

Bertrand Dreyfus-Alain

# Technologie en microélectronique à câblage imprimé

Editions  
**TEC**  
& **DOC**

*Lavoisier*

# Table des matières

Avant-propos .....	1
--------------------	---

## Première partie – Montage en surface

<b>Introduction – L'évolution vers le montage et l'assemblage en surface</b> .....	7
1. Avantages offerts par le montage en surface .....	9
2. Quelques chiffres.....	14
3. Industrialisation du montage et de l'assemblage en surface : pour quels marchés ? par quelles voies ? .....	15
3.1. Technique des boîtiers céramique sur substrat céramique ou équivalent .	15
3.2. Production de masse pour le domaine domestique .....	16
3.3. Systèmes à hautes performances ( <i>high tech surface attach market</i> ).....	16
3.4. Circuit hybride monté sur câblage imprimé.....	17
3.5. Petite informatique et terminaux de bureau .....	17
3.6. Objectif commun.....	17
3.7. Dispositifs passifs.....	21
3.8. Perspectives.....	21

<b>Chapitre 1 – Composants, dispositifs et circuits électroniques</b> .....	23
-----------------------------------------------------------------------------	----

1. Condensateurs pour montage en surface .....	24
1.1. Condensateurs « céramique ».....	24
1.2. Standardisation des dimensions .....	31
1.3. Système d'interconnexion.....	31

1.4.	Nouveaux procédés de production .....	32
1.5.	Les condensateurs électrolytiques .....	33
2.	Circuits intégrés pour montage en surface .....	33
2.1.	Nouveaux conditionnements .....	33
2.2.	De nouvelles conditions thermiques .....	35
2.3.	Point de vue de l'utilisateur.....	39
2.4.	La miniaturisation se poursuit .....	40
2.5.	Conditionnement sous résine .....	43
3.	Résistances pour montage en surface.....	44
3.1.	Résistances en pastilles « <i>chips</i> » pour montage en surface .....	44
3.2.	Technique des couches minces .....	44
3.3.	Technique des couches épaisses.....	44
3.4.	Présentation des pastilles.....	45
3.5.	Pastilles-résistances pour applications militaires .....	47
3.6.	Leurs avantages .....	48
4.	Diodes et transistors pour montage en surface.....	49
4.1.	Présentation en boîtier SOT .....	49
4.2.	Diodes .....	53
4.3.	Fiabilité, taux de pannes, durée de vie des dispositifs .....	54
4.4.	Contraintes thermiques.....	57
4.5.	Prix des SOT .....	57
4.6.	Avantages des SOT .....	58
4.7.	Analyse de la valeur du SOT .....	58
4.8.	D2PAK et D3PAK pour la puissance .....	59
4.9.	Nouvelle configuration pour diodes.....	59
5.	« Chip-carrier » .....	61
5.1.	Avantages comparatifs du « <i>chip-carrier</i> » .....	62
5.2.	Différents types de « <i>chip-carriers</i> » .....	63
	Les « <i>chip-carriers</i> » munis de broches de connexion .....	63
5.3.	Les « <i>chip-carriers</i> » sans broches de connexion .....	65
5.4.	L'évolution des « <i>chip-carriers</i> » .....	66
6.	TAB.....	67
6.1.	Le film cinématographique porteur.....	67
6.2.	La disponibilité du TAB.....	68
6.3.	Le « <i>tape pack</i> » .....	72
	Commentaires d'époque sur le « <i>tape pack</i> » .....	72
7.	Matériaux semi-conducteurs composants .....	73
7.1.	Les plages de contact .....	74
7.2.	Plages de contact d'aluminium sur silicium.....	75
8.	Matériaux composants ou puces nues .....	75
8.1.	Connexions par microfils d'or ou d'aluminium.....	76
8.2.	Soudage des microfils .....	77
8.3.	Connexions par bossages .....	77
8.4.	Connexions par billes d'alliage .....	78
8.5.	Report des circuits intégrés en pastilles sur des substrats .....	79
8.6.	Montage « <i>face up</i> » .....	80
	Par soudage eutectique .....	80

