépôt uniforme à l'intérieur du trou. Ceci amène le galvanoplaste à devoir déposer beaucoup plus de métal sur les conducteurs qu'il ne le voudrait, ce qui aggrave la morsure sous-jacente. Et pourtant, la complexité des circuits intégrés ne semble pas avoir de limites pour le moment.

24.2 Fabrication de cartes de circuits imprimés

A l'heure actuelle, il n'existe aucun système capable de contrôler le procédé complet. Quelques systèmes permettent bel et bien d'automatiser certaines parties du procédé, mais ils visent surtout à minimiser la manipulation des flans. D'autres offrent des équipements contrôlant en partie la galvanoplastie, mais c'est à peu près tout. Personne n'est en mesure de fournir un système complet et intégré permettant de contrôler le procédé complet. La principale raison vient du manque de compréhension de la part de plusieurs intervenants sur l'effet de la variation de certains paramètres sur le procédé.

La façon actuelle de procéder est assez simple. Après moult essais et erreurs, les fabricants finissent par trouver un point d'équilibre où tout semble bien fonctionner. C'est la technique du "pifomètre". Personne n'ose faire de changements par la suite, ne sachant pas à quoi s'en tenir dans bien des cas. Des études approfondies sur l'effet de la variation de certains paramètres sur le procédé doivent d'abord être entreprises. Un contrôle rigoureux du procédé devient critique lorsque la complexité des circuits s'accroît.

La métallisation des trous par le dépôt de cuivre chimique est un procédé qui a déjà subi plusieurs attaques de la part des manufacturiers comme étant la source de nombreux problèmes. La technique usuelle utilisant le palladium comme catalyseur prend de 30 à 40 minutes, inclut au-delà de 15 étapes et est sensible aux variations de température (l'accélérateur doit être maintenu entre 30 et 32°C). De plus, cette étape est une grande source de pollution. Le volume des effluents est assez considérable et contient des chélates. Les succès remportés pour modifier cette méthode de métallisation sont assez minces. La technique de pulvérisation au plasma semble prometteuse mais à un coût inabordable pour le moment.

24.3 Activités connexes

24.3.1 Fabrication de machines

La fabrication des machines servant à la fabrication de circuits imprimés a aussi ses problèmes. Elles sont faites de matériaux plastiques et leur assemblage requiert plusieurs heures de soudage. Tout ceci est fait à la main. Il semble que la seule façon d'obtenir un lien solide, imperméable et durable est d'utiliser de l'air chaud et de chauffer lentement la jonction pour obtenir une fusion des matériaux. C'est un peu comme l'industrie de l'automobile où les voitures de grande qualité sont encore faites à la main.

24.3.2 Manutention

La manutention des circuits flexibles est un problème généralisé. Principalement faits de polyimide, ces circuits minces sont presque aussi flexibles qu'une feuille de papier. Il faut des convoyeurs offrant un support sur une grande superficie tout en permettant au liquides vaporisés d'atteindre le flan. Lors de la morsure, la flexibilité du matériel crée des flaques entre les rouleaux des convoyeurs. Le liquide stagnant est difficilement évacué et a des conséquences fâcheuses lors de la morsure. En effet, le taux de morsure devient différent entre les deux faces du flan. La morsure de la face inférieure est beaucoup plus uniforme et rapide.

Ce matériau est aussi difficilement traitable en position verticale. Il requiert un support tout le long de son périmètre car il s'enroule sur lui-même lorsqu'il est submergé dans un liquide. Il ne peut être entreposé même temporairement sur des étagères verticales entre différentes étapes de fabrication comme c'est le cas avec des matériaux usuels. Le polyimide est pourtant un matériau très utilisé pour les couches internes.

24.3.3 Supports isolants

De nouveaux matériaux servant de support isolant au circuit imprimé sont requis pour les nouvelles technologies. Les composants montés en surface ont un coefficient de dilatation thermique différent des supports réguliers tels ceux à base de fibre de verre et de résine (e.g. le FR-4). Par conséquent, lorsque la carte est soumise aux températures élevées de la soudure, le composant et le support isolant ne se dilatent pas au même rythme. Pendant le refroidissement, le joint soudé est soumis à de fortes contraintes et un bris est fréquent. Des matériaux ayant une faible constante diélectrique pour diminuer la diaphonie et une bonne stabilité thermique sont aussi recherchés pour les circuits micro-ondes.

24.3.4 Laser

L'industrie tente d'utiliser le laser à différentes sauces, autant pour le perçage des trous que l'inspection des soudures ou l'impression directe. Cette dernière technique décrite à l'annexe C en emballe plus d'un à l'heure actuelle. Cependant certains problèmes quant à la photorésine, la vitesse d'impression et la définition attendent toujours leur résolution.

24.3.5 Pollution

Les industries de traitement de surface sont une source majeure de pollution. Elles déversent annuellement des effluents contenant des tonnes de métaux lourds. Les lois de protection de l'environnement se font de plus en plus sévères à cet égard et des méthodes plus efficaces pour précipiter une plus grande quantité de ces métaux sont nécessaires pour se conformer à ces lois. Les chélates obligent fréquemment la ségrégation des effluents car leur précipitation est plus compliquée. Le lien complexe doit être rompu avant de pouvoir procéder à la sédimentation. Plusieurs sites ont des difficultés à répondre aux exigences gouvernementales avec leurs équipements souvent désuets.

24.3.6 Tests

Les nouvelles méthodes de fabrication de circuits imprimés exigent le développement de techniques novatrices pour effectuer des tests sur la qualité des cartes. Un représentant de DuPont nous a fourni un exemple lors de sa visite au mois d'octobre. On prétend généralement que si un flan a pu passer l'étape de refusion sans qu'il y ait de décollement interlaminaire, il pourra sortir de la soudure à la vague sans problème. Tout va bien jusqu'au moment où on utilise des composants montés en surface. La soudure se fait alors différemment dans ce cas. Pour ce type de composants, une crème de brasure est appliquée sur les pastilles puis les composants y sont déposés. L'application de chaleur fait fondre la crème et produit la soudure. Mais lorsque cette chaleur provient d'une source infra-rouge, le métal des couches internes s'échauffe aussi rapidement que la crème de brasure car le support isolant est perméable aux infra-rouges. Un décollement interlaminaire est souvent observé. Aucun test ne permet de prévoir ce phénomène avant la phase de soudure pour le moment.

D'autres exemples pourraient être avancés, mais le temps dictera vers où se concentrera notre attention. L'association avec d'autres partenaires industriels amènera sûrement des problèmes réels et concrets sur lesquels nous nous pencherons.

Tableau IV. Récapitulation des projets potentiels.

	Méc	Ele	Chi	Mét	Phy	Ind	Inf
Contrôle du procédé		x	x				x
Mesure de paramètres		x	x				
Manutention de circuits flexibles	x					x	
Métallisation des trous			x	x			
Pollution			x				
Galvanoplastie de longs et petits trous			x	x			
Impression directe au laser		x	x		x		
Supports isolants	x		x		x		

Les sujets suivants sont de nature plus générale et peuvent intéresser tous les départements:

Développement de tests
Philosophie d'interconnexion
Concordance des couches
Centre de terminologie

25. Formation

Le laboratoire aura un rôle important à jouer dans la formation des étudiants. En ce moment, très peu d'étudiants savent comment se fabrique une carte de circuits imprimés à la fin de leur cours de premier cycle. Les étudiants des cycles supérieurs n'en savent guère plus. Cette situation est fort déplorable.

Les étudiants en génie électrique seraient les premiers à bénéficier d'une formation sur le cycle de conception d'une carte de circuits imprimés. A l'heure actuelle, ces étudiants ne connaissent

que le tout début du cycle: le griffonnage sur papier d'un schéma de principe. Au mieux vont-ils faire l'essai de leur circuit sur une plaque de montage ("breadboard").

Comment faire voir à l'étudiant le temps que peut prendre un cycle complet, de l'idée originale d'un circuit à la carte finale, si on ne peut lui expliquer et lui faire expérimenter quelques unes des étapes? Il faut donner à l'étudiant des notions globales sur ce cycle afin de lui permettre de pouvoir fixer des échéanciers et de déterminer le coût d'un projet.

La connaissance du processus entier de la conception et de la fabrication d'un circuit imprimé servirait à l'ingénieur à plus d'un point. Elle lui permet d'abord d'évaluer l'impact de son design sur les étapes ultérieures. Elle lui donne aussi une idée du réalisme de la faisabilité de sa conception.

La conception de circuits opérant dans le domaine des hyperfréquences est un bon exemple. Ici, il faut contrôler l'impédance de chaque conducteur afin qu'il demeure purement résistif à la fréquence d'opération. Pour ce, il faut jouer sur quatre paramètres: la largeur et l'épaisseur du conducteur, la constante diélectrique du support isolant, et la distance séparant le conducteur du plan de masse. L'ingénieur peut faire une gaffe monumentale s'il ne sait pas que lors de la fabrication de la carte, les conducteurs des couches

externes recevront un dépôt supplémentaire de cuivre à la galvanoplastie alors que les couches externes conserveront l'épaisseur originale du cuivre laminé sur le support isolant.

Avec une formation adéquate, l'ingénieur peut envisager différentes options pour son design. Il connait alors les limites de la technologie (e.g. la largeur des conducteurs, nombre de couches maximal pouvant être superposées avec un taux de rejet acceptable, etc.). Il comprend aussi les risques d'avoir des diamètres de trous trop petits par rapport à l'épaisseur de la carte. S'ouvre aussi à lui les multiples possibilités de la technologie en saillie.

Le laboratoire peut également devenir un centre de formation pour l'industrie. Le but visé serait de favoriser l'éducation des opérateurs d'usine pour en arriver à des niveaux de qualité plus élevés. Il est beaucoup moins dispendieux de laisser un employé gâcher un bain de 140 litres lors de son apprentissage que de laisser un tel incident se produire sur un bain d'au delà de 1 000 litres pendant la production. Cette formation pourrait élever le niveau de compétence de l'industrie canadienne des circuits imprimés.

SECTION VII

CONSTATATIONS ET RECOMMANDATIONS

26. Constatations

Pour des raisons maintenant plus évidentes pour le lecteur, l'instauration d'un laboratoire de recherche en fabrication de cartes de circuits imprimés s'avère difficilement réalisable en milieu universitaire. Selon l'entente actuellement en vigueur entre POLY et D.E.M. Controls, le laboratoire est entre les mains de D.E.M. Controls jusqu'en juillet 1989. L'Ecole Polytechnique a un droit d'accès et d'utilisation pour le tiers du temps; un autre tiers est réservé à D.E.M. Controls alors que le dernier tiers est prévu pour des projets conjoints. Au cours de l'été 1989, le laboratoire devrait normalement passer sous la juridiction de l'Ecole mais il est très probable qu'une nouvelle entente sera conclue entre les deux parties afin de mieux respecter les changements apportés au projet en cours d'évolution. Dû à un concours de circonstances, l'ouverture du laboratoire, prévue initialement pour l'été 1988, n'aura vraisemblablement pas lieu avant le printemps 1989.

Les causes de ce retard trouvent d'abord leur origine dans la décision de doter le laboratoire d'équipements additionnels permet-

tant la fabrication de cartes multicouches. Puisqu'à l'époque il était convenu qu'un troisième partenaire ne serait pas introduit dans l'entente (i.e. un organisme subventionnaire), la levée des fonds nécessaires à l'extension de la vocation du laboratoire ralentit l'exécution des travaux d'installation.

L'Ecole se voit donc privée d'une expérience de près d'un an dans l'utilisation et l'opération du laboratoire avant d'en obtenir le contrôle. Cette situation risque de placer l'Ecole dans une position difficile sans renouvellement de l'entente; toutefois, il semble que les délais de départ seront largement compensés par un accès à une technologie plus avancée qui favorisera des projets de R & D plus ambitieux!

Dans la conjoncture actuelle, quatre raisons principales militent en faveur de maintenir le laboratoire en milieu industriel plutôt que de le rapatrier à l'Ecole Polytechnique:

- **Coûts.** Bien que l'entente prévoit que D.E.M. Controls construira les machines de la partie humide pour la fabrication de cartes double côté, il reste encore plusieurs équipements à acquérir avant d'être en mesure d'opérer une installation de production de cartes de circuits imprimés de qualité. Comme la section V et l'annexe F le démontrent, des investissements en capi-

taux de l'ordre de 915 000 $ sont nécessaires pour démarrer une installation de fabrication de cartes double côté. Cette somme inclut le laboratoire d'analyse et de contrôle de la qualité, les solutions chimiques et les équipements. A cela, il faut rajouter les coûts de la ventilation du laboratoire, de l'électricité, des drains, de l'installation des machines, etc. Les frais de transport pour la livraison de l'équipement devraient aussi être considérés.

Mais comme il a déjà été mentionné, l'Ecole aurait avantage à lorgner la capacité de produire des cartes multicouches. L'Ecole est déjà impliquée dans la conception de circuits ITGE. Or, cette technologie a connu un essor phénoménal au cours de la présente décennie. Les circuits complexes faisant un appel intensif aux ITGE nécessitent habituellement un montage sur une carte multicouche. Le nombre de broches de ces circuits est tel qu'une congestion locale des traces autour de la puce est inévitable. Le recours à d'autres technologies non conventionnelles, e.g. la technologie en saillie (Surface Mount Technology), est parfois nécessaire afin de réduire l'encombrement des pièces en surface, mais il n'est d'aucun secours pour le parcours des traces, les broches des composants

montés en surface étant plus rapprochées les unes des autres. La technologie en saillie permet de disposer des pièces de chaque côté de la carte.

La complexité accrue des circuits intégrés exerce d'énormes pressions sur les cartes de circuits imprimés. Une augmentation de la superficie de la carte ne saurait venir à bout à elle seule de la concentration des traces. L'emploi de cartes multicouches dans ces cas est inéluctable.

L'Ecole Polytechnique favorisant d'un côté le développement de circuits intégrés complexes, elle se doit en retour de se pourvoir des moyens pour réaliser le montage adéquat sur support isolant de ces circuits. De plus, face à l'industrie, la capacité de pouvoir fabriquer des cartes multicouches favoriserait la notoriété du laboratoire. Soulignons toutefois que même si l'accessibilité à une installation produisant des cartes multicouches permet d'examiner des aspects typiques à cette technologie, e.g. le déglaçage, d'autres facettes de la fabrication ne nécessitent pas le recours à un équipement aussi sophistiqué, e.g. les résines photosensibles. L'ajout du procédé pour cartes multicou-

ches élargit l'éventail des possibilités de recherche où l'Ecole peut se faire valoir.

Les sommes additionnelles à investir pour franchir ce pas sont assez considérables. En capital, il faudrait trouver des fonds de l'ordre de 475 000 $ pour l'achat d'équipements, si l'on exclut l'acquisition d'une unité de déglaçage au plasma au coût de 175 000 dollars américains. Les coûts d'installation (ventilation, drains, électricité, etc.) devraient être majorés d'environ 20%. Par contre, le coût du laboratoire chimique et des solutions ne varie pas de façon significative avec l'ajout de cette capacité de production.

- **Superficie**. Alors que l'Ecole prévoyait initialement pouvoir emménager le laboratoire dans un local d'une superficie de 100 m², nous réalisons qu'environ 300 m² est un chiffre plus réaliste. Même en tenant compte des dimensions réduites de la ligne Mini-Lab de D.E.M. Controls, il est difficilement envisageable d'être à l'aise dans un espace plus restreint. La fabrication de cartes multicouches réclamerait un autre 150 m² additionnels pour un total de 450 m².

Malheureusement, l'Ecole Polytechnique ne possède pas actuellement une telle superficie. L'ajout récent de deux étages à une partie du bâtiment existant de l'Ecole ne prévoit en aucune façon d'accommoder un tel laboratoire. Le manque d'espace compromet sérieusement l'instauration du laboratoire à l'intérieur des murs de l'Ecole Polytechnique.

S'il venait au lecteur de suggérer à l'Ecole l'idée suivante, à savoir de profiter des travaux en cours pour agrandir encore plus afin d'obtenir l'espace requis, rappelons que l'agrandissement actuel coûte environ 1 720 $/m^2!

- **Utilisation.** La structure opérationnelle même de l'université ne semble pas favoriser une utilisation adéquate d'une telle installation. Au début du projet, l'Ecole semblait surtout désireuse d'avoir la capacité de fabriquer elle-même ses propres circuits pour contourner les longs délais souvent associés à la livraison de prototypes, au-delà d'un mois dans certains cas. Pendant ce mois, les activités du projet sont pour ainsi dire figées. Le lecteur réalise maintenant que l'Ecole ne peut investir autant dans ce seul but.

Pour qu'un laboratoire aussi onéreux puisse trouver sa place à l'intérieur de l'enceinte de l'Ecole Polytechnique, il faudrait s'assurer d'une utilisation à pleine capacité des installations. Or, ceci semble difficile.

L'Ecole conçoit peu de circuits ayant à être montés sur une carte de circuits imprimés. Les résultats sommaires d'une enquête effectuée révèlent qu'une vingtaine de cartes prototypes seraient développées annuellement. Par conséquent, cette faible production ne justifie pas à elle seule l'opération du laboratoire.

L'ajout d'activités d'ordre pédagogique pourrait conduire à une utilisation hebdomadaire. Mais encore là, si l'on considère qu'une session de laboratoire dure en moyenne trois heures pendant 15 semaines et qu'il n'y a que deux trimestres actifs par année, on n'obtient que 30 journées d'activité par année, soit un taux d'utilisation d'un peu plus de 10%.

L'adjonction de contrats de recherche augmenterait assurément l'emploi du laboratoire. Toutefois sa portée est difficile à évaluer. L'Ecole ne possède pour le moment ni l'expertise ni les contacts avec l'industrie pour pouvoir décrocher d'alléchants contrats de

recherche dans le domaine des circuits imprimés. En étant optimiste pour le moment, une occupation totale ne dépassant pas le 50% pourrait se faire avec l'ajout de cette activité.

Une utilisation partielle de ce genre d'installation amène certaines complications. Tout d'abord du point de vue des équipements, certaines solutions chimiques ont tendance à se dégrader avec le temps. On ne peut plus évaluer leur efficacité en fonction de la surface produite et le coût unitaire des cartes augmente en conséquence. L'exposition à l'air diminue grandement les propriétés des solutions de cuivre chimique et des mordants de peroxyde d'hydrogène et d'acide sulfurique. Le cuivre précipitant dans les solutions de morsure forme une croûte dans les machines. Cette condition peut aller jusqu'à ruiner une machine.

Puisqu'aucune des activités ci-haut mentionnées ne peut occuper la totalité des équipements à la fois, à chaque fin de journée les équipements devraient être vidés de leur contenu et nettoyés. A chaque matin où il est prévu que des équipements seront utilisés, les bains auraient à être remontés. Une grande perte de temps résulterait de ce mode d'opération.

- **Personnel**. Le maintien en place d'un personnel qualifié et compétent voyant à la mise en marche et à l'entretien des équipements pourrait être malaisé dans ces conditions d'opération intermittente. L'engagement de personnel à plein temps serait hors de question.

  L'embauche de personnel à temps partiel pourrait être une solution, mais des journées fixes d'utilisation plutôt qu'aléatoires devraient être déterminées. Cet horaire aurait à être défini à chaque début et fin de trimestre ou de projet de recherche.

  L'emploi de personnel déjà existant à l'Ecole serait aussi possible mais pour le moment aucun d'eux ne possède les compétences nécessaires pour faire fonctionner les équipements. Une répartition des tâches entre deux fonctions serait réalisable moyennant une entente avec le syndicat. Une redéfinition de tâches serait nécessaire de même que l'établissement des priorités pour ces employés en cas de conflit entre les deux fonctions.

  Le maintien en opération du laboratoire exige une surveillance quotidienne. Si cette exigence ne peut être

respectée, il faut procéder à une fermeture totale des opérations après chaque utilisation, i.e. vidage des bains à la fermeture et remontage à l'ouverture.

27. Recommandations

A la lumière des constatations données ci-haut et à la suite des explications et des faits soulevés au cours de ce document, l'auteur propose les recommandations suivantes:

1- Renégocier une entente POLY-D.E.M..

- **attendu que** les rapports université-industrie sont fortement encouragés par les milieux gouvernementaux,
- **attendu que** l'Ecole Polytechnique ne saurait probablement pas rencontrer ses frais en s'embarquant seule dans une telle aventure,
- **attendu que** l'industrie possède une organisation beaucoup mieux adaptée pour opérer ce type de laboratoire et y maintenir un niveau d'activité plus élevé,
- **attendu que** l'Ecole Polytechnique ne possède à l'heure actuelle ni l'expertise ni les contacts avec le milieu pour décrocher d'importants contrats de recherche,
- **attendu que** D.E.M. Controls possède ces contacts,

- **attendu que** D.E.M. Controls a un besoin immédiat de Recherche & Développement,
- **attendu que** l'Ecole Polytechnique possède les ressources humaines pour la Recherche & Développement,

il est recommandé de maintenir une association entre Polytechnique et D.E.M. Controls. En renégociant une entente, l'Ecole conserve son droit d'accès et d'utilisation au laboratoire pour la fabrication de ses propres cartes, de même que pour ses activités pédagogiques et de recherche. D.E.M. Controls en contrepartie peut remplir ses périodes vides au laboratoire en les allouant à l'Ecole et obtient un support pour le développement de ses produits.

2- **Agrandir la superficie**.

- **attendu que** le laboratoire est très à l'étroit,
- **attendu que** le laboratoire manque de certains équipements,
- **attendu que** le laboratoire n'aurait pas l'espace pour mettre des équipements additionnels,
- **attendu que** des locaux additionnels sont requis pour la formation et pour un centre de documentation,

il est recommandé d'agrandir la superficie actuelle du laboratoire. D'ailleurs, des études en ce sens ont déjà débuté.

