

THESE

présentée à

UNIVERSITE SCIENTIFIQUE ET MEDICALE DE GRENOBLE

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

par

pour obtenir le grade de

Docteur de troisième cycle

Spécialité : INFORMATIQUE

Ion FLORICICA

**Algorithmes d'implantation
et tracé des connexions par fils isolés**

Thèse soutenue le 28 juin 1974 devant la Commission d'Examen :

Président : Monsieur J. KUNTZMANN

Madame G. SAUCIER

Examineurs Monsieur D. RANDET

Monsieur M. CHEIN

Président : Monsieur Michel SOUTIF

Vice-Président : Monsieur Gabriel CAU

PROFESSEURS TITULAIRES

MM.	ANGLES D'AURIAC Paul	Mécanique des fluides
	ARNAUD Georges	Clinique des maladies infectieuses
	ARNAUD Paul	Chimie
	AUBERT Guy	Physique
	AYANT Yves	Physique approfondie
Mme	BARBIER Marie-Jeanne	Electrochimie
MM.	BARBIER Jean-Claude	Physique expérimentale
	BARBIER Reynold	Géologie appliquée
	BARJON Robert	Physique nucléaire
	BARNOUD Fernand	Biosynthèse de la cellulose
	BARRA Jean-René	Statistiques
	BARRIE Joseph	Clinique chirurgicale
	BENOIT Jean	Radioélectricité
	BERNARD Alain	Mathématiques Pures
	BESSON Jean	Electrochimie
	BEZES Henri	Chirurgie générale
	BLAMBERT Maurice	Mathématiques Pures
	BOLLIET Louis	Informatique (IUT B)
	BONNET Georges	Electrotechnique
	BONNET Jean-Louis	Clinique ophtalmologique
	BONNET-EYMARD Joseph	Pathologie médicale
	BONNIER Etienne	Electrochimie Electrometallurgie
	BOUCHERLE André	Chimie et Toxicologie
	BOUCHEZ Robert	Physique nucléaire
	BOUSSARD Jean-Claude	Mathématiques Appliquées
	BRAVARD Yves	Géographie
	BRISSONNEAU Pierre	Physique du solide
	BUYLE-BODIN Maurice	Electronique
	CABANAC Jean	Pathologie chirurgicale
	CABANEL Jean	Clinique rhumatologique et hydrologie
	CALAS François	Anatomie
	CARRAZ Gilbert	Biologie animale et pharmacodynamie
	CAU Gabriel	Médecine légale et Toxicologie
	CAUQUIS Georges	Chimie organique
	CHABAUTY Claude	Mathématiques Pures
	CHARACHON Robert	Oto-Rhino-Laryngologie
	CHATEAU Robert	Thérapeutique
	CHENE Marcel	Chimie papetière
	COEUR André	Pharmacie chimique
	CONTAMIN Robert	Clinique gynécologique
	COUDERC Pierre	Anatomie Pathologique
	CRAYA Antoine	Mécanique