Par un verre conducteur .....	80
Par collage .....	80
8.7. Montage « face down » .....	81
8.8. Pour les « MCM » .....	81
8.9. Remarque .....	81
9. Connecteurs et embases .....	82
9.1. Connecteurs à montage en surface .....	82
9.2. Matériau du corps du connecteur .....	85
9.3. Connecteur, support mécanique .....	85
9.4. Broches coplanaires et stabilité géométrique .....	85
9.5. Embases, intermédiaires de connexion .....	86
9.6. Micro embases – boîtiers .....	87
PBGA .....	87
CBGA .....	89
CSP .....	89
10. Observations à caractère général .....	89
10.1. Conditionnement sous résine .....	89
10.2. Résistances intégrées dans le même matériau .....	90
10.3. Maîtrise du brasage pour les dispositifs à grand nombre d'entrées et sorties .....	90
<b>Chapitre 2 – Conception des circuits – Implantation et routage .....</b>	<b>93</b>
1. Montage par insertion et/ou en surface ? .....	93
2. Conception des circuits .....	94
3. Positionnement relatif des dispositifs .....	95
3.1. Critère des croisements .....	96
3.2. Critère de réduction des longueurs de conducteurs .....	96
3.3. Critère de distribution homogène des conducteurs sur toute la surface des substrats des circuits imprimés .....	96
4. Exemple simple d'application .....	97
5. Configurations des plots d'implantation des dispositifs et circuits intégrés .....	98
5.1. Configurations des plots pour le brasage à la vague .....	98
5.2. Montage par collage pour le brasage à la vague .....	102
5.3. Configurations de plots pour le brasage ou pour la refusion .....	103
5.4. Plots pour les tests .....	107
6. Tolérances dans le montage en surface .....	108
<b>Chapitre 3 – Substrats compatibles .....</b>	<b>111</b>
1. Substrats compatibles .....	111
2. Du matériau de base au câblage imprimé .....	112
3. Substrats classiques .....	112
4. Évolution du substrat de verre époxy .....	113
5. Substrats à âmes métalliques .....	115
5.1. Construction d'un substrat .....	115
Contraintes sur ces substrats .....	115
Choix du métal d'âme .....	119
Résines améliorées .....	119

6. Substrats thermoplastiques.....	119
7. Remarques.....	122
8. Substrats sur bases métalliques.....	122
9. Substrats souples et flexibles.....	123
10. Remarques générales.....	125

## Chapitre 4 – Procédés photographiques..... 131

1. Environnement.....	131
2. Typons sur verre.....	131
3. Insolation directe sans typon photographique.....	132
4. De nouveaux typons photographiques.....	132
4.1. Progrès de la stabilité géométrique.....	132
4.2. Préconditionnement.....	133
4.3. Conditions d'utilisation.....	133
5. Pour des conducteurs et isolements de 50 $\mu\text{m}$ .....	135
5.1. Contrôle du film et préparation de surface.....	135
5.2. Application du film.....	135
5.3. Pelage du polyester et insolation.....	135
5.4. Développement.....	136
5.5. Les résultats.....	136

## Chapitre 5 – Polymérisation et adhésifs..... 137

1. Polymérisation.....	137
1.1. Définitions.....	138
1.2. Quelques exemples.....	138
1.3. Différents modes d'enchaînement.....	139
1.4. Enchaînements à deux constituants.....	141
1.5. Processus de polymérisation.....	141
1.6. Traitement thermique de polymérisation.....	143
2. Adhésifs.....	144
2.1. Notions théoriques sur les adhésifs.....	146
2.2. Défaillances.....	147
2.3. Différentes classes d'adhésifs.....	148
2.4. Adhésifs à base d'époxy.....	149
2.5. Adhésifs cyanoacrylates.....	151
2.6. Adhésifs aux uréthanes.....	151
2.7. Adhésifs anaérobies.....	152
2.8. Adhésifs acryliques.....	153
2.9. Quelques recommandations pratiques.....	153
3. Adhésifs pour le montage – assemblage de pastilles de matériaux composants semi-conducteurs.....	157
3.1. Montage-assemblage par collage.....	157
3.2. Difficultés avec les adhésifs liquides.....	157
3.3. Utilisation d'adhésif sec sur film.....	158
3.4. Caractéristiques des films secs d'adhésifs.....	159