3- **Equipements de tests.**

- **attendu que** le laboratoire désire atteindre dans un laps de temps réduit les limites de la technologie actuelle, incluant des conducteurs ultrafins de l'ordre de 75 μm,
- **attendu que** les cartes de circuits imprimés ayant des conducteurs ultrafins sont très difficiles à inspecter,
- **attendu que** la fabrication de cartes complexes est délicate et plus sujette à la présence de défauts,
- **attendu que** la détection de fautes seulement à la fin du processus de fabrication est très coûteuse,
- **attendu que** les exigences militaires requièrent une batterie de tests,

il est recommandé de munir le laboratoire d'équipements pour l'inspection visuelle automatique et l'analyse de cartes dénudées. D'autres équipements de tests seront aussi requis pour répondre aux spécifications militaires (e.g. tests de contrainte thermique).

4- **Formation d'experts.**

- **attendu que** le laboratoire peut jouer un rôle d'incubateur de recherche,

- **attendu que** la formation des étudiants dans ce domaine laisse à désirer,
- **attendu que** l'industrie a besoin de relever la compétence de son personnel,

il est recommandé de mettre au point des programmes de formation sur mesure pour étudiants, chercheurs et employés de l'industrie.

5- **Centre d'excellence.**

- **attendu que** le gouvernement canadien est à la mise au point d'un réseau de "Centres d'excellence",
- **attendu que** l'Ecole Polytechnque possède déjà les capacités de conception de circuits ITGE,
- **attendu que** la fabrication de cartes de circuits imprimés complexes avec des traces ultrafines ressort de la haute technologie,
- **attendu que** le laboratoire sera unique dans le milieu des circuits imprimés de par concept et de par sa vocation,

il est recommandé de poursuivre des démarches afin de favoriser la présence du laboratoire dans un Centre d'excellence en microélectronique.

6- **Centre de documentation**

- **attendu que** la documentation sur les circuits imprimés est disparate,
- **attendu que** l'accès à cette documentation n'est pas toujours facile,
- **attendu que** l'accès à des documents de langue française est très restreint,
- **attendu que** la qualité du français dans les documents de langue française laisse à désirer,

il est recommandé de créer un centre de documentation sur les circuits imprimés. Puisque la très grande majorité des documents sont de langue anglaise, un centre de terminologie faisant partie de ce centre de documentation favoriserait l'évolution de personnes francophones dans un milieu où l'anglais est roi et maître.

CONCLUSION

L'objectif principal du projet, à savoir l'implantation d'un laboratoire de circuits imprimés en milieu universitaire, a été réalisé. Toutefois, l'étude met en lumière certains problèmes qui forcent un changement d'attitude face à d'autres objectifs du projet. L'implantation d'un laboratoire de circuits imprimés de haute qualité en milieu universitaire se révèle être une entreprise beaucoup plus complexe qu'entrevue au début. Des aspects de coûts, de superficie et de taux d'utilisation viennent donner une toute autre perspective à un projet de cette ambition. La production de cartes de circuits imprimés de qualité ne peut se faire de façon artisanale. Elle doit passer par l'utilisation d'un matériel adéquat. Malheureusement, celui-ci est bien souvent hors d'atteinte de la bourse de celui qui ne veut que produire ses propres cartes dont la quantité est infime.

Une université pouvant difficilement remplir toutes les conditions relatives à l'opération d'un laboratoire de circuits imprimés de haute qualité, il semble pleinement justifié de rechercher l'appui d'un partenaire industriel. Ce partenaire peut s'occuper de l'aspect rentabilité du laboratoire alors que l'université voit au côté recherche. Un horaire déterminé à l'avance établit l'allocation du temps pour chaque activité.

La superficie requise n'étant pas disponible sur le site même de l'Ecole Polytechnique, le recours à un emplacement extérieur s'avère nécessaire. L'association des partenaires permet d'obtenir cette surface et donne un meilleur taux d'utilisation d'une installation si dispendieuse. Elle évite aussi les inconvénients reliés à une utilisation intermittente. Enfin, elle procure à l'université la possibilité de maintenir des liens étroits avec l'industrie. Ce type d'association stimule l'attention de l'université à des situations concrètes et à des problèmes dont la résolution requiert une attention plus immédiate.

La collaboration de différents départements de l'Ecole soulève le caractère pluridisciplinaire du projet. Un laboratoire de ce type invoque la participation de plusieurs secteurs de R & D à l'Ecole. Devant l'intérêt déjà soulevé par l'industrie, il ne fait aucun doute que les projets ne tarderont pas à affluer lorsque la publicité entourant le laboratoire démarrera.

Les fruits de cette association peuvent avoir des répercussions fort intéressantes pour l'Ecole Polytechnique, l'une des plus grandes écoles de génie au Canada. L'imminence de la participation de l'Ecole à la formation d'un Centre d'excellence semble certaine. La mise sur pied d'un Centre d'excellence incluant ce laboratoire contribuerait dans une certaine mesure au rayonnement de l'Ecole Polytechnique dans la société.

Une forte concentration de l'industrie des circuits imprimés se retrouve chez notre voisin du sud. La venue de capitaux étrangers par le biais de cette entreprise est plus que probable. Quelques compagnies ont déjà manifesté leur désir de faire appel à ce laboratoire pour certains projets. La mise sur pied de ce laboratoire suscite un intérêt énorme dans l'industrie dont l'Ecole saura sûrement tirer avantage.

BIBLIOGRAPHIE

(1) Scarlett, J. A.; The Multilayer Printed Circuit Handbook, Electrochemical Publications, 1985.

(2) Clark, Raymond H.; Handbook of Printed Circuit Manufacturing, Van Nostrand Reinhold Company, 1985.

(3) Langan, James P.; "Control of Tin-Lead - Alloy Plating Solutions", Plating and Surface Finishing, v. 70, no. 1, January 1983, pp. 21-23.

(4) Steger, Buzz; "Resist Stripping", Printed Circuit Fabrication, v. 5, no. 4, April 1982, pp. 22-24.

(5) Gurian, Marshall; "Etching Technology Overview", Printed Circuit Fabrication, v. 10, no. 8, August 1987, pp. 12-19.

(6) Tetize, Ray; "Fine Line Etching", Printed Circuit Fabrication, v. 6, no. 2, February 1983, pp. 50-57.

(7) Slominski, Leo J. et al; "Adhesion-Promoting Copper Oxide for Plastic on Multilayer Circuit Boards", Plating and Surface Finishing, v. 69, no. 6, June 1982, pp. 96-99.

(8) DuraBOND™ Multilayer Bonding System, Customer Reference Manual, Dupont Electronics, August 15, 1988, (Rapport interne).

(9) Poskanser, Al; "Smear Removal Techniques: Pros and Cons", Printed Circuit Fabrication, v. 8, no. 6, June 1986, pp. 60-76.

(10) Wynschenk, J. et al; "Genuine Etchback Using Permanganate Systems", Circuit World, v. 13, no. 1, 1986.

(11) Barr, R. W. et al; "Fight Polymer Smear With Radicals", Research & Development, v. 26, no. 11, November 1984, pp. 138-142.

(12) Angstenberger, A.; "Optical Inspection of Printed Circuits: Requirements Placed on AOI in the Manufacturing Process",Circuit World, v. 13, no. 3, March 1987, pp. 8-10.

(13) Hroundas, George; "How to Use PWB Fault Prevention to Improve Manufacturing Yields", Electri-onics, v. 33, no. 1, January 1987, pp. 55-58.

(14) Eason, John et al; "Pollution Control in Electronics Industry", Metal Finishing, v. 82, no. 2, February 1984, pp. 69-74.

(15) Lee, Rex; "Place for Plasma Plating", Circuits Manufacturing, v. 27, no. 4, April 1987, pp. 71-74.

(16) Durney, Lawrence J.; Electroplating Engineering Handbook, Van Nostrand Reinhold Company, 4th ed., 1984.

(17) Menkel, Bruce E.; "Basic Design of a Plating Exhaust System", Plating and Surface Finishing, v. 72, no. 4, April 1985, pp. 26-31.

(18) "Processing Guide for Riston Photopolymer Film 3600 Series - Aqueous Processable", Technical Information Bulletin R-122, DuPont Electronics.

(19) Enplate HT Operating Instructions, Enthone, 1973.

(20) Walton, J. Page; "Cleanrooms in Electronic Production", Electronic Production, v. 16, no. 4, April 1987, pp. 9-14.

(21) Petersen, Tom N. et al; "Cleanliness Counts", Printed Circuit Fabrication, v. 8, no. 6, June 1985, pp. 119-122.

National Library
of Canada

Canadian Theses Service

Bibliothèque nationale
du Canada

Service des thèses canadiennes

NOTICE

QUALITY OF THIS MICROFICHE
EAVILY DEPENDENT UPON THE
TY OF THE THESIS SUBMITTED
ICROFILMING.

RTUNATELY THE COLOURED
TRATIONS OF THIS THESIS
NLY YIELD DIFFERENT TONES
EY.

AVIS

LA QUALITE DE CETTE MICROFICHE
DEPEND GRANDEMENT DE LA QUALITE DE LA
THESE SOUMISE AU MICROFILMAGE.

MALHEUREUSEMENT, LES DIFFERENTES
ILLUSTRATIONS EN COULEURS DE CETTE
THESE NE PEUVENT DONNER QUE DES
TEINTES DE GRIS.

ANNEXE A

Diagrammes synoptiques des étapes de fabrication

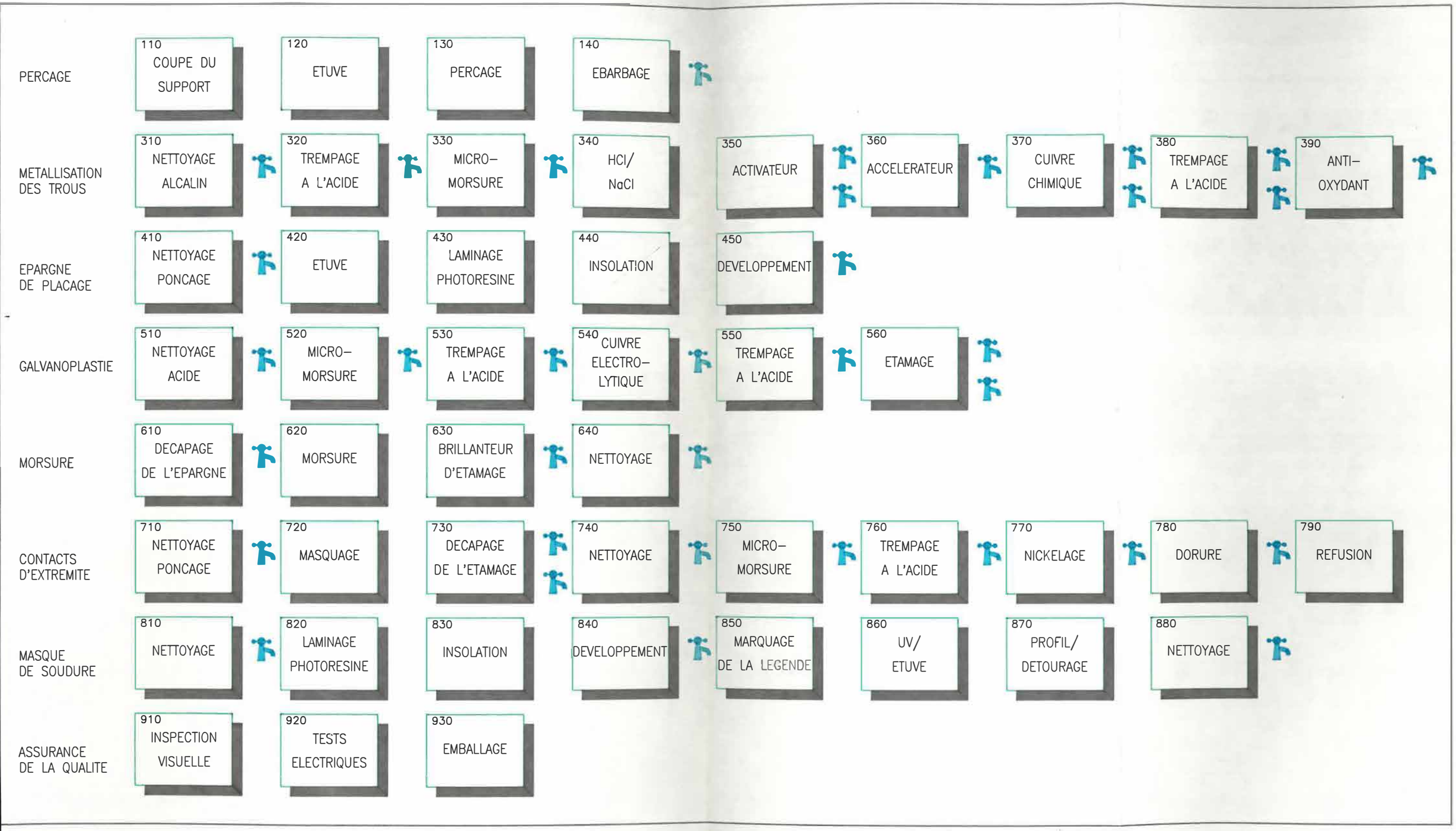


Figure 11. Diagramme des étapes de fabrication d'une carte double côté.

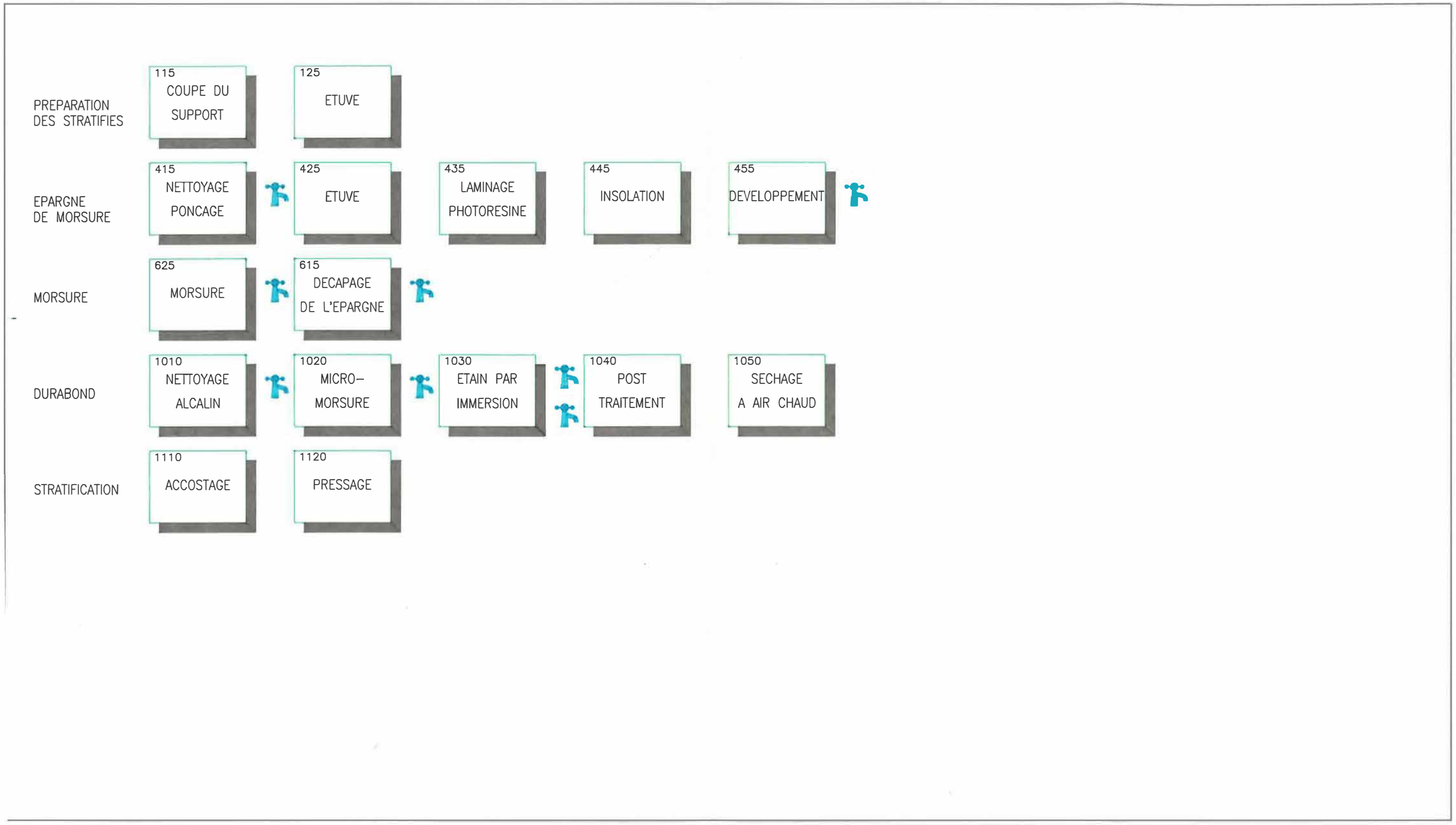


Figure 12. Diagramme des étapes de fabrication des couches internes sans trous ensevelis.

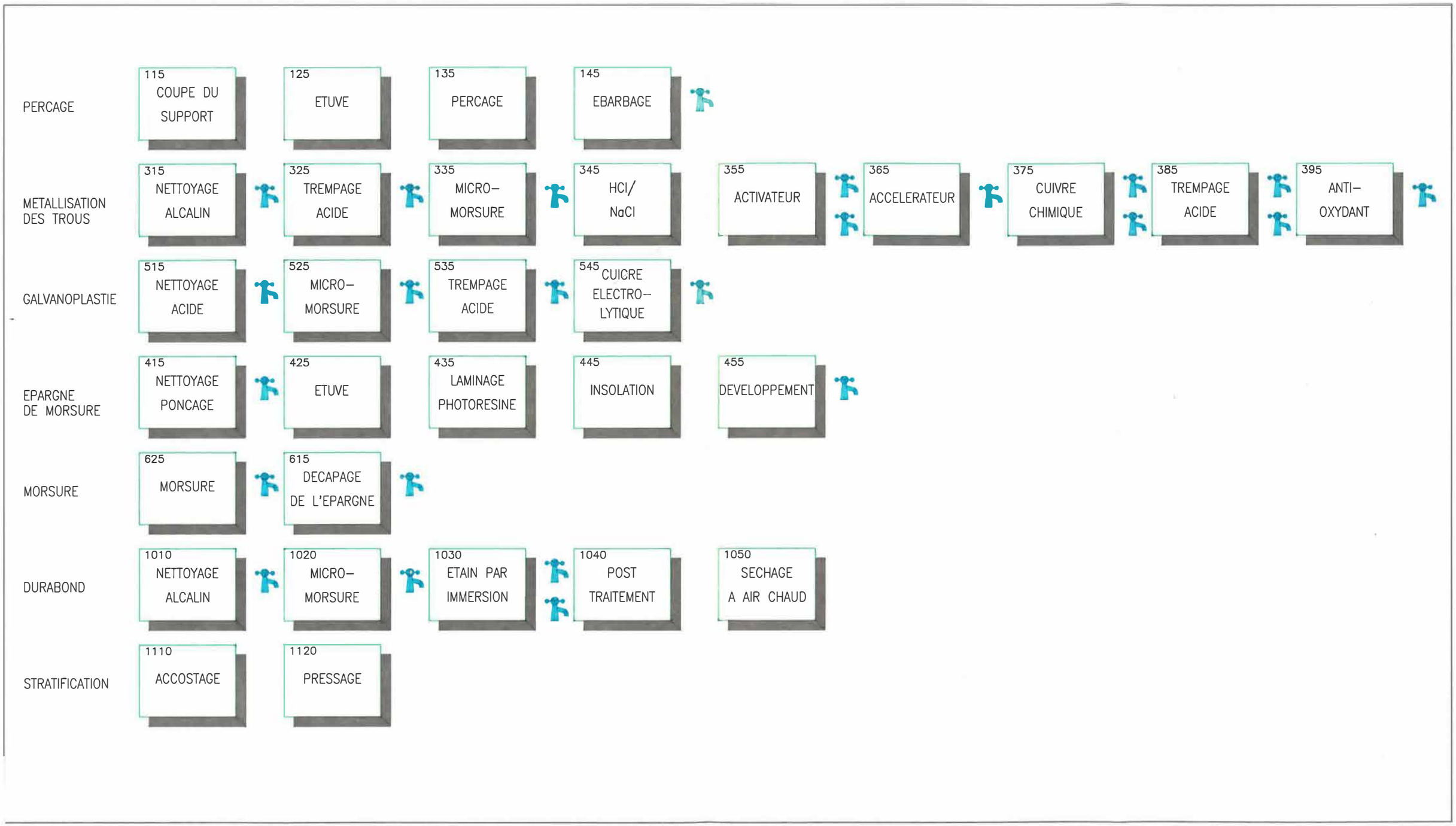


Figure 13. Diagramme des étapes de fabrication des couches internes avec trous ensevelis.