Mme	DEBELMAS Anne-Marie	Matière médicale
MM.	DEBELMAS Jacques	Géologie générale
	DEGRANGE Charles	Zoologie
	DESRE Pierre	Métallurgie
	DESSAUX Georges	Physiologie animale
	DODU Jacques	Mécanique appliquée
	DOLIQUE Jean-Michel	Physique des plasmas
	DREYFUS Bernard	Thermodynamique
	DUCROS Pierre	Cristallographie
	DUGOIS Pierre	Clinique de Dermatologie et Syphiligraphie
	FAU René	Clinique neuro-psychiatrique
	FELICI Noël	Electrostatique
	GAGNAIRE Didier	Chimie physique
	GALLISSOT François	Mathématiques Pures
	GALVANI Octave	Mathématiques Pures
	GASTINEL Noël	Analyse numérique
	GEINDRE Michel	Electroradiologie
	GERBER Robert	Mathématiques Pures
	GIRAUD Pierre	Géologie
	KLEIN Joseph	Mathématiques Pures
Mme	KOFLER Lucie	Botanique et Physiologie végétale
MM.	KOSZUL Jean-Louis	Mathématiques Pures
	KRAVTCHENKO Julien	Mécanique
	KUNTZMANN Jean	Mathématiques appliquées
	LACAZE Albert	Thermodynamique
	LACHARME Jean	Biologie végétale
	LAJZEROWICZ Joseph	Physique
	LATREILLE René	Chirurgie générale
	LATURAZE Jean	Biochimie pharmaceutique
	LAURENT Pierre-Jean	Mathématiques appliquées
	LEDRU Jean	Clinique médicale B
	LLIBOUTRY Louis	Géophysique
	LOUP Jean	Géographie
Mlle	LUTZ Elisabeth	Mathématiques Pures
MM.	MALGRANGE Bernard	Mathématiques Pures
	MALINAS Yves	Clinique obstétricale
	MARTIN-NOEL Pierre	Sémiologie médicale
	MASSEPORT Jean	Géographie
	MAZARE Yves	Clinique médicale A
	MICHEL Robert	Minéralogie et Pétrographie
	MOURIQUAND Claude	Histologie
	MOUSSA André	Chimie nucléaire
	NEEL Louis	Physique du solide
	OZENDA Paul	Botanique
	PAUTHENET René	Electrotechnique
	PAYAN Jean-Jacques	Mathématiques Pures
	PEBAY-PEYROULA Jean-Claude	Physique
	PERRET René	Servomécanismes
	PILLET Emile	Physique industrielle
	RASSAT André	Chimie systématique
	RENARD Michel	Thermodynamique
	REULOS René	Physique industrielle
	RINALDI Renaud	Physique
	ROGET Jean	Clinique de pédiatrie et de puériculture
	SANTON Lucien	Mécanique
	SEIGNEURIN Raymond	Microbiologie et Hygiène
	SENGEL Philippe	Zoologie
	SILBERT Robert	Mécanique des fluides
	SOUTIF Michel	Physique générale

MM.	TANCHE Maurice	Physiologie
	TRAYNARD Philippe	Chimie générale
	VAILLAND François	Zoologie
	VALENTIN Jacques	Physique nucléaire
	VAUQUOIS Bernard	Calcul électronique
Mme	VERAIN Alice	Pharmacie galénique
M.	VERAIN André	Physique
Mme	VEYRET Germaine	Géographie
MM.	VEYRET Paul	Géographie
	VIGNAIS Pierre	Biochimie médicale
	YOCCOZ Jean	Physique nucléaire théorique

PROFESSEURS ASSOCIES

MM.	BULLEMER Bernhard	Physique
	HANO JUN-ICHI	Mathématiques Pures
	STEPHENS Michaël	Mathématiques appliquées

PROFESSEURS SANS CHAIRE

MM.	BEAUDOING André	Pédiatrie
Mme	BERTRANDIAS Françoise	Mathématiques Pures
MM.	BERTRANDIAS Jean-Paul	Mathématiques appliquées
	BIAREZ Jean-Pierre	Mécanique
	BONNETAIN Lucien	Chimie minérale
Mme	BONNIER Jane	Chimie générale
MM.	CARLIER Georges	Biologie végétale
	COHEN Joseph	Electrotechnique
	COUMES André	Radioélectricité
	DEPASSEL Roger	Mécanique des fluides
	DEPORTES Charles	Chimie minérale
	GAUTHIER Yves	Sciences biologiques
	GAVEND Michel	Pharmacologie
	GERMAIN Jean-Pierre	Mécanique
	GIDON Paul	Géologie et Minéralogie
	GLENAT René	Chimie organique
	HACQUES Gérard	Calcul numérique
	JANIN Bernard	Géographie
Mme	KAHANE Josette	Physique
MM.	MULLER Jean-Michel	Thérapeutique
	PERRIAUX Jean-Jacques	Géologie et Minéralogie
	POULOUJADOFF Michel	Electrotechnique
	REBECQ Jacques	Biologie (CUS)
	REVOL Michel	Urologie
	REYMOND Jean-Charles	Chirurgie générale
	ROBERT André	Chimie papetière
	DE ROUGEMONT Jacques	Neurochirurgie
	SARRAZIN Roger	Anatomie et chirurgie
	SARROT-REYNAULD Jean	Géologie
	SIBILLE Robert	Construction mécanique
	SIROT Louis	Chirurgie générale
Mme	SOUTIF Jeanne	Physique générale