3.5. Facteurs économiques .....	159
3.6. Adhésifs d'enrobage.....	159
<b>Chapitre 6 – Encres à braser .....</b>	<b>161</b>
1. Un peu d'histoire.....	163
2. Différentes compositions de brasures .....	164
3. Systèmes métallurgiques.....	164
3.1. Le système étain-plomb .....	164
3.2. Système étain-plomb-argent.....	165
3.3. Système étain-argent .....	165
3.4. Système étain-antimoine .....	165
4. Fabrication des encres de brasure.....	165
4.1. Poudre de brasure .....	166
4.2. Contenu organique .....	167
5. Contrôle des encres à braser.....	168
5.1. Contrôle des poudres de brasure .....	168
5.2. Contrôle des constituants organiques.....	169
5.3. Contrôle final sur l'encre .....	169
6. Techniques de dépôt.....	169
6.1. Application à la spatule.....	170
6.2. Application à la seringue.....	170
6.3. Application par sérigraphie .....	170
6.4. Remarque générale.....	171
7. Report des composants, dispositifs et circuits intégrés.....	171
8. Brasage et « Reflow » avec les encres à braser.....	172
8.1. Plaques chauffantes .....	172
8.2. Fer à souder .....	172
8.3. Nouvelles techniques .....	173
8.4. Nettoyages après usage de l'encre à braser.....	173
9. Des besoins se précisent.....	174
9.1. Normes .....	174
9.2. Nouvelles demandes.....	175
<b>Chapitre 7 – Sérigraphie.....</b>	<b>177</b>
1. Écrans et masques de sérigraphie.....	177
1.1. Cadre .....	177
1.2. Écran de sérigraphie .....	179
1.3. Montage et assemblage du tissu sur son cadre.....	180
1.4. Paramètres de la sérigraphie dépendant de l'écran .....	182
1.5. Préparation de l'écran de sérigraphie.....	182
Stockage des écrans de sérigraphie .....	183
1.6. Masques métalliques .....	184
2. Machines de sérigraphie.....	185
2.1. Montage de l'écran.....	185
2.2. Support du substrat.....	185
2.3. Raclette.....	186

3. Procédé de sérigraphie des encres à braser .....	186
3.1. Pour l'encre .....	186
3.2. Pour l'écran .....	187
3.3. Pour la raclette.....	188
3.4. Pour le substrat.....	188
3.5. Les défauts et leurs causes .....	189
L'épaisseur de l'impression est variable .....	189
L'épaisseur de l'encre à braser déposée est trop faible .....	189
L'épaisseur de l'encre à braser déposée est irrégulière .....	189
La couche d'encre à braser est trop épaisse .....	189
La résolution du dépôt d'encre est insuffisante .....	189
Les bords de l'impression d'encre à braser sont dentelés .....	190
Les bords de l'impression d'encre à braser présentent des bavures ..	190
La configuration d'encre à braser est incomplète .....	190
3.6. Automatisation du procédé de sérigraphie.....	190
4. Nouvelles propositions.....	191
4.1. Écrans polymères .....	191
4.2. Transfert direct d'encre à braser .....	191
4.3. Sérigraphie sélective .....	191

## Chapitre 8 – Équipements de préhension et de placement .....

1. Concepts de base concernant les équipements de préhension et de placement ..	193
2. Comment choisir une machine de préhension et de report ?.....	201
3. Évolution et progrès des équipements de préhension et de placement .....	202
3.1. Machines de placement des composants (« <i>chips</i> »).....	203
3.2. Usage des systèmes de vision .....	203
3.3. Amélioration de l'efficacité des machines.....	204
3.4. Un plus grand nombre de magasins .....	204
4. Comment regrouper les machines pour les évaluer ?.....	204
4.1. Les machines, selon leur usage .....	205
4.2. Nouvelle approche pour les systèmes de vision.....	206

## Chapitre 9 – Conditionnements collectifs des composants, dispositifs, circuits intégrés.....

1. Présentation des pièces.....	207
2. Géométrie des systèmes de conditionnement.....	211
2.1. Bobines actuelles.....	213
2.2. Remarques.....	216