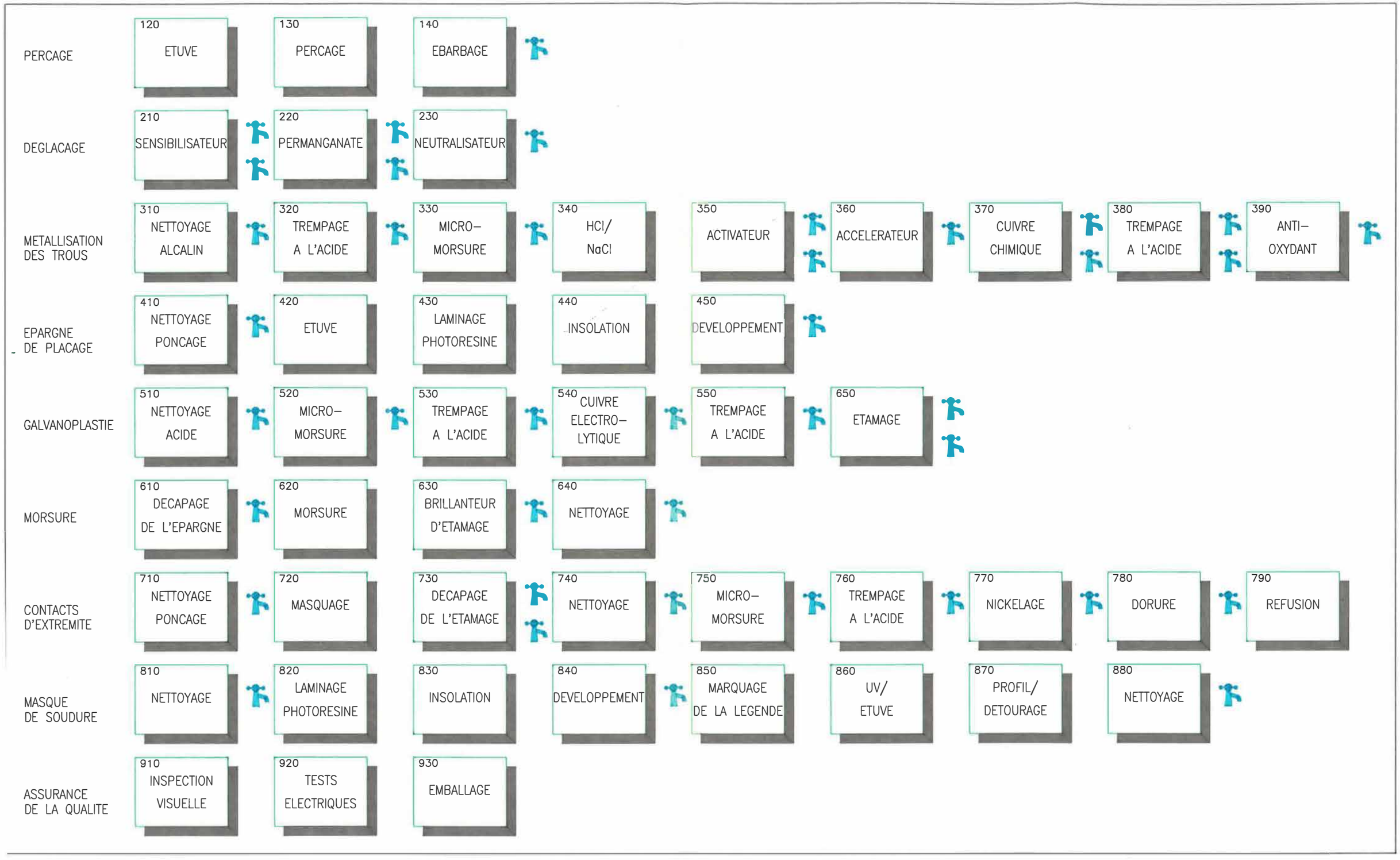
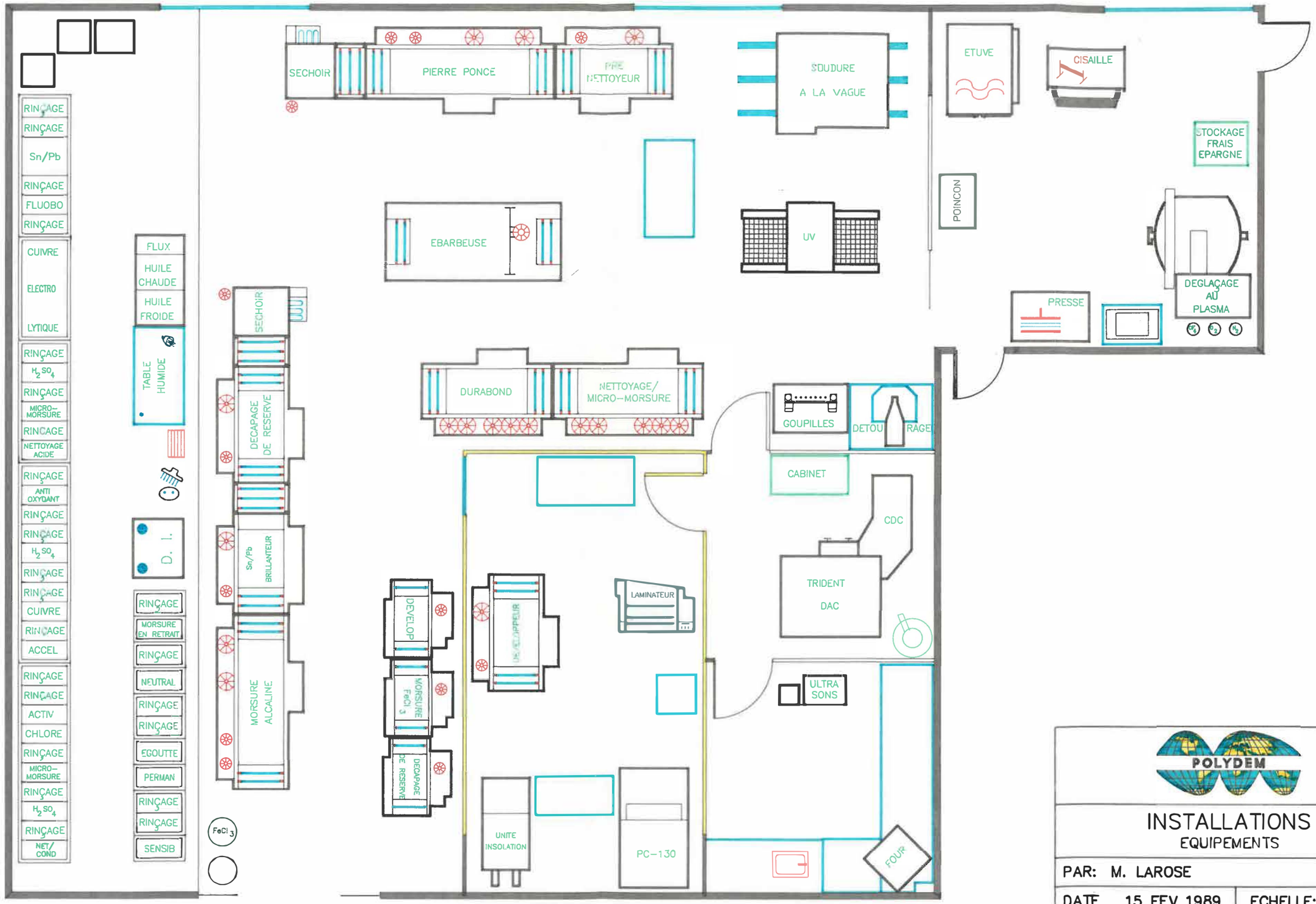


Figure 14. Diagramme des étapes de fabrication d'une carte multicouche après stratification des couches internes.

ANNEXE B

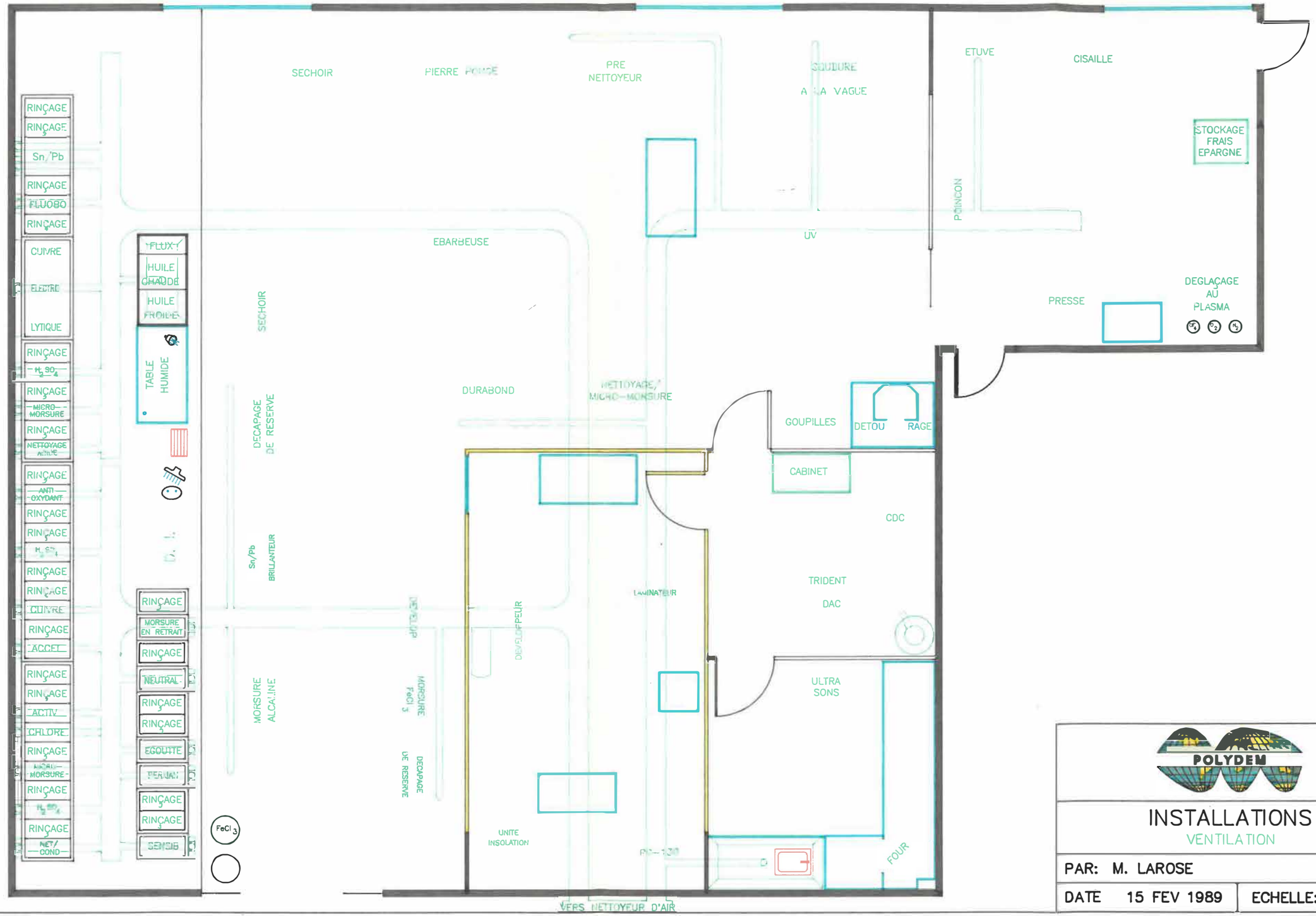
Plans du laboratoire



POLYDEM

INSTALLATIONS
EQUIPEMENTS

PAR: M. LAROSE	NO. 2
DATE 15 FEV 1989	ECHELLE: 3/16"=1'

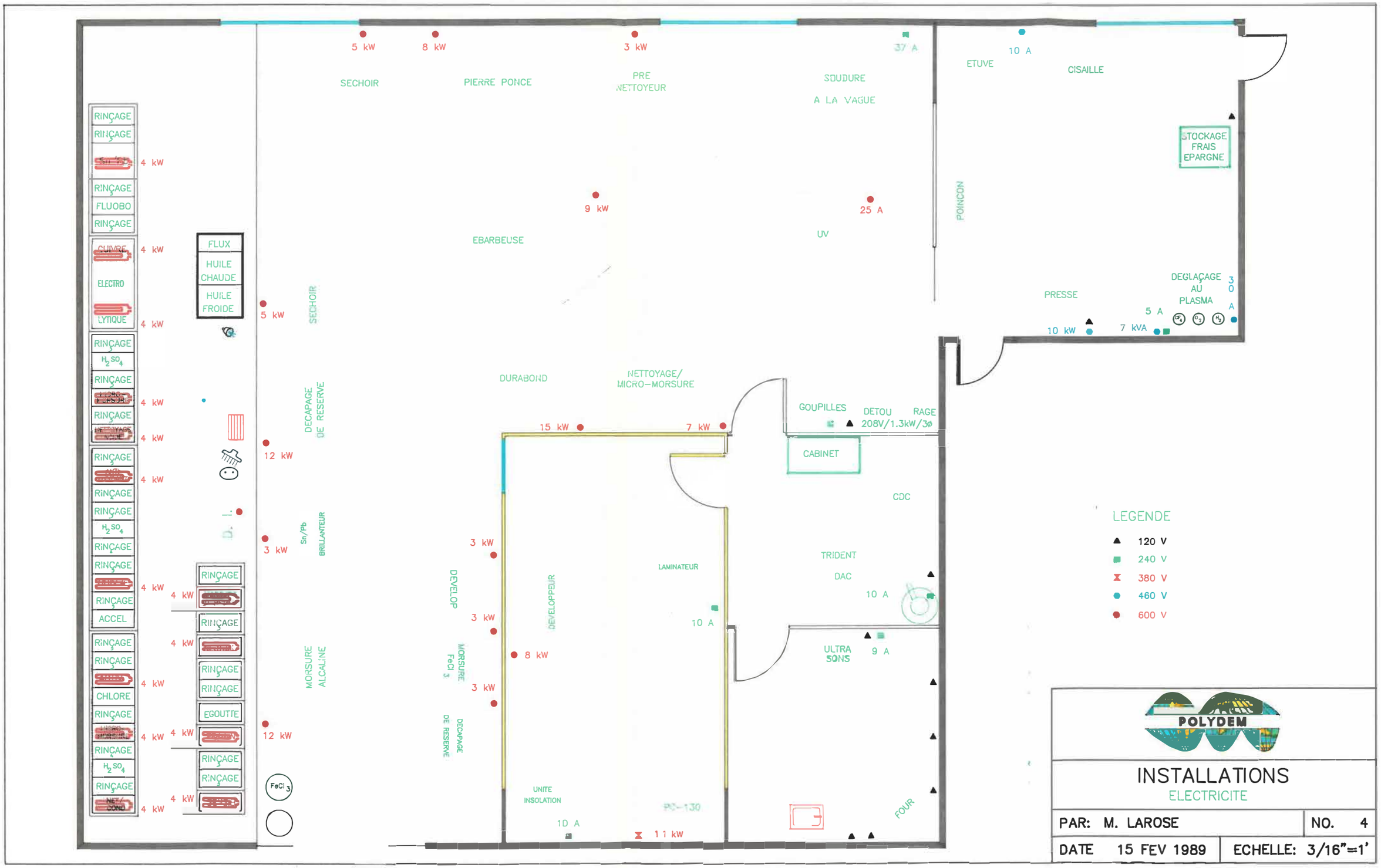


POLYDEM

INSTALLATIONS

VENTILATION

PAR: M. LAROSE	NO. 3
DATE 15 FEV 1989	ECHELLE: 3/16"=1'

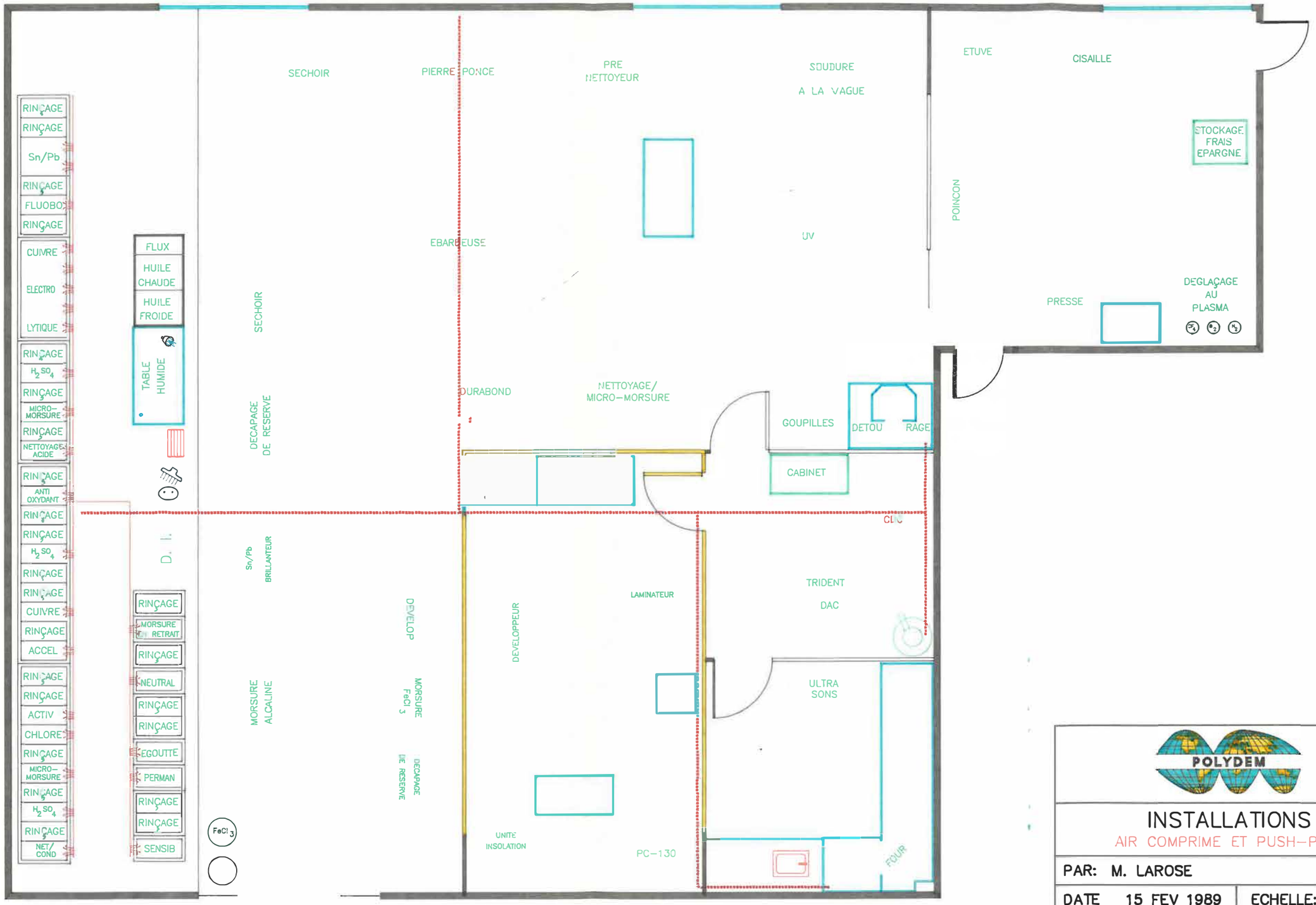

5 kW
8 kW
3 kW
37 A
10 A
SECHOIR
PIERRE PONCE
PRE NETTOYEUR
SOUDURE A LA VAGUE
ETUVE
CISAILLE
STOCKAGE FRAIS EPARGNE
RINÇAGE
RINÇAGE
4 kW
RINÇAGE
FLUOBO
RINÇAGE
CUIVRE
4 kW
ELECTRO
LYTIQUE
4 kW
FLUX
HUILE CHAUDE
HUILE FROIDE
9 kW
25 A
EBARBEUSE
UV
POINCON
PRESSE
DEGLAÇAGE AU PLASMA
30 A
5 A
10 kW
7 kVA
5 kW
SECHOIR
RINÇAGE
H_2SO_4
RINÇAGE
4 kW
RINÇAGE
4 kW
DECAPAGE DE RESERVE
DURABOND
NETTOYAGE/ MICRO-MORSURE
GOUPILLES
DETOU RAGE 208V/1.3kW/3Ø
15 kW
7 kW
12 kW
CABINET
CDC
RINÇAGE
4 kW
RINÇAGE
H_2SO_4
RINÇAGE
Sn/Pb BRILLANTEUR
3 kW
3 kW
LAMINATEUR
TRIDENT
DAC
10 A
RINÇAGE
4 kW
4 kW
RINÇAGE
ACCEL
DEVELOP
DEVELOPPEUR
10 A
3 kW
RINÇAGE
4 kW
RINÇAGE
RINÇAGE
MORSURE ALCALINE
8 kW
MORSURE $FeCl_3$
ULTRA SONS
9 A
3 kW
RINÇAGE
CHLORE
RINÇAGE
EGOUTTE
4 kW
4 kW
12 kW
DECAPAGE DE RESERVE
RINÇAGE
H_2SO_4
RINÇAGE
RINÇAGE
RINÇAGE
4 kW
$FeCl_3$
UNITE INSOLATION
PC-130
10 A
11 kW
FOUR
LEGENDE
120 V
240 V
380 V
460 V
600 V
POLYDEM
INSTALLATIONS
ELECTRICITE
PAR: M. LAROSE
NO. 4
DATE 15 FEV 1989
ECHELLE: 3/16"=1'

POLYDEM

INSTALLATIONS

DRAIN — EAU

PAR: M. LAROSE	NO. 5
DATE 15 FEV 1989	ECHELLE: 3/16"=1'

