

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CIRCUITS ANALOGIQUES INTÉGRÉS PROGRAMMABLES BASÉS SUR DES  
MATRICES DE TRANSCONDUCTANCES

ERIC LABEL

DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES  
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)

MARS 2006



Library and  
Archives Canada

Bibliothèque et  
Archives Canada

Published Heritage  
Branch

Direction du  
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

*Your file* *Votre référence*  
*ISBN: 978-0-494-17950-5*  
*Our file* *Notre référence*  
*ISBN: 978-0-494-17950-5*

#### NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

#### AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

---

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

  
**Canada**

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

CIRCUITS ANALOGIQUES INTÉGRÉS PROGRAMMABLES BASÉS SUR DES  
MATRICES DE TRANSCONDUCTANCES

Présenté par : LEBEL, Eric

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

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

M. Yvon Savaria, Ph.D., président

M. Mohamad Sawan, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. Yves Audet, Ph.D., membre du jury

## REMERCIEMENTS

Je souhaite d'abord remercier le professeur Mohamad Sawan pour m'avoir donné la chance de travailler sur ce projet dans d'excellentes conditions au sein de l'équipe Polystim. Mes remerciements s'adressent aussi au professeur Ali Assi de la «United Arab Emirates University» pour sa précieuse collaboration.

Mes collègues de Polystim m'ont permis d'évoluer dans un cadre de travail très agréable par leur support et leur camaraderie. La disponibilité des secrétaires et des techniciens du GRM a aussi été très appréciée.

Je remercie également mes parents et ma copine Martine pour leurs encouragements tout au long de mes études.

Enfin, je suis reconnaissant envers le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie (CRSNG) pour la bourse qui m'était accordée ainsi que la Société Canadienne de Microélectronique (CMC Microsystems) pour le soutien matériel et logiciel ayant rendu possible la réalisation de ce projet.

## RÉSUMÉ

Les circuits programmables permettent de mettre au point des systèmes électroniques flexibles et des prototypes rapidement. Dans le monde numérique, les FPGA (Field Programmable Gate Array) sont maintenant largement utilisés et permettent l'implémentation de circuits numériques complexes sans que l'utilisateur n'ait à se soucier des contraintes physiques des circuits intégrés. Du côté analogique, des circuits avec une telle polyvalence sont également recherchés et commencent à émerger sous la forme de FPAA (Field Programmable Analog Array). Ils constituent un champ de recherche actif et quelques modèles sont apparus sur le marché. Par contre, les performances notamment en bande passante sont pour le moment limitées.

Ce projet vise donc à réaliser des circuits analogiques programmables numériquement. Certains choix technologiques ont mené à l'utilisation de la technologie CMOS 0.18  $\mu\text{m}$  pour réaliser des circuits basés sur une matrice de cellules de transconductance ( $G_m$ ). La majeure partie du projet porte sur un filtre programmable biquadratique passe-bas et passe-bande dont la fréquence centrale et le facteur de qualité sont programmables. La technique de programmation repose sur l'activation sélective de  $G_m$  en parallèle ainsi que l'utilisation de capacités programmables. Ce circuit intégré a été fabriqué et testé.

Dans le même ordre d'idées, un amplificateur de courant a été conçu et simulé. Des  $G_m$  en parallèle sont branchés à une cellule de transrésistance. L'activation sélective des  $G_m$  permet dans ce cas de programmer le gain de l'amplificateur.

Les simulations de même que les résultats expérimentaux ont permis de démontrer que la technique de programmation innovatrice permet la programmation des paramètres des circuits (fréquence centrale, largeur de bande, gain) sur une large plage.

## ABSTRACT

Programmable circuits allow for rapid prototyping of flexible electronic systems. In the digital world, FPGAs (Field Programmable Gate Arrays) are now widely used to implement complex digital circuits without needing the user to care about the physics of integrated circuits. On the analog side, circuits with such versatility are also wanted and are starting to emerge as FPAAs (Field Programmable Analog Arrays). They represent an active research area and a few commercial devices have already entered the market. However, performances, especially bandwidth, are still limited at this time.

The goal of the project is to design analog circuits that are digitally programmable. Technological choices led us to design circuits based on a transconductors ( $G_m$ ) array using CMOS  $0.18\mu\text{m}$  technology. The cornerstone of this project is a programmable biquadratic low-pass and band-pass filter. The center frequency and the quality factor of the filter are programmable parameters. The programming technique consists essentially in selectively activating transconductors connected in parallel. Programmable capacitors are also used for finer tuning. This circuit was fabricated and extensively tested.

In a similar fashion, a current amplifier was also designed and simulated. With a transresistance connected to parallel transconductors selectively activated, it is possible to program the amplifier gain.