## Deuxième partie – Du montage à l'assemblage

### Chapitre 10 – Liaisons à établir ou à rompre.....

1. Éléments constitutifs de la matière.....	221
---------------------------------------------	-----

2. Liaisons interatomiques.....	222
2.1. Liaison hétéropolaire ou d'électrovalence .....	223
2.2. Liaison homopolaire ou de covalence.....	224
2.3. Liaison par pont hydrogène.....	225
2.4. Liaison électrostatique de Van der Waals.....	228
2.5. Liaison métallique.....	228
3. État solide.....	228
<b>Chapitre 11 – Éléments de métallurgie.....</b>	<b>231</b>
1. Métaux et alliages.....	231
1.1. État solide – État liquide .....	231
1.2. Défauts dans les cristaux métalliques .....	233
1.3. Diffusion .....	234
2. Formation des alliages métalliques .....	234
2.1. Dissolution d'un métal dans un autre à l'état liquide.....	234
Composition .....	234
Constitution .....	235
Structure .....	235
2.2. Diagrammes d'équilibre entre phases .....	235
2.3. Constitution des alliages .....	236
2.4. Solutions solides.....	236
2.5. Composés définis .....	237
Composés définis analogues aux composés ioniques .....	237
Composés définis analogues aux composés électroniques (à nuages d'électrons) .....	237
Phases de lave (ou de type AB <sub>2</sub> ) .....	237
2.6. Composés interstitiels .....	237
3. Alliages en solution solide sur toute l'étendue des concentrations.....	237
4. Alliages avec limites de solubilité.....	239
4.1. Diagramme de solubilités réciproques.....	240
Refroidissement à partir d'une solution non saturée à forte concentration de M <sub>2</sub> .....	241
Refroidissement d'une solution non saturée à faible concentration de M <sub>2</sub> .....	242
Refroidissement de la solution non saturée avec passage par le stade de la surfusion .....	243
4.2. Tracé du diagramme de phases des alliages de M <sub>1</sub> et M <sub>2</sub> et analyse thermique.....	244
Courbes de refroidissement .....	246
Durée de cristallisation eutectique .....	247
4.3. Lecture d'un diagramme d'alliage à eutectique et solutions solides extrêmes .....	248
Cas des alliages métalliques dont les deux constituants en solution se combinent. ....	249
4.4. Réaction péritectique.....	252
4.5. Observation importante.....	252
5. Structures des métaux et alliages – Propriétés mécaniques .....	253
5.1. Structure granulaire.....	253

5.2. Indications sur l'évolution d'un alliage polycristallin sous l'effet d'une contrainte.....	253
-------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

## **Chapitre 12 – Alliages de brasure tendre à base d'étain** ..... 255

1. Diagramme des alliages étain-plomb .....	255
2. Refroidissement rapide.....	259
2.1. Alliages tendres .....	259
3. Rôle des métaux des pièces de part et d'autre du joint de brasure.....	261
4. Rôle du procédé de brasage quant aux propriétés du joint brasé .....	263
5. Conclusions pratiques .....	266

## **Chapitre 13 – Critères de qualité des liaisons par voie métallurgique en électronique**..... 271

1. Impédances électriques et thermiques.....	272
2. Résistance électrique et géométrie d'un joint brasé .....	275
3. Liaison élastique.....	275
4. Stabilité des alliages constituant la liaison métallurgique.....	278
5. Critères sous-entendus au niveau des procédés métallurgiques.....	281
6. Propriétés mécaniques des matériaux. Quelques définitions .....	281
6.1. Dureté .....	281
6.2. Solidité .....	283
6.3. Fragilité .....	283
Ductilité .....	283
6.4. Solidité et défauts.....	283