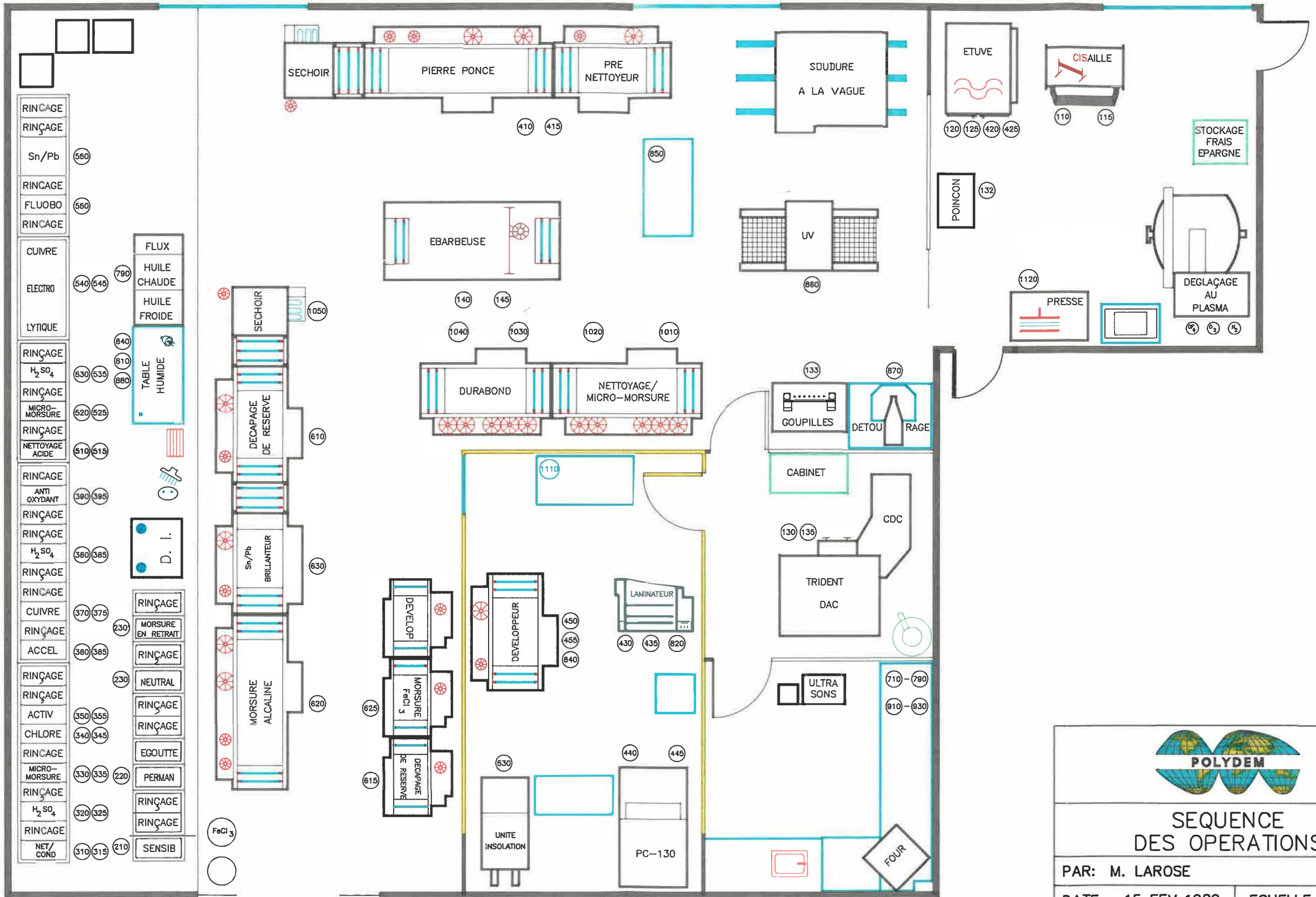


POLYDEM

INSTALLATIONS

AIR COMPRIME ET PUSH-PULL

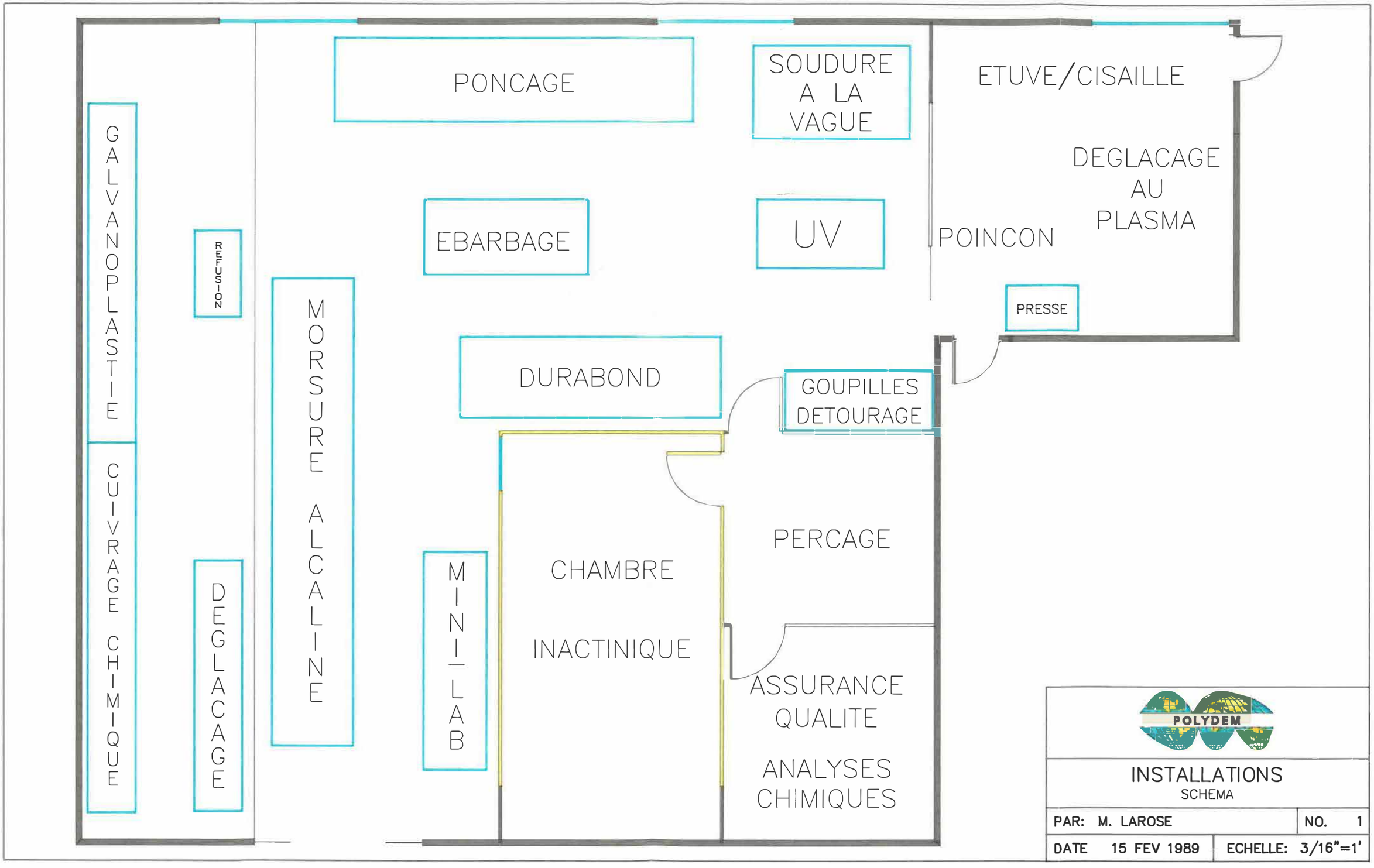
PAR: M. LAROSE	NO. 6
DATE 15 FEV 1989	ECHELLE: 3/16"=1'



POLYDEM

SEQUENCE DES OPERATIONS

PAR: M. LAROSE	NO. 7
DATE 15 FEV 1989	ECHELLE: 3/16"=1'


PONCAGE
SOUDURE A LA VAGUE
ETUVE/CISAILLE
DEGLACAGE AU PLASMA
GALVANOPLASTIE
REFUSION
EBARBAGE
UV
POINCON
PRESSE
MORSURE ALCALINE
DURABOND
GOUPILLES DETOURAGE
CUIVRAGE CHIMIQUE
DEGLACAGE
MINI-LAB
CHAMBRE INACTINIQUE
PERCAGE
ASSURANCE QUALITE
ANALYSES CHIMIQUES
POLYDEM
INSTALLATIONS
SCHEMA
PAR: M. LAROSE
NO. 1
DATE 15 FEV 1989
ECHELLE: 3/16"=1'

ANNEXE C

Impression directe par laser

Les systèmes d'impression au laser sont apparus sur le marché depuis déjà quelques années. Leur réputation pour la précision de leurs tracés n'est plus à faire. De plusieurs heures que requéraient les traceuses optiques conventionnelles, les traceurs au laser accomplissent maintenant le travail en quelques minutes. Les modèles de la dernière génération peuvent insoler la résine photosensible directement sans avoir besoin de passer pas l'outillage photographique conventionnel. Ils exposent en 30 secondes une plaque de 460 x 610 mm.

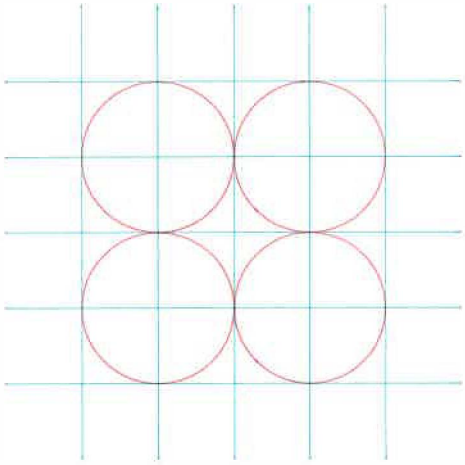
Dans son ensemble, le principe de fonctionnement de l'impression directe au laser (IDL) est assez simple: la plaque est posée sur un plateau mobile plat et un rayon lumineux hautement collimaté est modulé en tout ou rien (allumé et éteint) pendant qu'il balaie la surface de la plaque. La source lumineuse est un laser à l'argon de 6 W dont l'émission spectrale utile est dans la région bleu-vert.

Un rayon lumineux de 25 μm de diamètre est présentement la norme. Les résultats sont semblables à une imprimante à points à très haute précision ou à un écran vidéo. L'espacement entre les pixels est critique. Les premiers systèmes avaient un espacement de 25 μm et le rayon était légèrement hors foyer pour lui donner un diamètre effectif de 37 μm. Les résultats étaient valables pour les lignes horizontales et verticales, mais seulement passables pour les lignes à 45° et s'aggravant pour les angles intermédiaires.

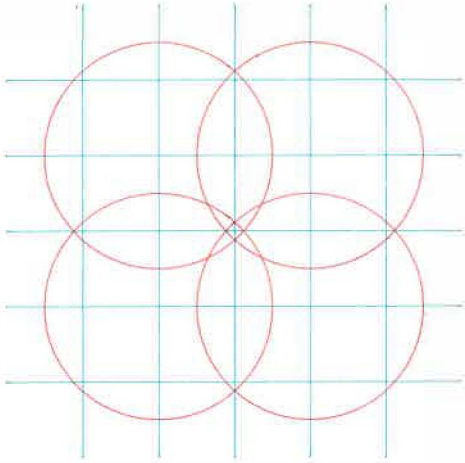
C'est pourquoi certains manufacturiers ont développé des systèmes ayant des espacements d'aussi peu que 3 μm. L'amélioration peut être visualisée à la Figure 15 et à la Figure 16. Les contours crénelés des traces disparaissent avec la diminution des espacements. Mais il y a un prix à payer.

En augmentant la définition par un facteur X, on doit augmenter le temps d'impression par un facteur de X^2. Considérons une plaque de 460 x 610 mm. Avec une définition de 25 μm, on obtient 449 millions de pixels. Si on double la définition, on arrive à 1 796 millions de pixels. Avec des pixels espacés d'aussi peu que 3 μm, la carte contient 29 Gpixels. Avec ce nombre effarant plusieurs problèmes surviennent.

Tout d'abord, les données, qui arrivent selon un format vectoriel, doivent être converties en un format matriciel. La quantité d'information à digérer devient tout simplement gargantuesque. De plus, si on désire toujours insoler une plaque en 30 secondes avec 29 Gpixels, de sérieux problèmes de modulation (allumer et éteindre le laser) surgissent. Le coût des systèmes au laser pouvant soutenir de telles vitesses est exorbitant. On doit donc accepter une augmentation du temps d'insolation.



Avec un pixel de 25 microns et un espacement de 25 microns, le centre des cercles n'est pas soumis aux radiations lumineuses.



Avec un pixel de 37 microns hors foyer et un espacement de 25 microns, le centre est maintenant exposé et le crénelage réduit.

Figure 15. Effet de la dimension du pixel sur les traces.

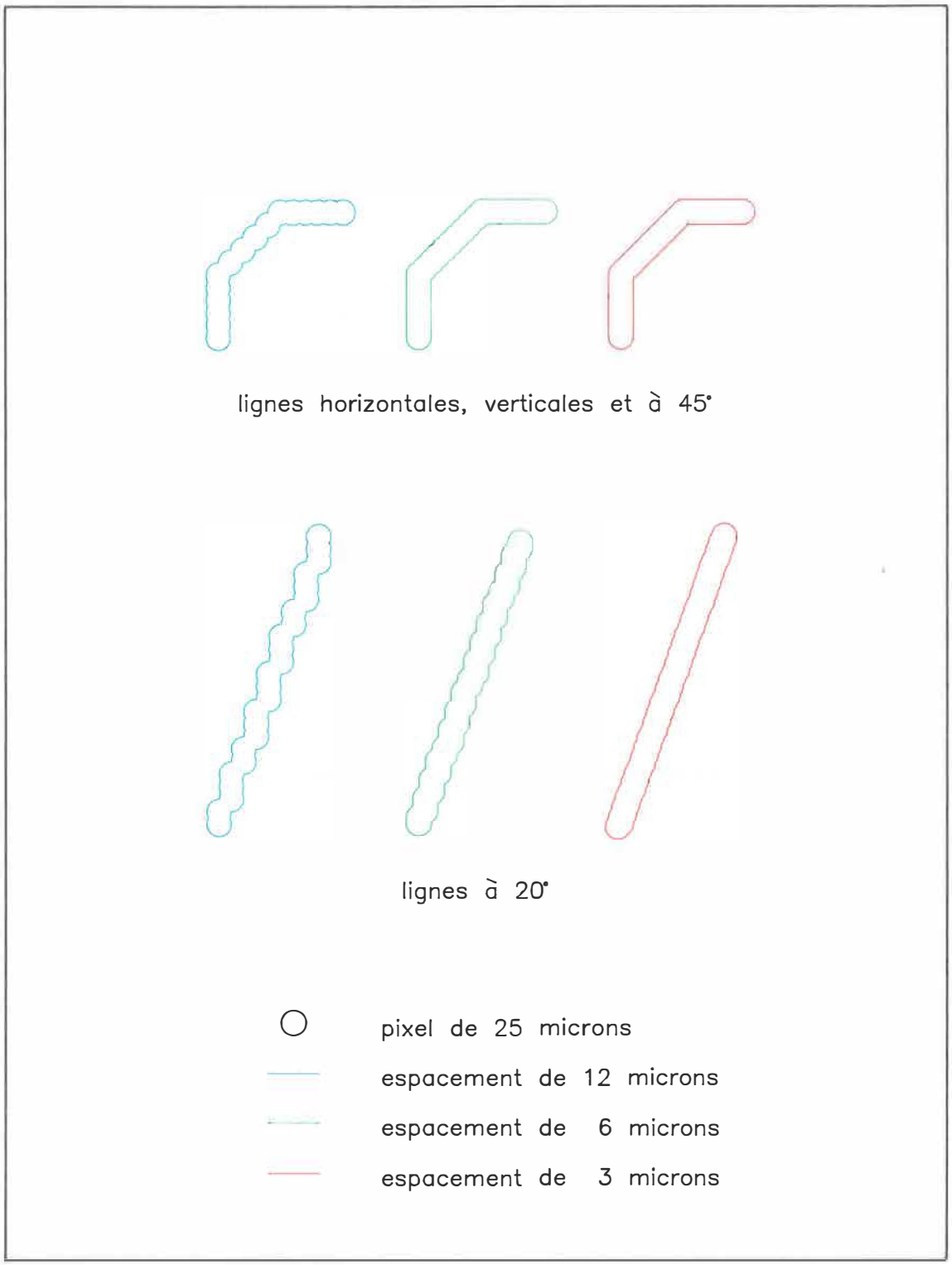


Figure 16. Effet de différents espacements de pixels sur la précision du bord des traces.

Une résine photosensible spécialement conçue pour ce type d'application doit être employée. Elle est sensible à la région bleu-vert (≈488 μm) pour concorder à l'émission spectrale du laser à l'argon, ce qui restreint son utilisation à un environnement inactinique rouge. Puisqu'une radiation dont la longueur d'onde est de 560 μm est suffisante pour exposer l'épargne, aucune radiation sous 600 μm ne devrait être permise dans la chambre inactinique. (Les épargnes conventionnelles sont habituellement utilisées en chambre inactinique jaune, une lumière beaucoup plus agréable pour travailler que le rouge.) Le traitement de ce type de résine se fait dans un système aqueux, autant pour le développement que pour le décapage de la résine. On peut l'utiliser dans des milieux acides comme épargne de placage ou de morsure.

Jusqu'à tout récemment, les résines photosensibles disponibles pour l'impression au laser avaient une sensibilité moyenne de 10 mj/cm^2. (A titre de comparaison, une résine photosensible conventionnelle insolée sous une lumière UV au mercure requiert 50 mj/cm^2 pour son insolation.) Ces résines étaient affligées de problèmes sévères. Il se formait parfois des bulles dans la résine, ce qui donnait des résultats inacceptables. La qualité de la résine n'était pas uniforme sur un même rouleau. De plus, une fois polymérisées, elles étaient plus difficiles à décaper que les résines conventionnelles.

Les deux principaux manufacturiers de films secs pour impression directe par laser, Dupont et Dynachem, ont développé une nouvelle génération de résines. Seulement 5 mj/cm^2 sont nécessaires pour son insolation. Les utilisateurs pourraient diminuer le temps d'exposition, mais généralement on préfère plutôt diminuer la puissance du laser à 1.2 W, tout en conservant le même temps d'exposition (22). En effet, en diminuant la puissance du laser, on prolonge de beaucoup la vie du tube. A pleine puissance elle n'est que de 2 000 heures. A 8 000 dollars américains pièce, on comprend l'avantage d'en augmenter la vie utile d'autant plus qu'une journée entière est requise pour son remplacement.

Les coûts et la disponibilité de ces nouvelles résines sont parmi les inconvénients majeurs qui freinent la prolifération de ces systèmes. On mentionne un coût de plusieurs fois supérieur à celui des résines photosensibles conventionnelles. Aussi, puisque ces systèmes sont très peu répandus, les manufacturiers ne fabriquent la résine qu'en petite quantité, ce qui rend sa disponibilité problématique. En effet, on ne peut garder la résine photosensible sur les tablettes pendant une longue période de temps avant de l'utiliser. Des problèmes de stabilité thermique font alors surface.

On pense qu'il est possible de fabriquer des résines encore plus sensibles, ce qui permettrait de diminuer le temps d'exposition. Mais avec de telles sensibilités, il faudra avant tout développer des

stabilisants thermiques pour éviter que la résine ne se polymérise à température ambiante.

Si on prend 30 secondes pour l'insolation d'un seul côté, 90 secondes sont nécessaires pour insoler toute une plaque en tenant compte du temps de manipulation pour la retourner et l'aligner. Ceci est nettement supérieur à un système conventionnel, lequel peut exposer simultanément les deux côtés en 15 à 20 secondes. Les systèmes à impression directe par laser n'ont donc pas encore leur place dans la production en grande série.

On retrouve donc ces systèmes dans deux sphères d'application précises: la fabrication de prototypes et les circuits à haute densité ayant des traces et des espaces de moins de 125 μm. Etant donné que l'on sauve toutes les étapes reliées à la photographie, l'impression directe par laser permet la réalisation éclair de prototypes. Leur flexibilité leur permet de modifier un schéma et de réaliser la carte en un temps record.

La production de circuits à haute densité de traces est aussi un utilisateur potentiel de cette technique. Avec un film sec de 37 μm d'épaisseur, il est possible de produire des traces de 75 μm régulièrement. Un film sec de 25 μm permet d'atteindre des traces de 50 μm. Et tout cela avec des rendements supérieurs à 85%. Les possibilités de concordance des couches sont excellentes, et qui dit

meilleure concordance dit plus de couches à pouvoir être stratifiées. La fabrication de circuits à impédance contrôlée semble aussi être une utilisation idéale pour les IDL, mais il faudrait aussi que les autres étapes de la fabrication, surtout au niveau de la morsure, puissent être contrôlées de façon beaucoup plus stricte.

Plusieurs problèmes jalonnent le parcours de qui s'intéresse à produire des circuits imprimés à haute densité de traces. Avec des largeurs de traces inférieures à 125 μm, la perfection de l'outillage photographique est primordiale. Un grain de poussière sur le film argentique peut provoquer une coupure de trace ou un court-circuit entre deux traces, dépendant de l'application. Une éraflure sur le film peut avoir des conséquences catastrophiques. Avec les systèmes d'impression directe par laser, plus de manipulation de l'outillage photographique et autant de problèmes évités. On soutient qu'avec des traces et des espaces de 150 μm on passe de 28% de rejets, dus en grande partie à un outillage photographique défectueux, à un rendement de 87% à 95% grâce à ces systèmes de technologie de pointe (23).