MAITRES DE CONFERENCES ET MAITRES DE CONFERENCES AGREGES

Mle	AGNIUS-DELORD Claudine	Physique pharmaceutique
	ALARY Josette	Chimie analytique
MM.	AMBLARD Pierre	Dermatologie
	AMBROISE-THOMAS Pierre	Parasitologie
	ARMAND Yves	Chimie
	BEGUIN Claude	Chimie organique
	BELORIZKY Elie	Physique
	BENZAKEN Claude	Mathématiques appliquées
	BILLET Jean	Géographie
	BLIMAN Samuel	Electronique (EIE)
	BLOCH Daniel	Electrotechnique
Mme	BOUCHE Liane	Mathématiques (CUS)
MM.	BOUCHET Yves	Anatomie
	BOUVARD Maurice	Mécanique des fluides
	BRODEAU François	Mathématiques (IUT B)
	BRUGEL Lucien	Energétique
	BUISSON Roger	Physique
	BUTEL Jean	Orthopédie
	CHAMBAZ Edmond	Biochimie médicale
	CHAMPETIER Jean	Anatomie et organogénèse
	CHIAVERINA Jean	Biologie appliquée (EFP)
	CHIBON Pierre	Biologie animale
	COHEN-ADDAD Jean-Pierre	Spectrométrie physique
	COLOMB Maurice	Biochimie médicale
	CONTE René	Physique
	COULOMB Max	Radiologie
	CROUZET Guy	Radiologie
	DURAND Francis	Métallurgie
	DUSSAUD René	Mathématiques (CUS)
Mme	ETERRADOSSI Jacqueline	Physiologie
MM.	FAURE Jacques	Médecine légale
	GENSAC Pierre	Botanique
	GIDON Maurice	Géologie
	GRIFFITHS Michaël	Mathématiques appliquées
	GROULADE Joseph	Biochimie médicale
	HOLLARD Daniel	Hématologie
	HUGONOT Robert	Hygiène et Médecine préventive
	IDELMAN Simon	Physiologie animale
	IVANES Marcel	Electricité
	JALBERT Pierre	Histologie
	JOLY Jean-René	Mathématiques Pures
	JOUBERT Jean-Claude	Physique du solide
	JULLIEN Pierre	Mathématiques Pures
	KAHANE André	Physique générale
	KUHN Gérard	Physique
	LACOUME Jean-Louis	Physique
Mme	LAJZEROWICZ Jeannine	Physique
MM.	LANCIA Roland	Physique atomique
	LE JUNTER Noël	Electronique
	LEROY Philippe	Mathématiques
	LOISEAUX Jean-Marie	Physique nucléaire
	LONGEQUEUE Jean-Pierre	Physique nucléaire
	LUU DUC Cuong	Chimie organique
	MACHE Régis	Physiologie végétale
	MAGNIN Robert	Hygiène et Médecine préventive
	MARECHAL Jean	Mécanique
	MARTIN-BOUYER Michel	Chimie (CUS)