## **Chapitre 14 – Établissement de liaisons métallurgiques par soudage, brasage, « reflow »**..... 285

1. Soudage .....	285
2. Brasage .....	288
3. Assemblages par brasage sur les câblages imprimés .....	290
4. Assemblage par « reflow ».....	292
5. Remarques et commentaires.....	296
5.1. Brasage à l'indium-plomb sur l'or .....	297
5.2. Brasage à l'indium-plomb sur le cuivre .....	299
5.3. Résistance à la fatigue .....	300
5.4. Résistance à la corrosion des alliages d'indium.....	301
5.5. Apparence des joints brasés .....	301
Débrasage .....	302
Contamination des brasures .....	302
Durée d'une opération de brasage .....	303
6. Pratique du brasage avec une encre à braser à l'indium-plomb.....	303
6.1. Plots de brasage.....	303
6.2. Broches des dispositifs.....	304
6.3. Encre à braser à base d'indium-plomb.....	305
6.4. Montage et assemblage .....	306

<b>Chapitre 15 – Phénomènes fondamentaux à l’interface de brasage..</b>	<b>309</b>
1. Du bon étalement d’une brasure fondue sur une pièce métallique... condition pour un contact intime.....	309
1.1. Étalement ou mouillage ?.....	309
1.2. Un contact intime.....	309
1.3. Pseudo-mouillage.....	310
1.4. Pseudo-mouillage et capillarité.....	311
1.5. Notions de capillarité.....	311
2. Diffusion et dissolution à partir de l’interface dans la pièce métallique et la brasure fondue.....	313
Sous 183 °C.....	314
Entre 183 °C et 227 °C.....	314
À 227 °C + $\Delta T$ .....	315
 <b>Chapitre 16 – Les flux de brasage.....</b>	 <b>317</b>
1. Généralités.....	317
1.1. Colophane.....	317
1.2. Rôle d’un flux à base de colophane.....	318
1.3. Activation des flux à la colophane.....	318
1.4. Solubilité des flux.....	318
1.5. Flux solubles dans l’eau.....	318
1.6. Encre à braser pour « <i>fine pitch</i> » (pas très petits).....	319
1.7. Flux ne nécessitant pas de lavage après brasage.....	319
1.8. Flux des encres à braser.....	319
2. Terpènes et colophane.....	320
2.1. Classification et nomenclature des carbures terpéniques.....	321
2.2. Essence de térébenthine. Pinènes $\alpha$ et $\beta$ .....	322
2.3. Polyterpènes – Colophane.....	323
Sesquiterpènes.....	323
Polyterpènes – Résines.....	323
3. Acide glutamique.....	324
3.1. Définition et classification.....	324
3.2. Produits de dédoublement des protéines.....	325
4. Acide formique.....	327
4.1. Action réductrice.....	328
4.2. Formiates.....	328
4.3. Utilisation de l’acide formique.....	329
5. Brasage sans flux.....	329
 <b>Chapitre 17 – Protection des surfaces contre la corrosion.....</b>	 <b>331</b>
1. Dépôts métalliques et d’alliage.....	331
1.1. Oxydabilité du cuivre.....	331
1.2. Protection par l’or.....	332
1.3. Protection par dépôts d’alliages d’étain.....	333

1.4. Protection par « étamage » au bain .....	334
2. Dépôt d'inhibiteur de corrosion .....	334
2.1. Zéro défaut, dans le montage et l'assemblage automatisés.....	335
2.2. La propreté du cuivre .....	336
2.3. Le nettoyage du cuivre .....	337
2.4. Conserver la propreté d'une surface .....	337
2.5. L'inhibition contre la corrosion des métaux « électroniques » .....	337
2.6. Les inhibiteurs sont sélectifs .....	339
2.7. Processus d'inhibition des surfaces.....	339
2.8. Remarque .....	340

## Chapitre 18 – Différents modes de transfert thermique..... 343

1. Conduction .....	343
1.1. Définition .....	343
1.2. Quelques exemples.....	346
Transfert de l'énergie thermique émise à partir de la jonction d'une diode au silicium .....	346
Comparaison du montage par insertion avec le montage en surface	347
Le séchage d'une encre à braser .....	349
2. Convection .....	351
2.1. Définitions.....	351
2.2. Quelques exemples.....	352
Chauffage par convection naturelle d'un local habité .....	352
Transfert thermique en étuve .....	352
2.3. Coefficient de transfert d'un fluide .....	353
3. Absorption d'un rayonnement.....	355
3.1. L'émission d'un rayonnement.....	355
3.2. Absorption, réflexion et transparence .....	355
3.3. La théorie quantique du rayonnement.....	356
3.4. Exemples de transfert thermique par rayonnement.....	357
Le préchauffage des circuits imprimés à leur entrée sur les machines de brasage à la vague .....	357
Sérigraphie d'encre à braser, montage en surface et brasage sous rayonnement infrarouge .....	359
Remarques .....	359
4. Changement d'état – Condensation d'une vapeur.....	360