Somme toute, si l'on oublie pour un instant le prix faramineux de 500 000 dollars américains pour l'acquisition d'un tel système, son étude mérite notre attention. Très peu de données sur leur comportement en production sont toutefois disponibles. Automata (24), qui possède un tel système depuis avril 1986, y va de quelques commentaires. Tout d'abord, au début il y eut de nombreux problèmes

auxquels ils durent faire face, principalement à cause du manque de familiarité de la part des opérateurs face à un système aussi complexe. Ils sont encore affligés par certains problèmes tel le saut de données causant des traces discontinues ou des déplacements absolus de traces. La réserve est elle-même une source de maux de tête, quoique la nouvelle génération n'ait pas encore été expérimentée en environnement industriel. Finalement, cette compagnie suggère fortement l'embauche d'un ingénieur et d'un technicien versés dans la technologie des lasers.

Avantages du IDL

1) **Elimination totale de l'outillage photographique**. Les défauts causés par des éraflures, trous minuscules, poussières, ou par un changement de dimension du film argentique ou diazoïque, dû à des variations de température ou d'humidité, sont éliminés.

2) **Circuits à traces fines et ultrafines**. Une définition de 50 μm peut être atteinte régulièrement avec succès.

3) **Flexibilité**. Les données numériques peuvent être aisément manipulées en un laps de temps réduit et une nouvelle version du circuit peut être produite rapide-

ment. La réalisation de la carte est beaucoup plus rapide.

Désavantages du IDL

1) **Espacement des pixels**. Un espacement entre pixels trop grand peut causer des bords de trace crénelés.

2) **Traitement**. La conversion des données d'un format vectoriel à un format matriciel requiert un temps de traitement assez long.

Tableau V. Comparaison des étapes pour différents systèmes de report d'image.

	photo-traceuse 1 face	traceuse au laser 1 face	IDL 1 face
ruban magnétique			
transposition de format de vectoriel à matriciel		x	x
tracé sur film	x	x	
développement	x	x	
inspection, retouches	x	x	
répétition du tracé	x		
développement	x		
inspection, retouches	x		
contact diazoïque	x	x	
outillage photo	x	x	
entreposage, contrôle	x	x	
concordance	x	x	
insolation	x	x	x
développement de la résine	x	x	x

3) **Environnement inactinique rouge**. Quoique des tubes fluorescents d'une luminosité de 700 LUX puissent être employés, la lumière rouge impose des restrictions sévères sur l'inspection des plaques par l'opérateur.

4) **Coûts**. La résine photosensible coûte beaucoup plus cher qu'une résine conventionnelle et il en demeurera ainsi. Un système complet d'impression directe par laser vaut approximativement un demi million de dollars américains.

5) Comme avec toute nouvelle technologie, une multitude de questions sont toujours sans réponse.

BIBLIOGRAPHIE

(22) Smith-Vargo, Linda; "Laser Direct Imaging: Facing Reality", Electronic Packaging & Production, v. 28, no. 4, April 1988, pp. 28-33.

(23) Esposito, Donna J.; "Laser Tag", Printed Circuit Fabrication, v. 10, no. 5, May 1987, pp. 12-20.

(24) Feltham, Steve; "One Fabricator's Experience with Printed Circuit Board Direct Imaging", Electronic Manufacturing, v. 34, no. 8, August 1988, pp. 16-19.

ANNEXE D

Traitement des eaux usées

Pour demeurer en harmonie avec la nature, l'homme se doit de réparer ou à tout le moins de minimiser les torts qu'il peut causer à celle-ci. Pour y arriver, les gouvernements autant fédéral que provinciaux et municipaux ont établi des lois visant à restreindre les dommages que peuvent causer certaines activités de l'homme. L'industrie des circuits imprimés fait partie de la classe des industries de traitements de surface et par conséquent est régie par ces lois. La source majeure de pollution se retrouve sous forme de déversement de métaux lourds, notamment le cuivre, l'étain et le plomb.

Les eaux de vidange sont produites à diverses étapes de la fabrication des circuits imprimés:

1. **la préparation des surfaces**: les rinçages suivant le ponçage, l'ébarbage, les nettoyages alcalins ou acides, le déglaçage et la morsure en retrait, le dépôt d'un catalyseur et l'activation, le traitement de conversion de surface du cuivre des couches internes,
2. **le cuivrage chimique**: les rinçages suivant le dépôt de cuivre chimique,
3. **la galvanoplastie**: les rinçages suivant les dépôts électrolytiques de cuivre et d'étamage, de même que les trempages précédents dans les bains d'acides,

4. **la morsure**: les rinçages suivant la morsure et le brillanteur d'étamage,
5. **la photorésine**: les rinçages suivant le développement et le décapage de la résine photosensible,
6. **les contacts d'extrémité**: les rinçages entrant dans les étapes de traitement des contacts d'extrémité de carte.

A cela il faut rajouter l'eau utilisée pour laver les équipements, nettoyer les débordements, purifier l'air de la ventilation et le déversement des solutions épuisées. Les principaux polluants recensés dans les eaux usées sont du cuivre, de l'étain, du plomb, des fluorures, du phosphore et des métaux chélatés.

Idéalement, il y aurait lieu de pratiquer la ségrégation des eaux de vidange en les isolant les unes des autres. De cette façon, il est beaucoup plus simple de traiter et de neutraliser chacun des polluants. Le traitement d'effluents ne contenant qu'un seul contaminant est beaucoup moins complexe que lorsque plusieurs polluants sont mélangés dans des proportions inconnues. Malheureusement, une telle solution n'est guère pratique pour différentes raisons. La méthode communément employée consiste à ne pratiquer qu'une seule ségrégation, soit la séparation des rinçures contenant des chélates des autres effluents.

Comme nous le verrons plus loin, les chélates ont la singularité de pouvoir se maintenir en solution à une valeur élevée de pH. Quoique cette propriété ait ses avantages lors d'un dépôt autocatalytique, elle complique habituellement la précipitation du métal hors des effluents.

D.1 Traitement des eaux usées

Pour les entreprises de petite ou moyenne envergure, le traitement en temps réservé est souvent employé. Il consiste à recueillir les effluents dans une cuve de récupération. Une fois la cuve remplie, elle est traitée alors que les effluents sont détournés dans une seconde cuve de récupération. Cette façon de procéder est efficace pour des volumes relativement petits de déversements.

L'alternative est le traitement en continu et s'applique surtout aux grands volumes. Les équipements requis sont beaucoup plus sophistiqués et dispendieux. L'opération est aussi plus compliquée et plus sensible aux changements des différentes variables. Il arrive fréquemment que l'on traite les effluents contenant des chélates par un traitement en temps réservé et le reste des eaux par traitement continu.

Avant le déversement des eaux de vidange dans les égouts municipaux, il faut les neutraliser pour ramener le pH à l'intérieur des

Tableau VI. Rejets dans un réseau d'égout unitaire ou domestique.

CUM - REGLEMENT 87
CONCENTRATIONS MAXIMALES (mg/L)

Paramètre	Limite maximale
Température (°C)	65
pH	6,0 - 10,5
DBO_5	-
Chlore total Cl_2	-
Chlorures totaux Cl	-
Fluorures totaux F	-
Sulfates totaux SO_4	-
Sulfures totaux S	5
Cuivre total Cu	5
Chrome total Cr	5
Etain total Sn	5
Nickel total Ni	5
Plomb total Pb	2
Phosphore total P	-
Composés phénoliques totaux	1
Concentration totale en métal	15
Masse totale de métal (kg/jour)	
< 180 m^3/jour	4
180 à 720 m^3/jour	6
> 720 m^3/jour	12

limites permises. Le Tableau VI donne les limites permises sur le territoire de la Communauté Urbaine de Montréal quant à la teneur en polluants et au pH des déversements dans les égouts municipaux.

D.1.1 Neutralisation

Tout au long de la fabrication des circuits imprimés, des solutions fortement acides et basiques sont employées. Les solutions à haut pH sont neutralisées par l'addition d'une solution opposée, soit un acide, tel l'acide sulfurique (H_2SO_4) ou l'acide chlorhydrique

(HCl). Dans certains cas, l'emploi de gaz pour diminuer le pH est plus économique.

Les solutions fortement acides sont neutralisées par l'addition d'oxyde de calcium ou chaux (CaO), d'oxide de magnésium (MgO), d'hydroxyde de calcium ou chaux hydratée ($Ca(OH)_2$), d'hydroxyde de magnésium ($Mg(OH)_2$), d'hydroxyde de sodium ou soude caustique (NaOH) ou encore du carbonate de sodium commercial (Na_2CO_3).

Il arrive souvent que des effluents acides et basiques soient produits à des étapes différentes du procédé de fabrication. Dans ce cas, il est souvent avantageux de les récupérer séparément puis de les mélanger en temps opportun pour les neutraliser. Il faut tout de même avoir sous la main une quantité suffisante d'acides ou de bases pour neutraliser tout excès de l'une ou l'autre de ces sources.

D.1.2 Précipitation des métaux ordinaires

La précipitation des métaux se fait dans la majorité des cas à partir de composés à base d'hydroxydes ou de sulfures. La première étape consiste à déterminer la valeur optimale de pH qui nous permettra d'obtenir le point de solubilité minimale du métal. La Figure 17 illustre ce concept pour les composés d'hydroxydes et de sulfures (25).

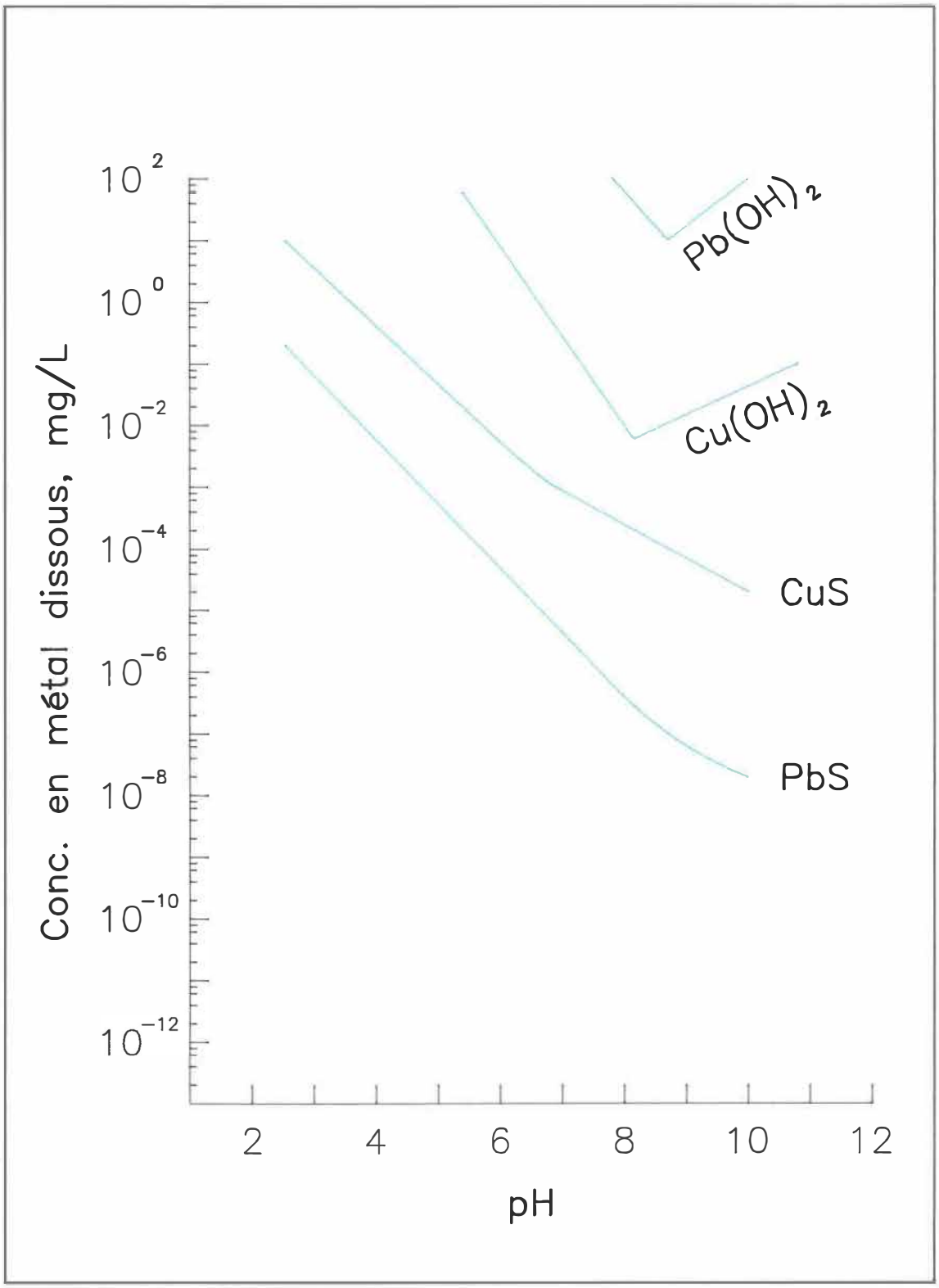


Figure 17. Solubilité des hydroxydes et des sulfures métalliques vs pH.

Lorsque plus d'un métal est présent dans les eaux de vidange il faut procéder à la précipitation par étapes successives. D'abord, le pH est ajusté à la valeur optimale de l'un des métaux. On alloue assez de temps pour que le métal précipite. Un floculant est rajouté au mélange afin de favoriser la précipitation. Le floculant, un polymère d'origine organique, provoque l'agglomération des particules entre elles. La gravité poursuit l'oeuvre en concentrant le floculat, dont la densité est généralement plus grande que l'eau, au fond de la cuve. Le liquide est décanté puis transvasé dans un autre contenant où le métal suivant recevra le traitement approprié à son tour.

La précipitation à l'aide d'hydroxydes produit de grandes quantités de boues contenant des produits hautement toxiques que l'on doit récupérer et se débarrasser de façon appropriée. Afin de réduire leur volume, les boues sont envoyées à un filtre-presse qui enlèvera une grande quantité d'eau. Cette eau est retournée à la cuve de traitement et le gâteau est placé dans un baril. Lorsqu'une certaine quantité de barils a été accumulée, ils sont acheminés vers un centre d'enfouissement approuvé. On peut réduire davantage la quantité d'hydroxydes métalliques en utilisant des techniques de filtration.

Lorsque tous les métaux ont été retirés des effluents, l'eau est décantée et neutralisée à une valeur de pH adéquate puis est déversée dans les égouts municipaux. Les hydroxydes offrent une façon rela-

tivement économique et simple de traiter les effluents avant leur déversement dans les égouts. Par contre, ils sont peu efficaces à provoquer la précipitation des chélates.

D.1.3 Précipitation des métaux chélatés

Du point de vue du traitement des eaux usées, les métaux chélatés ont la fâcheuse habitude de se maintenir en solution à des valeurs élevées de pH. Ces métaux ont formés des liens complexes avec des produits tels l'EDTA, l'ammoniac, le quadrol et autres agents complexants. Ces agents se retrouvent dans les solutions de dépôts chimiques par immersion et dans certains mordants. Puisque les métaux chélatés sont difficilement éliminables par l'emploi d'hydroxydes, il faut séparer les effluents qui en contiennent pour les traiter différemment. Diverses méthodes peuvent être employées dans le cas des chélates, les plus connues étant la précipitation à haut pH, la réduction chimique, l'emploi de sulfures et quelques autres.

D.1.3.1 Précipitation à haut pH

Ce procédé consiste à amener le pH des eaux de vidange à une valeur d'environ 12 par l'addition de chaux à haut pH. Il fonctionne particulièrement bien avec des solution de dépôt de cuivre chimique contenant de l'EDTA. Le calcium formant un lien plus solide avec l'EDTA que le cuivre, un déséquilibre chimique se produit dans le

chélate, brisant le lien complexe et donnant naissance à la formation d'ions métalliques libres. Le cuivre précipite ensuite sous forme d'hydroxyde de cuivre. Après la sédimentation, on décante le liquide, ajuste la valeur du pH et rejette les eaux usées dans les égouts. Ce procédé est peu coûteux.

D.1.3.2 Réduction chimique

La réduction chimique abaisse la valeur du pH à un niveau variant de 2,0 à 6,0 selon l'agent réducteur utilisé. Le faible pH diminue la force du lien complexe et le brise. Parmi les agents réducteurs employés on retrouve le dioxyde de soufre (SO_2), le bisulfite de sodium ($NaHSO_3$), le métabisulfite de sodium ($Na_2S_2O_5$) et le sulfate ferreux ($FeSO_4$). Le sulfate ferreux a l'avantage de fonctionner efficacement avec un plus large éventail de chélates. Avec le cuivre, il transforme l'ion cuivreux en ion cuivrique et l'empêche de reformer un chélate. Une fois le lien brisé, les étapes usuelles de précipitation par hydroxydes sont employées.

D.1.3.3 Les sulfures

Tel que la Figure 17 l'indiquait, la solubilité des composés métalliques d'hydroxydes et de sulfures varie en fonction du pH. L'examen de cette figure nous apprend que les sulfures permettent d'atteindre des niveaux de solubilité plus bas que les hydroxydes.

Les sulfures le plus couramment employés sont le sulfure d'aluminium et le sulfure de sodium (Na_2S). Ces produits permettent de précipiter une plus grande quantité de métal hors des effluents. Ils peuvent aussi être directement utilisés pour traiter les chélates.

Malheureusement, l'emploi de sulfures occasionne certains problèmes. Le premier en est un de sécurité. S'il advenait que le pH diminue sous la valeur critique de 8, du sulfure d'hydrogène, un gaz très dangereux, se dégagerait. A faible concentration, quelques ppm, ce gaz a une forte odeur d'oeufs pourris. A concentration un peu plus élevée il neutralise l'odorat de telle sorte qu'on ne détecte plus sa présence. A concentration encore plus élevée, il provoque la paralysie du système cardio-pulmonaire et la mort s'ensuit presque immédiatement.

En outre, les composés de sulfure sont plus coûteux que les composés d'hydroxyde. La disposition de boues contenant des sulfures métalliques est une autre source de problèmes. Etant formés de particules très fines, il est plus difficile de précipiter et de filtrer ces composés. De plus, lorsqu'exposé à l'air, le sulfure de cuivre s'oxyde en sulfate et les ions de cuivre retournent en solution.

La Figure 18 résume un système typique de traitement des eaux usées.

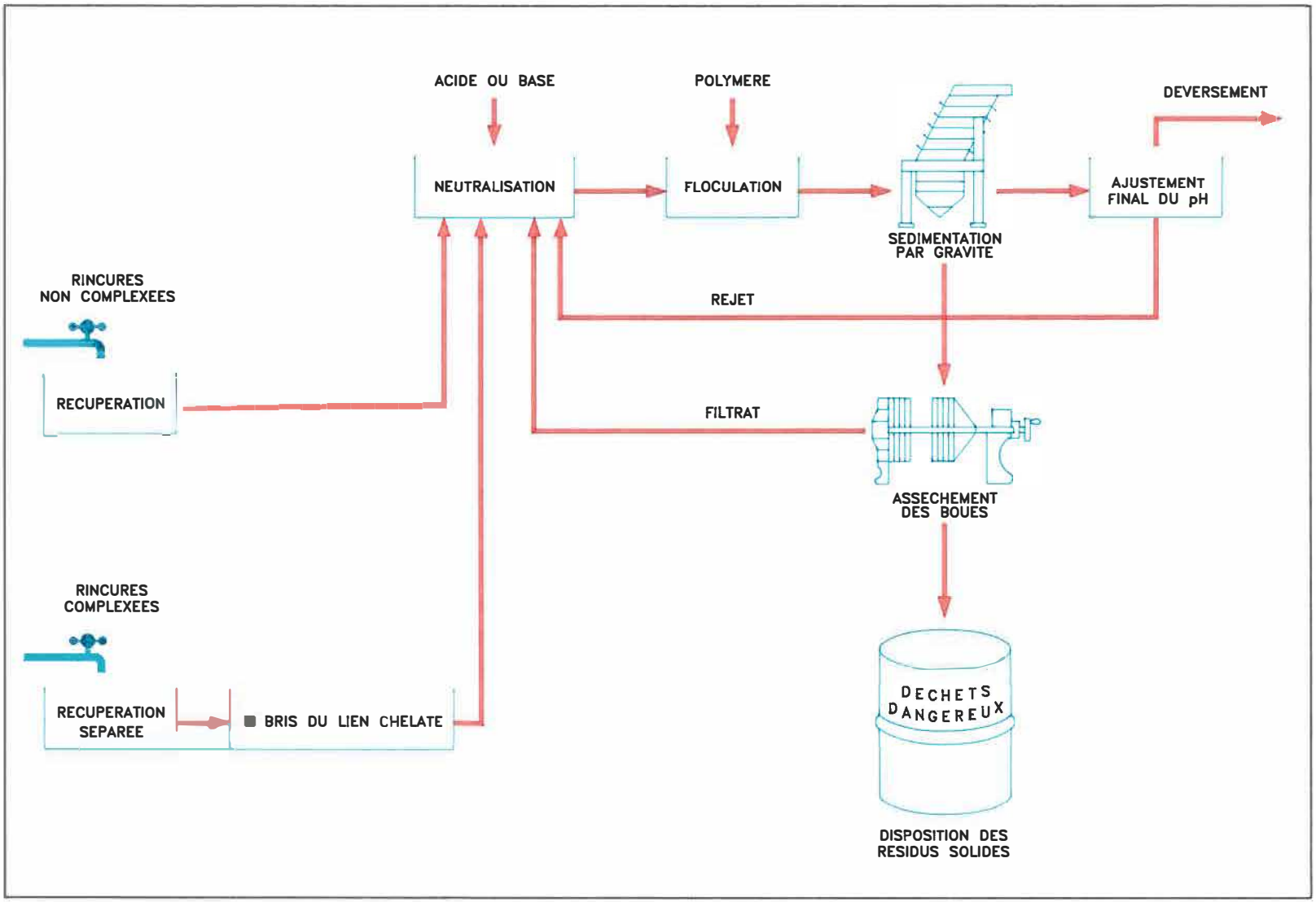


Figure 18. Diagramme synoptique d'un système typique de traitement des eaux usées.