MM.	MAYNARD Roger	Physique du solide
	MICHOULIER Jean	Physique (IUT A)
	MICOUD Max	Maladies infectieuses
	MOREAU René	Hydraulique (INP)
	NEGRE Robert	Mécanique
	PARAMELLE Bernard	Pneumologie
	PECCOUD François	Analyse (IUT B)
	PEFFEN René	Métallurgie
	PELMONT Jean	Physiologie animale
	PERRET Jean	Neurologie
	PERRIN Louis	Pathologie expérimentale
	PFISTER Jean-Claude	Physique du solide
	PHELIP Xavier	Rhumatologie
Mlle	RIERY Yvette	Biologie animale
MM.	RACHAIL Michel	Médecine interne
	RACINET Claude	Gynécologie et obstétrique
	RENAUD Maurice	Chimie
	RICHARD Lucien	Botanique
Mme	RINAUDO Marquerite	Chimie macromoléculaire
MM.	ROMIER Guy	Mathématiques (IUT B)
	SHOM Jean-Claude	Chimie générale
	STIEGLITZ Paul	Anesthésiologie
	STOEBNER Pierre	Anatomie pathologique
	VAN CUTSEM Bernard	Mathématiques appliquées
	VEILLON Gérard	Mathématiques appliquées (INP)
	VIALON Pierre	Géologie
	VOOG Robert	Médecine interne
	VROUSSOS Constantin	Radiologie
	ZADWORNY François	Electronique

MAITRES DE CONFERENCES ASSOCIES

MM.	BOUDOURIS Georges	Radioélectricité
	CHEEKE John	Thermodynamique
	GOLDSCHMIDT Hubert	Mathématiques
	SIDNEY STUARD	Mathématiques Pures
	YACOUD Mahmoud	Médecine légale

CHARGES DE FONCTIONS DE MAITRES DE CONFERENCES

Mme	BERIEL Hélène	Physiologie
Mme	RENAUDET Jacqueline	Microbiologie

Fait le 30 mai 1972.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Monsieur le Professeur J. KUNTZMANN pour l'attention qu'il a portée à ce travail et pour m'avoir fait l'honneur de présider le Jury.

Je remercie vivement

- Madame G. SAUCIER, Maître de Conférences à l'ENSIMAG, qui a dirigé ce travail et dont l'aide m'a permis de le mener à bien.

- Monsieur D. RANDET, Directeur du LETI/EPA, qui fut à l'origine de cette thèse et m'a assuré l'environnement nécessaire pour la mener à bien.

- Monsieur M. CHEIN, Maître de Conférences à l'Université de Paris VI, qui a bien voulu faire partie du Jury.

Je remercie sincèrement Mlle C. TURCAT, dont la coopération et les remarques m'ont été très utiles, ainsi que MM. D. MAUDUIT, G. NICOLAS avec lesquels j'ai eu de nombreuses et fructueuses discussions.

Je tiens aussi à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation matérielle de cet ouvrage.

I N T R O D U C T I O N

Dans la conception des calculateurs électroniques, l'optimisation des circuits devient un problème de plus en plus important, au fur et à mesure de l'évolution des composants en nombre et complexité.

Les procédures d'optimisation rentrent dans un processus d'étude automatique, apparu dès le développement des calculateurs, dont les principaux niveaux sont :

- 1) - passage du schéma électrique au circuit intégré
- 2) - réalisation de la plaquette à l'aide de circuits intégrés et (ou) de composants discrets
- 3) - assemblage des plaquettes sur des bâtis.

Notre travail a pour objet le deuxième niveau, c'est-à-dire l'élaboration de procédures pour :

- a) - l'implantation de modules de circuits intégrés sur la plaquette
- b) - le tracé des connexions.

Les méthodes appliquées, ainsi que les buts suivis dans le cadre des deux étapes a) et b) sont fortement influencés par l'évolution technologique de fabrication des plaquettes.

La matérialisation des connexions par circuits imprimé, procédé utilisé actuellement, interdit les croisements des liaisons sur une même couche, ce qui soulève des problèmes complémentaires tels que : la minimisation du nombre des couches, la répartition des liaisons entre les couches, la définition du tracé des connexions sur chaque couche, problèmes qui sont rendus encore plus complexes dans le cas d'une grande densité de composants.