## Chapitre 19 – Techniques nouvelles de transfert d'énergie thermique pour le brasage et la polymérisation ..... 363

1. Nouveaux objectifs du brasage .....	363
2. Différentes phases d'un traitement de brasage.....	364
3. Rôle des substrats et des éléments reportés en surface .....	366
3.1. Contraintes venant des substrats .....	366
3.2. Contraintes venant des éléments reportés .....	366

4. Évaluation des techniques de brasage .....	367
5. Équipements de transfert d'énergie par absorption de rayonnements infrarouge	367
6. Systèmes à changement d'état par condensation de vapeur.....	371
7. Équipements de transfert d'énergie par absorption d'un rayonnement laser .....	373
8. Quelques études de cas.....	374
8.1. Premier cas .....	375
8.2. Deuxième cas .....	375
8.3. Troisième cas .....	375
9. Nouvelles techniques de transfert thermique appliquées à la polymérisation ...	376

## **Chapitre 20 – Le brasage à la vague.....** 379

1. Brasage avec de la brasure fondue .....	380
2. Équipement de brasage à une vague .....	380
3. Aspect des joints brasés.....	381
4. Difficultés rencontrées avec les circuits protégés par « flux ».....	382
5. Difficultés rencontrées avec des circuits pré-étamés .....	385
6. Difficultés rencontrées avec les circuits protégés par de l'or.....	388
7. Brasage à la vague des composants, dispositifs et circuits intégrés montés en surface.....	388
8. Équipements à la vague adaptés au brasage des éléments montés en surface ...	391

## **Chapitre 21 – Brasage en surface par les techniques nouvelles.....** 393

1. Microbilles d'alliage .....	394
1.1. Au niveau de l'encre à braser :.....	394
1.2. Au niveau du substrat et des pavés R et C .....	394
1.3. Au niveau du traitement thermique de brasage.....	395
2. Effet Manhattan.....	395
3. Répercussions des défauts de brasage sur la « qualité électronique » des joints brasés.....	396

## **Chapitre 22 – Inspection et contrôle des joints brasés.....** 399

1. Préambule.....	399
2. Inspection visuelle des joints brasés.....	400
3. Inspection des joints brasés miniaturisés et cachés.....	400
3.1. Radiographie X .....	400
3.2. Observation de coupes métallographiques.....	401
3.3. Observation en infrarouge de la carte des impédances thermiques de l'assemblage après injection d'une impulsion thermique .....	401
3.4. Par extension du cas précédent, le contrôle du brasage au laser, par stimulation thermique préalable.....	401
3.5. Échographie par ultrasons .....	402
3.6. Méthode des plasmas .....	402

## Troisième partie – Nettoyage des circuits

Introduction.....	405
<b>Chapitre 23 – Le remplacement des chlorofluoroalcanes (CFC) .....</b>	<b>407</b>
1. CFC, dérivés chlorés et fluorés des alcanes .....	407
2. Applications des CFC .....	408
3. Les CFC, utilisés depuis 1930.....	408
4. L'ozone .....	409
5. La concertation mondiale.....	410
6. Grands groupes chimiques dans ce contexte.....	410
<b>Chapitre 24 – Pouvoir solvant de l'eau et des liquides organiques...</b>	<b>413</b>
1. Eau.....	413
1.1. Molécules d'eau .....	413
1.2. Liaisons interatomiques dans l'eau .....	414
1.3. Propriétés physiques exceptionnelles de l'eau .....	416
1.4. L'eau est un solvant ionique .....	416
1.5. Dissolution des molécules organiques par l'eau .....	417
1.6. Rôle des détergents dans l'eau .....	418
1.7. Pouvoir solvant.....	418
2. Solvants anhydres organiques .....	419
2.1. Les solvants non polaires .....	420
2.2. Solvants polaires .....	420
<b>Chapitre 25 – Tension superficielle pouvoir mouillant pouvoir pénétrant.....</b>	<b>423</b>
1. Pouvoir mouillant.....	423
1.1. Forces Van Der Waals .....	424
1.2. Interactions polaires ou acide-base de Lewis (AB).....	424
1.3. Interactions électrostatiques (EL) .....	424
1.4. Mouvement brownien (BR) .....	424
1.5. Énergie de cohésion et tension superficielle .....	425
1.6. Équation de Young-Dupré actualisée.....	425
1.7. Forces polaires d'attraction et de répulsion .....	426
1.8. Tension superficielle des solides.....	426
1.9. Quelques résultats d'expérience.....	427
2. Pouvoir pénétrant .....	428
3. Efficacité d'un agent de nettoyage liquide.....	433
3.1. Agents de nettoyage sans CFC.....	434