D.1.3.4 Autres méthodes

On retrouve d'autres produits permettant d'éliminer les métaux complexés tel que décrit dans Whalen (26). Le xanthate d'amidon insoluble élimine les ions métalliques lourds en les échangeant avec du magnésium ou du sodium. En autant que le pH est maintenu à l'intérieur de 3-13, il peut permettre d'atteindre des concentrations aussi faibles que 0,1 mg/L dans les effluents. Son utilité se restreint au traitement en temps réservé avec des concentrations inférieures à 100 ppm. Sa disponibilité pose certains problèmes d'approvisionnement. Les dithiocarbamates (diéthyl et diméthyl) sont très efficaces à réduire la concentration des métaux lourds (à moins de 0,2 mg/L) aussi bien dans des effluents chélatés que non chélatés. Leur coût plus élevé limite leur utilisation. L'hydrazine et l'hydrosulfite de sodium sont des agents fortement réducteurs qui peuvent aussi oxyder plusieurs composés organiques en plus des métaux lourds présents dans la solution. Ils sont très dispendieux.

D.1.4 Les résines échangeuses d'ions

Les résines échangeuses d'ions sont des solides composés principalement de deux éléments, l'un fixe et l'autre mobile. Le groupe fixe est ionisé et porteur d'une charge positive ou négative. L'ion mobile a une charge contraire au groupe fixe et peut être échangé avec un ion provenant d'une solution. L'échange des ions est accé-

léré par une accroissement de la surface efficace. C'est pourquoi ces résines se retrouvent surtout sous forme de grains très fins.

Initialement, les résines échangeuses d'ions étaient, et le sont encore dans une large proportion, utilisées presque exclusivement pour l'adoucissement de l'eau. Mais il est maintenant possible de les utiliser efficacement pour le traitement des eaux usées. Le principe global de fonctionnement (Figure 19) est assez simple, quoiqu'une étude plus approfondie devient rapidement plus compliquée.

La solution à traiter est versée sur la résine par l'extrémité supérieure d'une colonne remplie de résine échangeuse d'ions. Lors du passage de la solution au travers des grains, les ions de la solution (e.g. Cu^{++}, Pb^{++}, Sn^{++}) vont s'échanger avec les ions mobiles de la résine. Les ions mobiles de la résine et les ions de la solution doivent avoir une charge de même signe. L'affinité supérieure des ions de la solution pour le groupe fixe comparativement à ceux de la résine explique ce transfert. Plus grande est l'affinité de l'ion de la solution, plus l'échange s'effectue rapidement. Le processus se poursuit jusqu'à ce qu'il y ait équilibre entre la résine et la solution. Le liquide récupéré au bas de la colonne est libre de métaux lourds et ne requiert qu'un ajustement de pH.

Lorsque la résine est saturée d'ions métalliques, une solution concentrée, souvent un acide, est déversée dans la colonne pour

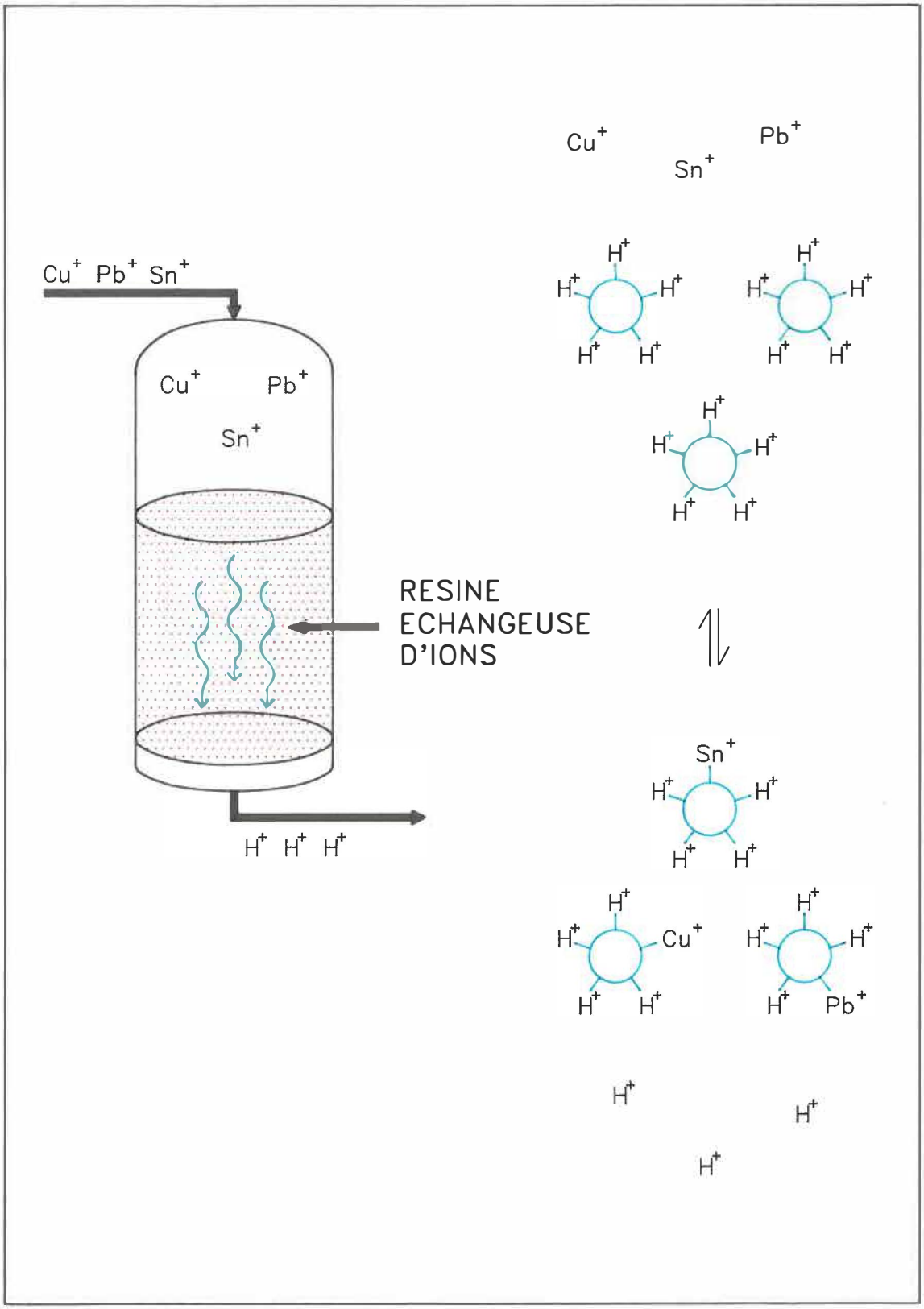


Figure 19. Résine échangeuse d'ions.

regénérer la résine. Le phénomène inverse se produit où l'ion de la solution reprend sa place dans la résine et l'ion qui s'était rattaché à la résine se lie à la solution. Le produit final est une solution fortement concentrée en ions métalliques dont il est plus facile de se débarrasser.

Ces systèmes fort coûteux sont difficilement utilisables lorsque les effluents à traiter contiennent des métaux complexés. Dans ce cas, la résine doit elle même contenir des groupes fixes complexés.

D.1.5 L'osmose inverse

On dénombre un certain nombre de systèmes de séparation par membrane. L'osmose inverse est parmi les plus connus. Le système, dont l'emploi pour le traitement des eaux usées est aussi relativement récent, est basé sur le principe de filtration. Le liquide à purifier passe au travers d'une membrane semi-perméable. La dimension des pores est l'un des facteurs prédominants différenciant l'osmose inverse d'un système usuel de filtration.

Avec l'osmose inverse, les pores sont si fins qu'il faut exercer une pression sur le liquide pour le forcer à passer au travers de la membrane. La membrane agit comme une barrière séparant le liquide des solides dissous (tant inorganiques qu'organiques). Il est possible d'obtenir des filtrats très purs avec cette méthode. Les pores

étant assez fins, les sels métalliques sont éliminés des eaux de vidange. Le concentré, le liquide n'ayant pas passé au travers de la membrane, est par la suite traité selon des méthodes conventionnelles de neutralisation et de précipitation.

Cartwright (27) cite une application intéressante pour un procédé de galvanoplastie où les rinçures d'un système de rinçage en cascade suivant le bain de placage sont envoyées à l'unité d'osmose inverse. Le filtrat est retourné à la deuxième cuve de rinçage et le concentré à la cuve de placage. La consommation d'eau est ainsi réduite. Ce système est particulièrement efficace si la température du bain de placage est élevée car les besoins de remplacer le liquide évaporé sont plus grands.

L'un des problèmes fréquemment soulevés concerne la pression exercée sur la membrane. Elle est telle que la membrane ne peut résister à de longues périodes d'utilisation.

D.2 Analyse du procédé

Dans le but de diminuer les coûts de traitements et de faciliter les opérations, la plupart des installations nécessitent une ségrégation des effluents. L'utilisation de solvants devrait être proscrite à moins de ne pouvoir faire autrement. Les solvants font l'objet

d'une attention particulière. Leur traitement et leur élimination sont totalement indépendantes des autres effluents.

Les rinçures sont envoyées à une cuve de collection commune pour un type d'effluent. Les bains concentrés sont traités séparément selon les instructions spécifiques du fournisseur. Après leur neutralisation, ils sont déversés avec les autres effluents.

Un examen rapide du procédé de fabrication révèle que la majorité des bains sont de nature acide. Le traitement des eaux usées s'en trouve simplifié. La Figure 20 illustre toutes les étapes requises pour fabriquer une carte multicouche de même que le type de contamination d'eau qui y est associé à chacune des étapes. Nous débuterons par l'analyse des étapes pour une carte double face puis nous y rajouterons les étapes supplémentaires pour la construction de cartes multicouches.

La première étape où l'on rencontre l'emploi d'eau est pendant l'ébarbage. Heureusement, cette eau n'a pas été altérée chimiquement. Un simple filtrage des particules en suspension est suffisant. Quatre systèmes de filtration sont disponibles: centrifuge, papier filtre, sable et gravité.

Après le perçage, les flans vont à la ligne de dépôt chimique de cuivre. Le nettoyeur/conditionneur est une solution de nature

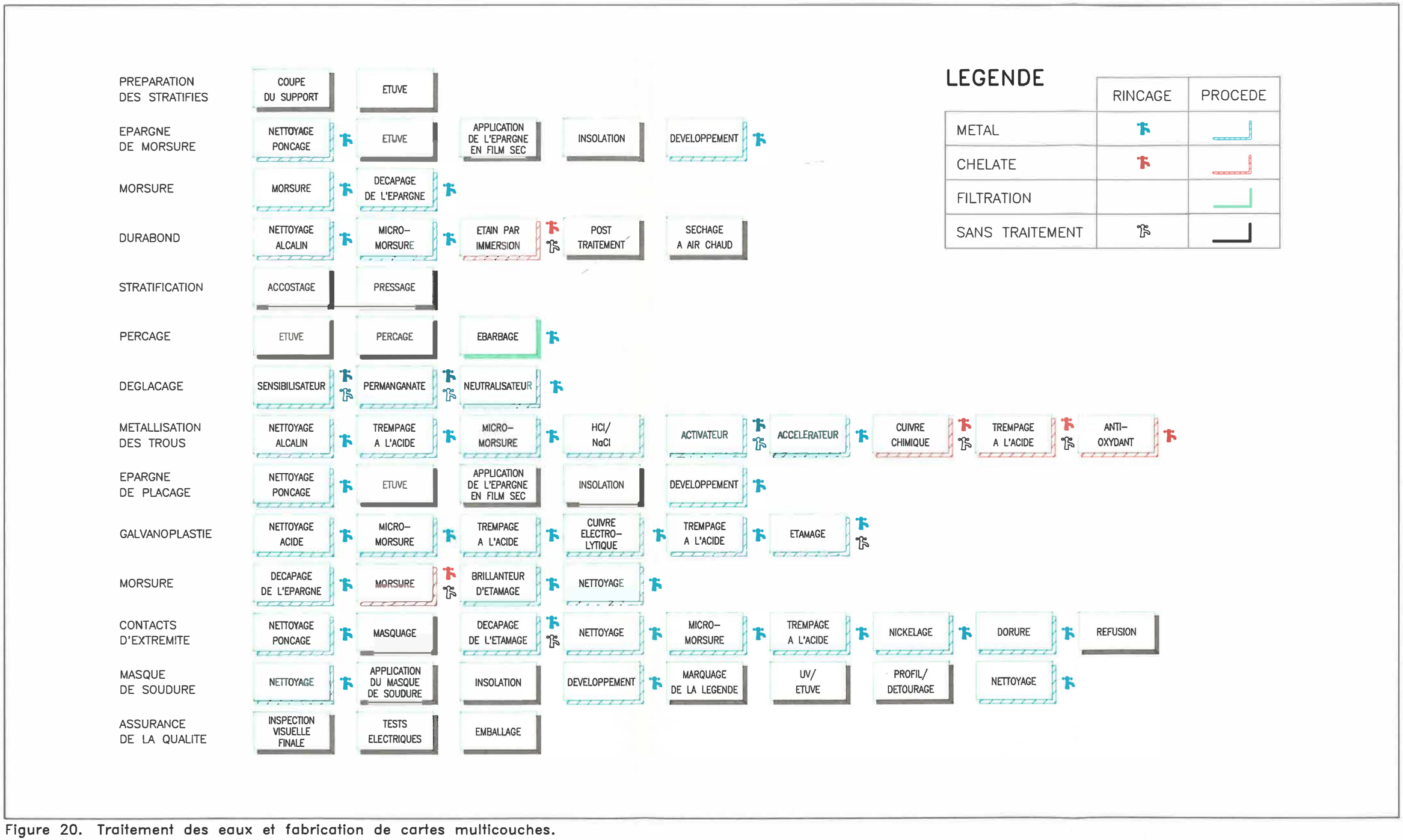


Figure 20. Traitement des eaux et fabrication de cartes multicouches.

alcaline. Un mélange de surfactants, de détergents et d'agents chélateurs la compose. Ce bain contient une faible quantité de cuivre et est fréquemment déversé. Quoique le bain concentré contiennent des agents chélateurs, leur action est suffisamment faible pour que les rinçures puissent être dirigées avec les effluents non chélatés.

Le but de la micromorsure est de donner à la surface plus de ruguosité et de laisser une couche de cuivre très active pour accroître l'adhérence du dépôt de cuivre chimique. Différents procédés sont disponibles. Les mordants ammoniacaux sont à éviter à cause de leurs propriétés complexantes. Les mélanges d'acide sulfurique et de peroxyde d'hydrogène bénificient de l'approbation d'un nombre croissant d'utilisateurs. Leurs résultats sont très satisfaisants et le traitement des eaux usées simplifié. Le refroidissement de la solution au cours de la nuit précipite le cuivre en crystaux.

Un bain d'acide sulfurique neutralise l'alcalinité du bain précédent. Ce bain suit le nettoyeur/conditionneur si le mordant est acide et suit le mordant si celui-ci est fait d'ammoniac.

La phase d'activation débute par l'immersion des flans dans une solution concentrée en chlore, généralement de l'acide chlorhydrique. Son but est d'éviter la contamination du bain de palladium-étain par un transport d'eau sur le flan. Les bains acides servant à neutraliser la surface du flan sont régulièrement déversés et remplacés par

un bain frais. Précipitation et neutralisation sont nécessaires car ces solutions ont tout de même une faible teneur en cuivre.

L'activateur contient du palladium, de l'étain et du chlore dans un milieu acide. Il est très rare que cette solution ait à être remplacée. L'accélérateur améliore l'activité du catalyseur en enlevant les sels d'étain enrobant les noyaux de palladium. Etain, cuivre et palladium s'accumulent dans cette solution et on doit fréquemment la remplacer.

Le bain de dépôt chimique est le coeur de cette ligne. Il contient des agents complexants tels l'EDTA, des sels de Rochelle ou du quadrol qui gardent le cuivre en solution à haut pH; un agent réducteur sous forme de formaldéhyde; de l'hydroxyde de sodium pour le contrôle du pH; une source d'ions de cuivre par l'introduction de sulfate de cuivre; et divers additifs tensio-actifs et stabilisateurs. La nature de ce bain dicte un traitement en fonction de la présence de chélates dans le bain concentré et les rinçages suivants.

L'impression génère peu de contamination métallique des eaux. Les révélateurs aqueux et semi-aqueux sont simples à traiter. Un simple ajustement du pH est suffisant. Si des solvants sont utilisés pour le développement, c'est une toute autre histoire. Ils doivent être traités séparément par distillation. La résine photosensible est un déchet organique et ne requiert pas de traitement spécial

selon les normes actuellement en vigueur. Si le taux de DBO_5 est controlé, l'acidification de la solution est suffisante pour faire précipiter 80% des résidus. Les révélateurs et décapeurs de réserve devraient être préférablement mélangés ensemble avant de les traiter.

Après l'impression du flan, le placage sélectif dépose une couche de cuivre sur les traces du circuit. Le nettoyeur acide enlève les oxydes et les résidus de film sec. La micromorsure et l'acide sulfurique suivent le même principe que ceux de la ligne de métallisation des trous. La galvanoplastie du cuivre se fait dans une solution de sulfate de cuivre. Précipitation et neutralisation avec de l'hydroxyde de sodium sont suffisants.

Une couche d'étain-plomb est fréquemment employée comme épargne de morsure. Ce mélange, dans des proportions de 60/40 a de bonnes caractéristiques pour la soudabilité. Le flan est d'abord trempé dans une solution acide compatible avec le bain de placage. Un bain d'étain-plomb typique contient du fluoborate de plomb, du fluoborate d'étain, de l'acide fluoborique et de l'acide borique. Après la précipitation des métaux en suspension, les effluents sont neutralisés avant leur déversement dans les égouts.

Suivant le placage sélectif, la réserve de placage est enlevée et les flans sont soumis à l'attaque d'un mordant. Le décapage de la réserve organique produit des eaux usées similaires à celles du déve-

loppement. Dans le cas des solutions aqueuses, révélateur et décapeur sont mélangés ensemble avant de subir leur traitement. Un problème pouvant parfois surgir est la présence d'amines dans certaines solutions de décapage. Les amines sont des agents complexants.

Le type de mordant détermine la façon de traiter les effluents suivants. Les solutions concentrées sont habituellement retournées au manufacturier. Les mordants contenant de l'ammoniac complexent le cuivre. Les eaux de rinçage suivant doivent être séparées. Le chlorure cuivrique est une solution acide et il peut être regénéré avec une partie des eaux de rinçage lui succédant, réduisant la quantité des effluents à traiter. Le chlorure ferrique est aussi acide, mais ne peut être regénéré de cette façon. Ces deux derniers mordants sont utilisés exclusivement lorsque la réserve est organique. Les mélanges d'acide sulfurique et de peroxyde d'hydrogène sont les plus faciles à neutraliser. Un simple refroidissement de la solution pendant la nuit fera précipiter des crystaux de pentahydrate de cuivre et la solution peut être réutilisée.

Lorsque des contacts d'extrémité de carte sont exigés, la couche d'étain-plomb les recouvrant doit être enlevée. Elle est remplacée par une couche de nickel sous une couche d'or. Bien que ces deux bains ne soient jamais déversés à cause de leur valeur, les bains de trempage acide et les rinçages suivants le sont. Ils ont une faible teneur en métal.

Dans certaines occasions spéciales, la totalité de la couche d'étain-plomb recouvrant les flans sera décapée et un masque de soudure sera appliqué directement sur le cuivre nu. Ces solutions de décapage contiennent des oxydants acides, des fluoborates et du peroxyde d'hydrogène. Leur teneur en étain et en plomb augmente rapidement et devient une source majeure de pollution. On sait que le plomb affecte le développement du cerveau chez les jeunes enfants en pleine croissance. La précipitation du plomb est une source de problèmes. Des firmes spécialisées peuvent s'occuper des solutions contaminées par le plomb. Les masques de soudure organiques requièrent la même attention que les réserves organiques de placage et de morsure.

La fabrication de cartes multicouches génère une utilisation supérieure d'eau et plus de pollution. La friction des forets sur les parois du trou lors du perçage liquéfie la résine qui coule le long du canon et laisse un mince film de matière isolante. Une opération de déglaçage s'avère nécessaire pour éliminer cette pellicule. Il existe quatre méthodes pour retirer ce résidu embarrassant. L'acide sulfurique est facile à utiliser mais ne donne que des résultats satisfaisants. L'acide chromique donne de très bons résultats mais le traitement de la solution concentrée et de ses effluents pose des problèmes tels que peu l'utilisent. La venue récente du permanganate de potassium a chambranlé quelque peu ce marché. Il laisse le

trou dans des conditions excellentes et il n'existe pas encore de réglementation spécifique à son sujet. Le déglaçage au plasma est un procédé sec dont les résidus sont des cendres de résine, de l'eau évaporée et du bioxyde de carbone. Les émanations de ces résidus dans l'air ne sont encore soumis à aucune réglementation.