La technique du tracé des connexions par fils isolés, améliorée et reprise par de nouvelles machines à tracer, ouvre de nouvelles perspectives à la construction des plaquettes.

Du point de vue de matériel, par l'utilisation d'un fil très fin (jusqu'à 30 microns de diamètre) et par l'implantation directe des "puces" de circuits intégrés, en éliminant le "boîtier" englobant, on arrive à de hautes densités d'implantation ou à des plaquettes réduites comme dimensions.

D'autre part, l'étude de réalisation des connexions se trouve simplifiée : les croisements étant possibles, les problèmes complémentaires précédents disparaissent. Le tracé dépend étroitement de l'implantation des modules sur la plaquette et la plupart des contraintes imposées à la réalisation de la plaquette sont résolues par l'algorithme d'implantation. L'implantation acquiert donc une importance particulière.

Les algorithmes d'implantation que nous donnons gardent un caractère général, tandis que le tracé des connexions est spécifique à la technique des fils isolés ; un programme efficace pour plusieurs formes de technologies, comporterait un nombre de paramètres optionnels élevé et pratiquement il serait inexploitable.

Le travail présenté est divisé en deux parties :

- La première partie traite le problème d'implantation de modules. Nous cherchons à placer les modules sur la plaquette, tels que la longueur totale de leurs liaisons soit plus courte possible.

Dans le chapitre I, nous réduisons le problème d'implantation à un problème d'affectation quadratique, en considérant le graphe complet de chaque équipotentielle. Le problème ainsi associé est résolu par une méthode heuristique en deux étapes :

- . on construit d'abord une implantation initiale
- . on améliore cette implantation, par un algorithme de "changement de paires".

Dans le chapitre II, la méthode d'implantation précédente est étendue, pas l'utilisation des sous-réseaux minimaux, à des plaquettes de grande taille (~ 100 modules ou plus). L'ensemble de tous les modules est partagé en plusieurs sous-ensembles, les liaisons étant peu nombreuses entre les sous-ensembles, mais nombreuses à l'intérieur de chaque sous-ensemble. L'algorithme d'implantation initiale et d'amélioration de l'implantation initiale est appliqué pour chaque sous-réseau ainsi trouvé.

- La deuxième partie est consacrée au tracé des connexions.

Dans le chapitre I, nous cherchons l'arbre minimal de l'équipotentielle, qui en fait sera une chaîne à cause de la contrainte technologique imposée sur les sommets de l'arbre (degré ≤ 2). Le problème revient à la recherche des circuits hamiltoniens minimaux et sera résolu par la méthode combinatoire "branch-and-bound" de Little et ... [20].

Après avoir trouvé les équipotentielles minimales, nous cherchons, dans le chapitre II, à minimiser le nombre total de coudes des liaisons du réseau, par rotation du module dans son emplacement. On appliquera un algorithme à solution optimale, adapté de la méthode combinatoire "branch-and-bound" et une méthode heuristique.

Pour les 2 algorithmes, nous élaborons aussi une procédure simple et rapide qui donnera une bonne configuration initiale en simulant les liaisons par des "moments de rotation".

Dans le chapitre III, nous abordons le problème du tracé proprement dit, en définissant le chemin de chaque connexion. Nous cherchons à éviter les croisements, bien qu'ils soient possibles, et respecter les contraintes imposées pour la réalisation des connexions : éviter les virages interdits, etc. La réalisation effective des connexions étant faite par un fil continu, il faut inclure les connexions dans une chaîne hamiltonienne à liaisons supplémentaires plus courtes que possibles.