<b>Chapitre 26 – Nuisances à la propreté des surfaces des câblages imprimés avant, pendant, après brasage</b> .....	435
1. Contaminations de surface et leurs origines.....	436
1.1. Débris.....	436
1.2. Oxydation.....	436
1.3. Graisses.....	436
1.4. Empreintes de doigts.....	436
1.5. Ions alcalins et halogènes.....	436
1.6. Dépôts en surface réalisés volontairement ou non durant le procédé.....	437
2. Élimination des contaminations de surface.....	437
2.1. Élimination des débris.....	437
2.2. Élimination des oxydes et sels de cuivre.....	437
2.3. Élimination des graisses.....	438
2.4. Élimination des empreintes de doigts.....	438
2.5. Élimination des ions alcalins.....	439
2.6. Élimination des « flux » de brasage.....	439
2.7. Élimination des photopolymères (resists et masques).....	440

<b>Chapitre 27 – Voies et procédés du nettoyage final des circuits imprimés</b> .....	441
1. Trois voies du nettoyage.....	442
2. Procédés et équipements.....	445
2.1. Équipements classiques de lavage à l'eau.....	445
2.2. Lavage sous jets.....	447
2.3. Lavage sous ultrasons.....	448
2.4. Rinçage.....	449
3. Contrôle de propreté.....	450
4. Avenir du nettoyage ?.....	451

## Quatrième partie – Des contrôles

Introduction.....	455
<b>Chapitre 28 – Contrôle du procédé de production</b>	
Contrôle de l'instrument de production.....	
Contrôle sur les produits finis.....	457
1. Un procédé de production soumis à des procédures et des contrôles.....	457
2. La recherche des défaillances.....	458
<b>Chapitre 29 – De la fiabilité des circuits</b> .....	459

<b>Chapitre 30 – Contrôles électroniques – Recherche des défaillances</b>	461
1. Taux de défauts et nœuds de potentiels.....	461
2. Accès aux nœuds de potentiel.....	462
2.1. Accès à la totalité des nœuds .....	462
2.2. Accès à un nombre limité de nœuds de potentiels .....	463
2.3. Il n’y a pas d’accès aux nœuds de potentiels .....	463
3. <i>In situ</i> ou fonctionnel ?.....	463
4. Localiser les fautes.....	463
5. Contrôle des produits .....	464
5.1. Détection des défauts .....	464
5.2. De la détection à la localisation des fautes.....	464
5.3. Efficacité du contrôle .....	464
5.4. Évolution de la complexité des circuits .....	465
6. Divers types de défauts .....	465
7. Analyse logique et « <i>boundary scan</i> » .....	466

<b>Chapitre 31 – Commande numérique du procédé à partir de l’analyse statistique des résultats du contrôle</b>	467
1. Commande numérique du procédé.....	467
2. Langage de la commande numérique.....	468
2.1. Critères de « qualité » .....	468
2.2. Paramètres variables.....	468
2.3. Rendement en terme relatif .....	468
2.4. Relation de cause à effet .....	468
2.5. Performances d’un procédé.....	471
3. Méthodes de contrôle du procédé.....	471

## Conclusion

1. Maîtrise et gestion de la qualité dans le procédé de fabrication.....	476
2. Gestion globale de la qualité .....	476
Glossaire .....	481
Bibliographie .....	483