Les cartes multicouches sont une superposition de cartes double côté et de feuilles préimprégnées de résine à l'état B. Ces feuilles de résine à l'état B procurent une isolation électrique entre les couches adjacentes de cuivre et assurent l'adhérence des couches internes entre elles. Pour augmenter cette adhérence, les couches sont traitées dans une solution alcaline oxydante. Typiquement, ces solutions sont à base de chlorure de sodium pour former l'oxydant et d'hydroxyde de sodium et de triphosphate de sodium comme stabilisateurs. Un surfactant est aussi inclu à l'occasion.

Le procédé DuraBOND™ n'utilise pas d'agents complexants lors des phases de nettoyage et de micromorsure. Par contre, le dépôt galvanique d'étain utilise de la thio-urée pour favoriser la réaction chimique et provoquer le dépôt d'étain. La présence de cuivre complexé avec la thio-urée force le traitement du rinçage subséquent à être effectué avec les effluents chélatés. La solution concentrée est neutralisée selon les instructions du fournisseur.

D.3 Réduction du volume des effluents

La quantité d'eau nécessaire pour rincer adéquatement un flan dépend du volume des égouttures transportées d'un bain à l'autre par le flan et de l'efficacité du système de rinçage. Le design des égouttoirs est le premier facteur où il faut porter notre attention. Le recouvrement des égouttoirs peut influencer fortement l'égouttage. Un temps d'égouttage plus long et un retrait plus lent des flans diminuent les égouttures. Des jets d'air peuvent aussi être employés, mais les sels sont parfois plus difficiles à éliminer de la surface du flan une fois séchés.

L'utilisation de solutions moins concentrées réduit aussi les quantités d'eau requises. Les systèmes de rinçage double en cascade ou par débordement sont simples et efficaces. Ils réduisent la consommation d'eau de façon appréciable. Les flans sont d'abord introduits dans le bassin par où l'eau est évacuée. C'est le bain de rinçage où la contamination est la plus concentrée. Le bain suivant est celui où l'eau fraîche est introduite. Son degré de contamination est moindre.

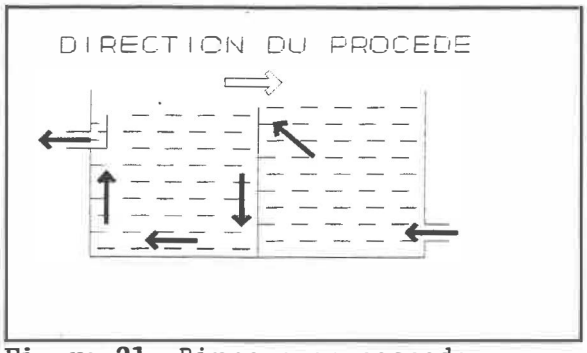


Figure 21. Rinçage en cascade.

Pour réaliser l'importance d'un rinçage en cascade multiple, considérons les symboles suivants dans l'équation de rinçage (28):

C_0 = la concentration des sels dans la cuve du procédé, mg/L,

Θ = volume de la solution du procédé adhérant au flan après son retrait de la cuve, L

D = le débit de l'eau entrant et sortant de la cuve de rinçage, L/min

t = durée d'un cycle de rinçage, min

C = concentration maximale admissible pour la pellicule de solution adhérant au flan suivant une opération de rinçage, mg/L.

Nous obtenons l'équation:

$$C = C_0 \, (\Theta/(tD + \Theta))$$

$$\approx \quad C = C_0 \, (\Theta/tD) \qquad \text{puisque } tD >> \Theta$$

Si nous avons 2 cuves de rinçage,

$$C_2 = C_1 \, (\Theta/tD) = C_0 \, (\Theta/tD) \, (\Theta/tD)$$

$$C_2 = C_0 \, (\Theta/tD)^2$$

De façon générale, nous obtenons:

$$C_n = C_0 \, (\Theta/tD)^n$$

Appliquons maintenant cette équation. Soit une solution d'acide chromique (CrO_3) dont la concentration est de 375 g/L. La concentration finale à la sortie du dernier bac de rinçage devrait être inférieure à 0,007 g/L. Les égouttures sont de 4 ml et un flan est trai-

té à toutes les deux minutes. Quel débit d'eau est nécessaire pour satisfaire ces exigences?

$$D = (\Theta/t)(C_0/C)^{1/n}$$

$$D = (0004/2)(375/0,007)^{1/n}$$

$$D = 107 \text{ L/min}$$

avec 2 bacs, D = 0,46 L/min, soit 230 fois moins qu'avec 1 bac,

3 bacs, D = 0,076 L/min, soit 6 fois moins qu'avec 2 bacs.

Est-il nécessaire de continuer pour démontrer l'efficacité de ce type de rinçage? Quoique l'équation de rinçage soit simple à appliquer, la difficulté réside dans la détermination de la concentration maximale admissible d'un contaminant.

Lorsque c'est possible, l'eau d'un rinçage peut être cascadée dans un rinçage précédent. Par exemple, l'eau servant au rinçage suivant le trempage à l'acide sur la ligne de galvanoplastie pourrait être envoyée dans le bain de rinçage immédiatement avant ce bain d'acide. La consommation d'eau est substantiellement réduite sans qu'il n'y ait d'effets néfastes sur les flans.

Le rinçage par vaporisation est une autre technique ayant fait ses preuves. L'eau s'égouttant des flans est de plus en plus "propre". Ce type de rinçage prend moins d'espace qu'un rinçage en cascade et est tout aussi efficace. Les rinçages statiques sont

utilisés après un bain de solution concentrée. Les pertes de solution concentrée causées par l'évaporation sont remplacées par l'eau de ce bain. Ils sont donc principalement employés après les bains très chauds. Un autre bain de rinçage avec eau courante est tout de même encore essentiel.

Seule la quantité d'eau minimale nécessaire pour bien rincer le flan devrait être employée. Diverses techniques permettent d'y arriver. Les valves régulatrices de débit n'autorisent l'entrée d'eau que lorsque un flan est dans le bain de rinçage. Les appareils mesurant la conductivité de l'eau sont les plus précis. Ils n'autorisent l'ouverture de la valve que lorsque la conductivité de l'eau de rinçage dépasse un niveau prédéterminé. Les chronomètres sont peu utiles car ils ne s'adaptent pas à un changement de concentration des égouttures.

BIBLIOGRAPHIE

(25) Kovalcik, Robert; "Removing Heavy Metals from Printed Circuit Wastewater", Plating and Surface Finishing, v. 72, no. 2, February 1985, pp. 28-31.

(26) Whalen, B. A.; "New Developments in the Treatment of P.C. Wastes", Printed Circuit Fabrication, v. 4, no. 9, September 1981, pp. 24,26,48.

(27) Cartwright, Peter S.; "Overview of Membrane Separation Processes For Metal Finishing", Plating and Surface Finishing, v. 72, no. 8, August 1985, pp. 28-31.

(28) Lowenheim, Frederick A.; Electroplating, McGraw Hill, 1978.

ANNEXE E

Exigences des cuves

Exigences sur les cuves

Cuves	°C	Chauf	Matériel	Egouttoir	V	Remarques
PC-475	57-68	Q,T	PP,PE,VE		R	
AD-485	21-32	K,Q	PE,PP,FG, PVC		R	
PC-236	T.A.		PE,PP,VE	PE,PP,PV, 304,316AI	R	**PAS** Fe,Al,Zn,Cd
ACT-444	30-32		PE,PP,VE	PE,PP,PV, 304,316AI	R	
PA-493	21-27		PE,PP,PV		R	
Cu-406	21-29		PE,PP	AI,PL	R	
Cu-56	49	Q,T,AI	AI,FV,PE, PV,PP		R	
PC-455DE	50-54	Q,T,V	PE,PP,FV, PV,AI		R	
Cu-944	21-24	CHAUD/ FROID	PP,PV	PL	R	
MLB-495	77-82	AI,T Ti	PP,PE,AI, PVDF,CPVC		R	**PAS** de Quartz. Acier fortement recommandé.
MLB-497	66-88	Ti,T AT	Ti		R	**PAS** de Quartz ou d'acier.
MLB-498	60-66	T,AT	PV,PP,PE, PP,AI,ABS		R	Ti et AI sont attaqués par la solution.

Légende:

Eléments chauffants:**Q**uartz, **T**éflon, **A**cier recouvert de **T**éflon, **I**mmersion électrique, **V**apeur, **A**cier **I**noxydable, **Ti**tanium, **K**arbate.

Cuves et supports:**P**oly**P**ropylène, **P**oly**E**thylène, **VE**rre, **PV**C, **F**ibre de verre **R**enforcée, **A**cier **I**noxydable, **PL**asticol, **A**cier recouvert de **P**lasticol, **F**ibre de **V**erre, **PVDF, CPVC.**

ANNEXE F

Compilation des coûts

CARTES DOUBLE FACE
LISTE DES EQUIPEMENTS

	USD	CND	CND
Préparation des stratifiés:			
cisaille		2 800	2 800
étuve		6 000	6 000
concordance:			
poinçon de stratifiés	37 000		46 250
2ième gabarit	18 000		22 500
poinçon de film	12 000		15 000
insertion des goupilles	25 000		31 250
		sous-total	123 800 $
Perçage:			
perceuse (DAC TRIDENT)	82 000		102 500
compresseur		5 000	5 000
aspirateur, 38 litres, 1,7 HP		370	370
ébarbeuse (D.E.M.)	67 000		83 750
		sous-total	191 620 $
Métallisation des trous:			
cuves		5 000	5 000
égouttoirs (5)	500		625
éléments chauffants (5)	1 000		1 250
contrôle de température (5)		1 500	1 500
filtration, 200 litres par heure		600	600
		sous-total	8 975 $
Impression:			
laminateur de photorésine	25 000		31 250
unité d'insolation PC-130	40 000		50 000
développeur (D.E.M. Proto)	18 000		22 500
		sous-total	103 750 $
Galvanoplastie:			
cuves		5 000	5 000
égouttoirs (7)	1 575		1 969
éléments chauffants (5)	1 000		1 250

contrôle de température (4)		1 200	1 200
filtration:			
cuivre, 1700 litres par heure		3 200	3 200
étamage, 300 litres par heure		1 300	1 300
redresseurs de courant:			
500 Amp (2)		7 000	7 000
100 Amp		2 000	2 000
barres conductrices		*	*
		sous-total	22 919 $

Morsure & décapage:

décapeur (D.E.M. Proto)	22 000		27 500
mordeur (D.E.M.)	40 000		50 000
brillanteur (D.E.M.)	14 000		17 500
séchoir #1 (D.E.M.)	14 000		17 500
		sous-total	112 500 $

Finition:

four à UV	16 600		20 750
sérigraphie	1 500		1 875
refusion		5 000	5 000
contacts d'extrémité de carte (incluant solutions)	10 000		12 500
soudure à la vague	15 000		18 750
		sous-total	58 875 $

Autres:

déioniseur d'eau	17 500		21 875
traitement des effluents CPU-4000	75 000		93 750
cuve de rétention des eaux usées (2)	2 000		2 500
ventilateurs: agitation	2 000		2 500
push-pull	2 000		2 500
purificateur de vapeurs nocives	20 000		25 000
douche F(14-294-5) (2)		640	640
douche pour les yeux F(91-573) (2)		1 070	1 070
système d'oscillation mécanique		*	*
		sous-total	149 835 $
		total	772 274 $

CARTES DOUBLE FACE
PRODUITS CONSOMMABLES

	Prix	Qté	Total
forets et fraises			
(calibres variés)	5,	3 000	15 000
anodes:			
cuivre 610x150x25 mm	280,	15	4 200
étain-plomb 60/40 610x75x12 mm	360,	10	3 600
crochets:			
monel	28,	10	280
titanium	28,	15	420
sacs à anodes	8,	25	200
stratifiés (FR-4):			
90x120 cm 1oz SC	70,	100	7 000
90x120 cm 1oz DC	75,	200	15 000
90x120 cm 2oz SC	73,	50	3 650
90x120 cm 2oz DC	96,	50	4 800
90x120 cm ½oz DC	79,	100	7 900
contreplaques d'entrée/sortie	*	*	*
résine photosensible			
Riston 3015 (par m²)	10,	540	5 400
masque de soudure			
Vacrel (par m²)	10,	270	2 700
		total	70 150 $

CARTES DOUBLE FACE
LISTE DES SOLUTIONS CHIMIQUES

	Prix	Qté	Total
Métallisation des trous:			
nettoyeur/conditionneur (PC-475)	20,14 g	5	100,70
micromorsure (AD-485)	358,35 c	1	358,35
chlore (PC-236)	62,63 c	1	62,63
activateur: (ACT-444)	324,73 g	2	649,46
(PC-236 B)	62,63 c	1	62,63
(act-add)	174,70 g	1	174,70
accélérateur: (ENPLATE-493 A)	30,32 g	5	151,60
(ENPLATE-493 B)	13,10 g	10	131,00
cuivrage chimique: (CU-406 A)	23,00 g	5	115,00
(CU-406 B)	13,75 g	5	68,75
(CU-406 C)	7,52 g	5	37,60
réducteur	11,99 g	5	59,95
stabilisateur	12,05 g	5	60,25
anti-oxydant (CU-56)	19,31 g	5	96,55
	sous-total		2 129,17 $
Galvanoplastie:			
nettoyeur (PC-455 DE)	11,86 g	10	118,60
cuivrage électrolytique (CU-944)	50,50 g	10	505,00
étain-plomb (Solderex NFE)	155,50 g	10	1 555,00
	sous-total		2 178,60 $
Autres:			
acide sulfurique (16 litres)	226,00	4	904,00
ammoniac alcalin	*	*	*
brillanteur d'étamage (SB-489)	7,77 g	55	427,35
révélateur de résine photosensible: (1 contenant fait 45 litres) machine régulière	9,00	10	90,00
décapeur de résine photosensible: (1 contenat fait 45 litres) machine régulière	14,00	10	140,00
refusion: huile chaude (4 L)	45,84	10	458,40
flux (4 L)	36,36	10	363,60
	sous-total		2 383,35 $

Traitement des effluents:

agent d'enduction des filtres	*	*	*
hydroxyde de sodium	*	*	*
agent de précipitation	450,00 b	1	450,00
		sous-total	450,00 $
		total	7 141,12 $

c par 100 livres
g par gallon
b baril de 55 gallons américains

LABORATOIRE CHIMIQUE
LISTE DU MATERIEL

	pq	qté	prix	total
Contenants et accessoires:				
bécher 100 ml F(02-540H)	12	1	34,87	34,87
bécher 250 ml F(02-550K)	12	1	32,64	32,64
burette 50 ml F(03-700-22C)	1	1	122,11	122,11
cylindre grad. 5 ml F(08-550A)	1	1	10,12	10,12
cylindre grad. 25 ml F(08-550C)	1	1	13,14	13,14
cylindre grad. 50 ml F(08-550D)	1	1	14,09	14,09
cylindre grad. 100 ml F(08-550E)	1	1	16,11	16,11
cylindre grad. 250 ml F(08-550F)	1	1	25,28	25,28
égouttoir F(91-160)	1	1	369,94	369,94
entonnoir Buchner 5,5 cm F(10-357B)	1	1	69,05	69,05
filtre microfibre GF/B 5,5 cm (pas de papier cellulose) F(09-874-26)	100	1	52,31	52,31
fiole à filtrer 125 ml F(10-180C)	6	1	111,61	111,61
fiole Erlenmeyer 125 ml F(10-040D)	12	1	39,00	39,00
fiole Erlenmeyer 250 ml F(10-040F)	12	1	40,12	40,12
fiole Erlenmeyer 500 ml F(10-040H)	6	1	25,38	25,38
fiole jaugée 100 ml F(10-210C)	6	1	95,82	95,82
fiole jaugée 1000 ml F(10-210G)	1	1	30,15	30,15
flacon à réactif 125 ml F(02-940B)	6	1	85,86	85,86
flacon à réactif 250 ml F(02-940C)	1	2	15,15	30,30
flacon à réactif 1000 ml F(02-886E)	24	1	195,19	195,19
flacon à réactif ambre 1000 ml F(02-947)	1	2	57,76	115,52
flacon à rincer 500 ml F(03-409-22C)	6	1	22,47	22,47
flacon compte-gouttes 60 ml F(02-992B)	1	2	17,01	34,02
goupillon pour béchers F(03-540)	1	1	21,51	21,51
goupillon pour burettes F(03-614)	12	1	39,53	39,53
goupillon pour pipettes F(03-625)	1	1	7,04	7,04
pipette 1 ml F(13-650B)	1	2	8,79	17,58
pipette 2 ml F(13-650C)	1	2	8,79	17,58
pipette 5 ml F(13-650F)	1	2	8,79	17,58
pipette 10 ml F(13-650L)	1	2	9,75	19,50
pipette 20 ml F(13-650N)	1	2	9,75	19,50
pipette 25 ml F(13-650P)	1	2	15,15	30,30
pipette de Mohr 10 ml F(13-665M)	1	2	8,79	17,58
remplisseur de pipette F(13-681-51)	1	1	29,62	29,62
statif double pour burettes F(14-688)	1	1	86,39	86,39
support à pipettes F(13-712-10)	1	1	49,92	49,92
			sous-total	1 958,73 $

Appareillage:

agitateur magnétique F(14-493-220P)	1	1	333,90	333,90
agitateur magnétique chauffant 400°C F(11-493-210T)	1	1	401,74	401,74
balance analytique 109 gr Mettler AE100 F(01-909-375)	1	1	1 998,10	1 998,10
barreaux d'agitateur F(14-511-94)	1	3	5,08	15,24
comptoirs et armoires		1	8756,00	8 756,00
extracteur de barreaux F(14-511-86)	1	1	9,96	9,96
hotte 6' acier F(93-670)	1	1	7 573,70	7 573,70
indicateurs de calibre:	*	*	*	*
papier pour pesée F(09-898-12A)	500	1	14,99	14,99
pH-mètre Orion 601A F(13-641-714)	1	1	1 552,90	1 552,90
pince à thermomètre F(15-445-80)	1	1	16,11	16,11
spatule avec cuillère F(14-375-20)	1	1	8,10	8,10
thermomètre -20/100 °C F(14-983-10B)	1	2	10,07	20,14
tige d'agitation 8" téflon F(14-518-50A)	1	1	7,26	7,26
tige d'agitation 8" verre F(11-380C)	72	1	26,80	26,80
		sous-total		20 734,94 $

Equipements de tests:

micro-sectionnement: (LECO)				
scie à diamant Leco VC-50	1	1	4 737,20	4 737,20
polisseuse Leco VP-150	1	1	3 141,80	3 141,80
accessoire Leco AP-50	1	1	3 650,40	3 650,40
enrobage Leco P V	1	1	795,60	795,60
chargeur d'éprouvettes Leco	1	1	1 228,24	1 228,24
gobelets (12)	1	1	20,59	20,59
Lecoset 7007	1	1	148,72	148,72
microscope	1	111	500,00	11 500,00
Cellule Hull:				
Hull cell 267 ml	1	1	420,00	420,00
anodes de cuivre	1	5	12,00	60,00
anodes étain-plomb 60/40	1	5	24,00	120,00
cathode bronze	1	10	12,00	120,00
redresseur 0-6V 25A	1	1	495,00	495,00
Beta-Backscatter (**optionnel**):				
UPA Technology, MicroDerm	1	110	000,00	10 000,00
accessoires	1	110	586,00	10 586,00
		sous-total		47 023,55 $
			total	69 717,22 $

LABORATOIRE CHIMIQUE
LISTE DES REACTIFS

	pq	qté	prix	total
acide acétique, glacial (A38)	500 ml	1	22,35	22,35
acide chlorhydrique (A144)	500 ml	1	19,95	19,95
acide nitrique (A200)	500 ml	1	30,00	30,00
acide sulfurique (A300)	500 ml	1	21,30	21,30
amidon, solution (S408)	1 l	1	22,75	22,75
ammonium, hydroxyde (A669)	500 ml	1	16,20	16,20
argent, nitrate (S181)	25 gr	1	26,00	26,00
baryum, chlorure (B34)	500 gr	1	43,85	43,85
bromocrésol, vert de... (B383)	5 gr	1	82,90	82,90
bromothymol, bleu de... (SI22)	500 ml	1	17,25	17,25
EDTA-Na_2 (S311)	500 gr	1	86,55	86,55
iode (I37)	100 gr	1	59,30	59,30
méthanol (A412)	500 ml	1	8,55	8,55
méthyle, orangé de... (M216)	25 gr	1	15,25	15,25
méthyle, rouge de... (M296)	10 gr	1	15,50	15,50
P.A.N. (P381)	5 gr	1	164,60	164,60
phénol-phtaléine (P79)	25 gr	1	14,45	14,45
potassium, chromate (P220)	500 gr	1	63,55	63,55
potassium, iodate (P253)	100 gr	1	56,95	56,95
sodium, acétate anhydre (S209)	500 gr	1	49,30	49,30
sodium, bicarbonate (S233)	500 gr	1	13,05	13,05
sodium, chlorure (S271)	500 gr	1	14,40	14,40
sodium, hydroxyde (S318)	500 gr	1	22,25	22,25
sodium, hypophosphite (S321)	500 gr	1	51,30	51,30
sodium, sulfate (S419)	500 gr	1	31,20	31,20
sodium, thiosulfate (S445)	500 gr	1	19,70	19,70
xylénol-orange indicateur (X15)	5 gr	1	118,65	118,65
			total	1 107,10 $

Note: ces prix proviennent du catalogue Fisher Scientifics 1987.