BIBLIOTHEQUE DU CERIST

TABLE DES MATIERES

PARTIE A

IMPLANTATION DE MODULES DE CIRCUITS INTEGRES

<u>CHAPITRE I</u> - IMPLANTATION EN MINIMISANT LA LONGUEUR TOTALE DES LIAISONS ...	3.
I.0. - Introduction	3.
I.1. - Notations et définitions	4.
I.2. - Rappel de certaines méthodes	7.
I.3. - Conclusion	9.
I.4. - Algorithmes d'implantation	10.
I.4.0. - Définitions et notations	10.
I.4.1. - Détermination d'une implantation initiale	11.
I.4.1.1. - Description de l'algorithme	11.
I.4.1.2. - Algorithme	12.
I.4.2. - Amélioration de l'implantation initiale	14.
I.4.2.1. - Principes de calcul	15.
I.4.2.2. - Algorithme	17.
I.4.2.3. - Estimation du nombre de calculs	18.
I.4.2.4. - Exemple	19.
<u>CHAPITRE II</u> - IMPLANTATION DE MODULES PAR SOUS-RESEAUX MINIMAUX	22.
II.1. - Définitions et propriétés	23.
II.2. - Etapes du déroulement de l'algorithme	24.
II.3. - Algorithme	26.

PARTIE B

TRACE DES CONNEXIONS

<u>CHAPITRE I</u> - RECHERCHE DES EQUIPOTENTIELLES MINIMALES	31.
I.1. - Formulation du problème.....	31.
I.2. - Méthodes de résolution	32.
I.3. - Répartition uniforme des liaisons sur la plaquette	33.
I.4. - Equipotentiels minimaux et répartition uniforme des liaisons	34.
<u>CHAPITRE II</u> - MINIMISATION DU NOMBRE DE COUDES D'UN RESEAU DE MODULES DE CIRCUITS INTEGRES.....	36.
II.0. - Présentation du problème	36.
II.1. - Définitions et tableaux des nombres minimum de coudes	38.
II.2. - Algorithme à solution optimale pour minimiser le nombre de coudes dans un réseau.....	41.
II.2.1. - Généralités et définitions	41.
II.2.2. - Description de l'algorithme et simplifications de calcul.....	45.
II.2.3. - Algorithme.....	46.

II.3. - Construction d'une configuration initiale	50.
II.3.1. - Définitions et propriétés	50.
II.3.2. - Algorithme et estimation du nombre moyen de calculs	53.
II.4. - Algorithme heuristique pour minimiser le nombre de coudes dans un réseau	56.
II.4.1. - Préliminaires	57.
II.4.2. - Notations, définitions et propriétés	60.
II.4.3. - Algorithme, exemple	70.
II.4.4. - Calcul de α , γ , δ	72.
II.4.5. - Estimation du nombre de calculs	74.

CHAPITRE III - REALISATION DES EQUIPOTENTIELLES

III.1. - Critique des algorithmes de tracé connus	75.
III.1.1. - Classification suivant le type de la plaquette ..	76.
III.1.2. - Classification suivant le principe du tracé d'une connexion	77.
III.1.3. - Algorithmes à discrétisation de la plaquette	79.
III.1.4. - Algorithmes utilisant des segments	81.
III.1.5. - Conclusion	81.
III.2. - Réalisation des connexions par fils isolés	82.
III.3. - Tracé des connexions	85.
III.3.0. - Justification du choix du tracé en horizontal et vertical	85.
III.3.1. - Génération de la plaquette et introduction des données	87.
III.3.2. - Elaboration des connexions	89.
III.3.2.1. - Contraintes du tracé	90.
III.3.2.2. - Virages interdits et croisements ...	91.
III.3.2.3. - Zones des canaux	93.
III.3.2.4. - Chemins équivalents	94.
III.3.3. - Tracé effectif des connexions	98.
III.3.3.1. - Recherche de chaines de connexions .	99.
III.3.3.2. - Liaisons supplémentaires et exemple.	100.
III.3.3.3. - Génération des commandes supplémentaires	102.

III.3.4. - Sortie des résultats	103.
<u>CONCLUSION GENERALE</u>	104.
<u>ANNEXE 1-</u>	105.
<u>ANNEXE 2-</u>	107.
<u>BIBLIOGRAPHIE -</u>	

oOo