CARTES MULTICOUCHES
LISTE DES EQUIPEMENTS

	USD	CND	CND
Ponçage: (D.E.M.)			
prénettoyeur			
ponceur			
séchoir #2	105 000		131 250
DuraBOND: (D.E.M.)			
prénettoyeur			
DuraBOND	112 000		140 000
Déglaçage:			
plasma (**optionnel**) (BRANSON)	175 000		218 750
permanganate de potassium:			
cuves		5 000	5 000
éléments chauffants (4)	800		1 000
contrôle de température (4)		1 200	1 200
égouttoirs (5)	1 000		1 250
Mini-Lab: (D.E.M.)			
développeur	12 000		15 000
morsure	12 000		15 000
décapeur	12 000		15 000
Stratification:			
presse hydraulique (PHI)	42 000		52 500
plaques de pressage (4)	3 500		4 375
Autres:			
nettoyeur ultrasonique	7 700		9 625
contrôle de l'atmosphère dans la chambre inactinique (°C, %RH, Classe 100/10000)		75 000	75 000
		total	684 950 $

CARTES MULTICOUCHES
PRODUITS CONSOMMABLES

	Prix	Qté	Total
feuilles préimprégnées de résine à l'état B	*	*	*
polyimide	*	*	*
bouteille de gaz mélangé pour plasma CF_4/O_2	2 250	1	2 250
		total	2 250 $

CARTES MULTICOUCHES
LISTE DES SOLUTIONS CHIMIQUES

	Prix	Qté	Total
Déglaçage:			
sensibilisateur: (MLB-495 A)	19,80 g	5	99,00
(MLB-495 B)	75,80 g	10	758,00
permanganate: (MLB-497 A)	894,00 c	1	894,00
(MLB-497 B)	19,00 g	10	190,00
(MLB-497 C)	15,05 g	5	75,25
neutralisateur (7971)	591,46 c	1	591,46
morsure du verre (MLB-498)	32,12 g	5	160,60
		sous-total	2 768,31 $
Autres:			
chlorure ferrique (20 litres)	88,64	7	620,48
révélateur de résine photosensible: (1 contenant fait 45 litres) Mini-Lab	9,00	3	27,00
décapeur de résine photosensible: (1 contenant fait 45 litres) Mini-Lab	14,00	3	42,00
DuraBOND: (gratuit pour la durée des expérimentations) VersaCLEAN 415 SureETCH 550 DuraBOND 750 A/B DuraBOND 770 PT			
		sous-total	689,48 $
		total	3 457,79 $

c par 100 livres
g par gallon

INSTALLATIONS

chambre inactinique	20 200
murets de protection	3 100
lignes d'air comprimé et des ventilateurs	4 200
lignes d'eau	6 200
drains	4 100
traitement des eaux usées	3 800
ventilation	17 300
électricité	31 600
total	90 500 $

Ces prix incluent les matériaux et la main-d'oeuvre.

RESUME DES COUTS

Cartes double face:		
équipements	772 274	
produits consommables	70 150	
solutions chimiques	7 141	
	sous-total	849 565
Laboratoire chimique:		
matériel	69 717	
réactifs	1 107	
	sous-total	70 824
Cartes multicouches:		
équipements	684 950	
produits consommables	2 250	
solutions chimiques	3 457	
	sous-total	690 657
Installations	90 500	
	sous-total	90 500
Surface		
300 m² @ 1 720 $/m²	514 000	
150 m² @ 1 720 $/m²	257 000	
	sous-total	771 000
	total	2 472 546 $

GLOSSAIRE

ACCÉLÉRATEUR: substance qui augmente la vitesse d'une réaction chimique.

ACCOSTAGE: procédé au cours duquel les couches d'une carte multicouche sont mises en concordance et superposées en préparation pour le cycle de pressage.

ACTINIQUE: se dit de radiations qui ont la propriété d'exercer une action chimique sur certaines substances photosensibles pour produire des images.

ACTIVATEUR: corps qui, mélangé à un catalyseur, en augmente l'activité.

ANION: ion négatif.

ANNEAU ROSE: défaut de fabrication où la couche d'oxyde a été attaquée par un acide, laissant le cuivre à nu autour des trous sur les couches internes.

ANODE: électrode où le courant pénètre, les électrons quittent, la solution; en électrolyse, l'électrode positive où la réaction d'oxydation survient, i.e. les ions négatifs sont déchargés, les ions positifs formés.

BRILLANTER: polir une surface métallique par électrolyse.

BRILLANTEUR: produit rajouté à un bain de revêtement électrolytique pour brillanter une surface.

BROCHE: partie tournante d'une machine-outil, servant à usiner un trou dans la pièce.

CATHODE: électrode où le courant quitte, les électrons pénètrent, la solution; en électrolyse, l'électrode négative où la réaction de réduction survient, i.e. les ions positifs sont déchargés, les ions

négatifs formés. En galvanoplastie, l'électrode qui reçoit le dépôt métallique.

CATALYSEUR: substance qui, utilisée en faible proportion, augmente la vitesse d'une réaction chimique et qui, théoriquement, reste chimiquement inchangée à la fin de la réaction.

CATION: ion positif.

CELLULE HULL: boîte trapézoïdale faite d'un matériau isolant avec des électrodes disposées pour l'observation des effets anodiques ou cathodiques sur une grande plage de densités de courant.

CHÉLATE: complexe de coordination d'un ion métallique dont l'un au moins des ligands est un anion possédant deux ou plusieurs sites complexants, qui permettent de fixer l'ion métallique comme une bille dans une pince. (Les chélates empêchent la précipitation de l'ion métallique à pH élevé.)

CLICHÉ DE PRODUCTION: cliché à l'échelle 1 utilisé pour la fabrication des cartes imprimées.

CMS: composants montés en surface. Composants dont les broches sont conçues de telle sorte qu'ils sont assemblés à ras la carte sans l'utilisation de trous traversant la carte de part en part pour leur fixation. Ils sont aisément d'un ordre de grandeur plus petits que les composants usuels.

COLLIMATION: degré de parallélisme des rayons d'une source lumineuse. Une source lumineuse avec une bonne collimation a des rayons parallèles alors qu'une source de lumière usuelle produit des rayons divergents ou non parallèles.

CONFIGURATION DE PERÇAGE: disposition de tous les trous dans une carte imprimée.

COMPLEXANT: se dit de composés chimiques propres à induire la formation de complexes.

COMPLEXE: substance formée par l'ensemble de deux ou plusieurs groupements chimiques liés entre eux. (Les complexes sont formés grâce à la propriété qu'ont de nombreux ions, surtout les métaux lourds, d'attirer et de grouper autour d'eux des ions ou des molécules appelés *ligands* ou *coordinats*.)

CONCORDANCE: degré de conformité de la position d'une impression, ou portion d'impression, à la position théorique ou à la position de toute autre impression située sur la carte.

CONDUCTEUR: piste conductrice individuelle d'une impression conductrice.

CONSTANTE DIÉLECTRIQUE: propriété d'un diélectrique qui détermine l'énergie électrostatique emmagasinée par unité de volume pour un gradient de potentiel unitaire.

CONTACT: épreuve obtenue en mettant un film photosensible en contact avec le phototype négatif ou positif à tirer.

CONTAMINANT: une matière solide, liquide ou gazeuse, un micro-organisme, un son, une vibration, un rayonnement, une chaleur, une odeur, une radiation ou toute combinaison de l'un ou l'autre susceptible d'altérer de quelque manière la qualité de l'environnement.

CONTREPLAQUE D'ENTRÉE: matériau placé au-dessus de la pile de stratifiés pour le perçage servant à atténuer les bavures de débouchage des forets.

CONTREPLAQUE DE SORTIE: matériau placé au-dessous de la pile de stratifiés pour le perçage servant à atténuer les bavures de débouchage des forets.

CONTRETYPE: fac-similé d'un phototype négatif ou positif.

COORDINAT: atomes ou groupement d'atomes liés à un atome occupant une position centrale.

COULÉE DE RÉSINE: fluage de la résine du matériau isolant sur la surface ou la tranche de l'impression conductrice.

CUIVRAGE CHIMIQUE: la réduction autocatalytique contrôlée d'un ion métallique sur une surface catalysée.

CUIVREUX: composé de cuivre monovalent.

CUIVRIQUE: composé de cuivre bivalent.

DÉCOLLEMENT INTERLAMINAIRE: séparation totale ou partielle des couches élémentaires à l'intérieur d'un matériau de base ou de cartes multicouches. (Syn. délaminage, exfoliation).

DÉFINITION D'UNE TRACE: fidélité de reproduction de l'impression conductrice relativement au dessin modèle.

DÉGLAÇAGE: opération qui consiste à enlever la coulée de résine recouvrant le cuivre des couches internes à l'intérieur du trou après le perçage des flans.

DÉIONISER: équilibrer les charges électriques d'un milieu par suppression de ces charges ou apport de charges de signe contraire.

DEMANDE BIOCHIMIQUE D'OXYGÈNE (DBO_5): la quantité d'oxygène, exprimée en milligrammes par litre (mg/L), utilisée par l'oxydation biochimique de

la matière organique pendant une période de cinq jours à une température de 20°C.

DENDRITE: croissance cristalline arborescente.

DÉPÔT BRÛLÉ: un dépôt rugueux, non uniforme et qui laisse à désirer causé par l'application d'un courant excessif et contenant souvent des oxydes et autres inclusions.

DÉTOURAGE: opération ayant pour résultat de donner à la pièce le contour exact que lui impose le dessin.

DIAZO: émulsion sensible aux rayonnements ultraviolets, ne contenant pas de sels d'argent et pouvant être manipulée à la lumière ambiante, que l'on applique habituellement sur un film transparent et stable. Les émulsions diazoïques produisent des duplicata exacts par un procédé d'impression par contact et sont développés dans une vapeur d'ammoniac. Les images diazoïques ont une forte densité actinique et une transparence visuelle.

DIAPHONIE: interférence électrique indésirable causée par le couplage d'énergie entre des lignes de signaux.

DISTANCE ENTRE CONDUCTEURS: distance entre les bords en regard (et non d'axe en axe) de conducteurs voisins sur une même face de la carte imprimée.

ÉBARBER: enlever, couper les parties saillantes sur le bord d'une surface.

ÉGOUTTOIR: support sur lequel sont fixés les flans en vue de leur transport d'un bac à l'autre.

ÉGOUTTURE: volume d'un liquide adhérant à un flan à sa sortie d'un bain.

ÉLECTRODE: un conducteur métallique par lequel un courant pénètre ou quitte une cellule électrolytique.

ÉLECTROLYTE: milieu conducteur dans lequel circule un courant accompagné d'un mouvement de matière; la plupart du temps une solution aqueuse d'acides, bases ou sels.

ÉPARGNE: couche protectrice (encre, film organique, dépôt métallique, etc.) utilisée pour protéger les portions désirées du circuit imprimé contre l'action du mordant, de la soudure, ou du placage.

ÉPROUVETTE DE TESTS: portion du flan utilisée pour effectuer des tests spécifiques ou un groupe de tests connexes pour l'approbation de la carte.

ÉTAMAGE: déposition d'un mélange d'étain et de plomb fondu ou par galvanoplastie sur une surface de cuivre.

ÉTAT B: étape intermédiaire de la réaction de certaines résines thermodurcissables, dans laquelle le produit se gonfle au contact de certains liquides et se ramollit lorsqu'il est chauffé, mais ne peut se dissoudre ni fondre entièrement.

ÉTAT C: étape finale de la réaction de certaines résines thermodurcissables, dans laquelle le produit est pratiquement insoluble et infusable.

ÉTUVE: appareil destiné à obtenir une température déterminée, supérieure à celle du milieu ambiant.

EXCROISSANCE: accroissement de la largeur du conducteur sur un bord, produit par le dépôt électrolytique, par rapport au cliché de production ou par rapport à la réserve.

EXOTHERMIQUE: qui dégage de la chaleur.

FACTEUR DE MORSURE: rapport de la profondeur de la morsure sur la morsure latérale.

FEUILLE PRÉIMPRÉGNÉE: matériau en feuille (par exemple, tissu de verre) imprégné d'une résine à l'état B.

FLAN: ébauche de matériau de base découpée au format de travail.

FORET: instrument de métal servant à forer.

FLOCULANT: polymère d'origine organique qui, ajouté à une suspension, provoque la précipitation des particules.

GALVANOPLASTIE: procédé qui permet d'appliquer un dépôt de sels métalliques libérés par électrolyse sur des objets que l'on veut recouvrir.

GRAVURE EN RETRAIT: attaque massive du support isolant servant à découvrir légèrement les anneaux de cuivre sur les couches internes selon une direction perpendiculaire à l'axe du trou. La gravure en retrait est généralement une opération supplémentaire au déglaçage qui lui ne sert qu'à exposer le flanc de l'anneau de cuivre.

GRAVURE SOUS-JACENTE: rainure ou affouillement d'un bord de conducteur causé par la gravure.

HYDRAZINE: composé basique, gaz combustible formé uniquement d'hydrogène et d'azote.

HYDROPHILE: qui a une forte affinité avec l'eau.

HYDROPHOBE: que l'eau ne mouille pas.

HYGROSCOPIQUE: qui absorbe l'humidité de l'air.

IMPRESSION CONDUCTRICE: configuration des parties électriquement conductrices d'une carte imprimée.

IMPRESSION POSITIVE: image du cliché de production dans laquelle l'impression conductrice n'est pas transparente.

INACTINIQUE: sans action chimique notable (notamment sur une surface sensible).

INCLUSION: particule étrangère dans la couche conductrice ou la métallisation et/ou dans le matériau de base.

INHIBITEUR: produit chimique ajouté en faible quantité à une solution corrosive pour diminuer son action sur un métal.

INSOLATION: action d'exposer à une radiation lumineuse.

IONISATION: phénomène par lequel un atome, une molécule, un radical acquièrent ou perdent un ou plusieurs électrons et deviennent ainsi porteurs de charges électriques.

ITGE: *technologie des circuits intégrés*, intégration à très grande échelle.

LARGEUR DU CONDUCTEUR: largeur mesurée d'un conducteur lorsqu'on l'observe perpendiculairement en n'importe quel endroit, pris au hasard, de la carte imprimée prête à être livrée.

On ne tiendra pas compte des imperfections, telles qu'entailles, piqûres ou rayures, tolérées par la spécification particulière.

LIANT: élément de base d'un adhésif.

LIGAND: molécules ou ions unis à l'atome central d'un complexe par une liaison de coordination.

MARQUAGE: lettres ou symboles de la carte imprimée indiquant, par exemple, les numéros des pièces, l'emplacement des composants, etc.

MORDANT: substance utilisée pour exercer une action corrosive sur un métal.

MORSURE: opération qui consiste à attaquer à l'aide d'un mordant les parties de cuivre du circuit imprimé non protégées par l'épargne.

OUTILLAGE PHOTOGRAPHIQUE: ensemble des masques photographiques utilisés pour la fabrication d'un circuit imprimé.

OXYDATION: réaction ayant lieu à l'anode où des électrons sont retirés d'un réactif.

PASTILLE: partie d'impression conductrice utilisée usuellement, mais non exclusivement, pour la connexion et/ou la fixation de composants.

PHOTOPOLYMÈRE: un polymère dont les caractéristiques changent lorsqu'il est soumis à une radiation d'une fréquence donnée.

PHOTOPOLYMÉRISABLE: qui peut être polymérisé par la lumière.

PHOTORÉPÉTITION: technique d'exposition multiple d'une image simple pour produire une image multiple en suivant un ordre précis de translations et/ou de rotations dans un même plan. On l'utilise pour produire une image multiple d'un dessin modèle assez grande pour les flans de production.

PHOTOTYPE: image photographique obtenue par enregistrement direct à partir du sujet. Lorsqu'on effectue la prise de vue, l'image, après développement, constitue un *phototype* dit *négatif* (cas général des clichés sur lesquels les lumières et les ombres sont traduites par des opacités et des transparences inverses de celles du sujet). Si

l'image latente enregistrée est traitée par un procédé d'inversion, le phototype est *positif*.

PIQÛRE: trou minuscule traversant la couche ou l'impression conductrice.

PIQUETÉ: se dit d'une surface métallique parsemée de petits trous.

POLARISATION: formation, dans le voisinage des électrodes, de produits qui modifient l'intensité du courant.

POLYMÈRE: se dit d'une molécule dont la masse moléculaire est multiple de celle d'une autre, dite «monomère». En pratique, un polymère est un plastique.

POLYMÉRISER: unir chimiquement deux ou plusieurs monomères ou polymères du même type pour former une molécule de masse moléculaire supérieure.

PONÇAGE: opération qui consiste à altérer une surface au moyen d'une substance abrasive (pierre ponce, poudre de ponce).

POUVOIR DE PÉNÉTRATION: mesure du degré d'uniformité d'un revêtement métallique sur la surface irrégulière de la cathode, obtenu dans une solution électrolytique.

PROCÉDÉ ADDITIF: procédé par lequel on obtient l'impression conductrice par une déposition autocatalytique sélective d'un matériau conducteur sur un support isolant non métallisé.

PROMOTEUR: un produit chimique, lui-même un faible catalyseur, qui augmente grandement l'activité d'un catalyseur donné.

RÉDUCTION: réaction ayant lieu à la cathode où des électrons sont rajoutés à un réactif.

REFUSION: procédé qui consiste à appliquer assez de chaleur pour faire fondre l'étamage recouvrant les conducteurs de cuivre. La refusion fait couler l'étamage sur les parois des traces et élimine les éclats de métal engendrés par la morsure.

RÉSERVE: revêtement utilisé pour masquer ou recouvrir les endroits choisis. (Syn. épargne)

RÉSINE: matière organique solide, semi-solide, ou pseudo-solide qui a une masse moléculaire indéfinie et souvent élevée, présente une tendance à fluer lorsqu'elle est soumise à une contrainte, en général un domaine de ramollissement ou de fusion, et habituellement se rompt conchoïdalement. Au sens large, le terme est utilisé pour désigner tout polymère qui est une matière de base pour les plastiques.

RÉSISTANCE D'ADHÉSION: résistance au décollement qu'offre un conducteur sur le support isolant.

RÉTICULATION: réaction qui établit des liaisons chimiques entre les chaînes macromoléculaires.

SELS DE ROCHELLE: tartrate de sodium et de potassium $KNaC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$.

SÉRIGRAPHIE: procédé d'impression *à travers* la matrice appelée *écran* ou *trame* tendue sur un *cadre*, ou *chassis*. C'est dans les trous de la trame que l'encre sera poussée par une *raclette* et viendra imprimer les surfaces sur lesquelles sera posé le cadre.

SILANE: nom générique des hydrures de silicium et de leurs dérivés hydrocarbonés.

SOUDABILITÉ: propriété d'un matériau qui se prête à la réalisation d'une construction par joints soudés.

STABILITÉ DIMENSIONNELLE: absence de distorsions causées par des changements de température ou d'humidité, le vieillissement, la manipulation ou le stress.

STANNEUX: se dit de l'étain bivalent.

STANNIQUE: se dit de l'étain quadrivalent.

STRATIFICATION: procédé de liaison de deux ou plusieurs couches de matière(s).

STRATIFIÉ: produit fabriqué en réunissant deux ou plusieurs couches de matière(s).

SUPPORT ISOLANT: matière isolante sur laquelle l'impression peut être réalisée.

SUPPORT ISOLANT MÉTALLISÉ: une condition du support isolant, auquel une couche relativement mince ou une feuille de métal adhère sur l'un ou les deux côtés.

SURFACTANT: molécule amphibile qui, placée en solution diluée dans l'eau, abaisse sa tension superficielle. (Syn. tensioactif).

SURPLOMB: somme de l'excroissance et de la gravure sous-jacente ou excroissance seulement en l'absence de gravure sous-jacente.

TECHNOLOGIE EN SAILLIE: technologie où les composants n'ont pas de broches traversant la carte de part en part et sont montés à ras la carte.

TEMPÉRATURE DE TRANSITION VITREUSE: point situé au milieu approximatif du domaine de température dans lequel se produit la transition vitreuse. Température à laquelle l'époxy, par exemple, ramollit et

commence à se dilater indépendamment du taux de dilatation du verre. La transition du verre est un changement de second ordre où le taux de dilatation ou le taux d'absorption de la chaleur varie sur un intervalle étroit de température. Une transition de premier ordre est un changement de phase, telle la fusion.

THIO-URÉE: dérivé de l'acide thiocarbonique de formule H_2N-CS-NH_2, obtenu par chauffage du thiocyanate d'ammonium.

TRANSITION VITREUSE: changement réversible dans un polymère amorphe ou dans les parties amorphes d'un polymère partiellement cristallisé, de (ou vers) l'état visqueux ou gommeux vers (ou d') un état dur relativement fragile.

TYPON: film positif obtenu par contretype à partir du négatif d'origine, comparable au négatif typo.

VERNIS: solution résineuse qui laisse sur le corps où on l'applique, après vaporisation ou solidification, une pellicule unie et qui sert à le protéger.

VRILLAGE: déformation d'une plaque rectangulaire, telle que l'un des angles n'est pas dans le plan des trois autres.

XANTHATE: sel ou ester de l'acide xanthogénique.

XANTHOGÉNIQUE: *acide xanthogénique*, ester de l'acide dithiocarbonique, de formule générale RO-CS-SH, dont les sels se forment par action des alcoolates ROM sur le sulfure de carbone CS_2. (Syn. acide xanthique).

Références:

Commission Electrotechnique Internationale, Termes et définitions pour les circuits imprimés, 1975.

Norme Française NF T 50-100, Plastiques, Vocabulaire bilingue, français-anglais, avril 1980.

Nolet, Andrée, Lexique de la microélectronique, Cahiers de l'Office de la langue française, Les publications du Québec, 1987.

Dictionnaire des Termes Nouveaux des Sciences et Techniques, Conseil international de la langue française, 1983.

Piraux, H., Dictionnaire des termes relatifs à l'électronique, l'électrotechnique, l'informatique et aux applications connexes, 1981.

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
3 9334 00290843 0