Simulations and experimental results have demonstrated that the innovative programming technique is working properly to control circuits parameters (frequency, bandwidth, gain) over a wide range.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	iv
RÉSUMÉ.....	v
ABSTRACT .....	vi
TABLE DES MATIÈRES .....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES FIGURES.....	xi
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES.....	xiii
LISTE DES ANNEXES.....	xv
Chapitre 1 Introduction .....	1
1.1 Organisation du mémoire.....	3
1.2 Capacités commutés versus temps continu .....	4
1.3 FPAA commerciaux.....	6
Chapitre 2 Aperçu des FPAA et des architectures de transconductances.....	8
2.1 Introduction.....	8
2.2 Architectures de circuits FPAA.....	8
2.3 Transconductance (Gm).....	13
2.3.1 Paire différentielle.....	15
2.3.2 Paires différentielles croisées.....	15
2.3.3 Gm à base d'un transistor en triode.....	16
2.3.4 Étage de sortie.....	17
2.4 Programmation de la transconductance.....	18
2.4.1 Source de courant programmable.....	18

2.4.2	Contrôle en tension .....	19
2.4.3	Gm multiples.....	20
2.5	Transrésistance.....	20
2.5.1	Rm grille commune.....	21
2.5.2	Rm à 2 transistors.....	23
2.5.3	Rm à étages multiples .....	24
2.6	Conclusion .....	25
Chapitre 3 Filtres Gm-C hautes fréquences programmables .....		26
3.1	Présentation de l'article .....	26
3.2	PROGRAMMABLE MONOLITHIC GM-C BAND-PASS FILTER: DESIGN AND EXPERIMENTAL RESULTS .....	27
3.2.1	Introduction.....	28
3.2.2	The band-pass filter architecture.....	29
3.2.3	The filter results .....	35
3.2.4	Conclusion .....	36
3.2.5	Acknowledgments.....	36
3.2.6	References.....	36
3.2.7	List of figures.....	38
3.2.8	List of tables.....	38
3.2.9	Figures.....	39
3.2.10	Tables.....	45
Chapitre 4 Tests et validation de filtres programmables .....		46
4.1	Traitement de signaux différentiels .....	46
4.2	Carte de test.....	47
4.4	Divergences entre les résultats expérimentaux et de simulation .....	50
Chapitre 5 Amplificateur de courant programmable .....		57



5.1	Introduction.....	57
5.2	Conception.....	57
5.3	Résultats.....	60
5.4	Conclusion.....	64
Chapitre 6 Discussion Générale, Conclusion et Recommandations.....		65
6.1	Discussion Générale.....	65
6.2	Conclusion et Recommandations.....	66
BIBLIOGRAPHIE.....		68

## LISTE DES TABLEAUX

Table 3.1 Results summary .....	45
Table 3.2 Results comparisons.....	45
Tableau 4.1 Résumé comparatif du filtre Gm-C proposé .....	56
Tableau 5.1 Résumé des performances de l'amplificateur .....	63

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Exemple de circuit à capacités commutées.....	5
Figure 1.2 Exemple de circuit en temps continu.....	5
Figure 2.1 Cellules de base du FPAA (Lee et Gulak, 1991).....	9
Figure 2.2 Réseau d'interconnexions avec des résistances programmables (Lee et Gulak, 1995).....	10
Figure 2.3 Transistor à grille flottante (Hall et al., 2005).....	11
Figure 2.4 Disposition en nid d'abeille (Becker et al., Mai 2004).....	12
Figure 2.5 Nombre de CAB limité (Lon-Kou et al, 2004) : a) schéma bloc b)CAB.....	13
Figure 2.6 Paire différentielle.....	15
Figure 2.7 Paires différentielles croisées.....	16
Figure 2.8 Gm à base d'un transistor en triode.....	17
Figure 2.9 Source de courant programmable.....	19
Figure 2.10 Topologie à grille commune.....	21
Figure 2.11 Rm grille commune et cascode.....	22
Figure 2.12 Deux transistors branchés en diode.....	23
Figure 2.13 Deux transistors avec contre-réaction.....	24
Figure 2.14 Rm à étages multiples.....	25
Figure 3.1 Proposed filter architecture.....	39
Figure 3.2 Programming logic building block.....	40
Figure 3.3 Transconductance circuit.....	40
Figure 3.4 CMFB circuit.....	41
Figure 3.5 Bias circuit.....	41
Figure 3.6 Buffer circuit.....	42
Figure 3.7 Programmable capacitor array.....	42
Figure 3.8 Chip microphotograph.....	43
Figure 3.9 Various frequency settings for constant quality factor.....	43
Figure 3.10 Various low-pass settings.....	44

Figure 3.11 Q programming at the lowest and highest frequencies.....	44
Figure 4.1 Transformateurs haute-fréquence : a) entrée du circuit b) sortie du circuit..	47
Figure 4.2 Photo de la carte de test .....	48
Figure 4.3 Schéma bloc de la carte de test .....	48
Figure 4.4 Montage de test pour étude fréquentielle.....	49
Figure 4.5 Montage de test pour étude temporelle.....	50
Figure 4.6 Balayage en fréquence à Q constant (simulation CMOSP18 V4.6).....	51
Figure 4.7 Balayage en fréquence à Q constant (simulation CMOSP18 V5).....	52
Figure 4.8 Simulation pour un facteur de qualité élevé (CMOSP18 V5).....	53
Figure 4.9 Résultats expérimentaux pour un facteur de qualité élevé .....	54
Figure 4.10 Illustration des problèmes du tampon (expérimentale).....	55
Figure 5.1 Architecture de transrésistance choisie.....	58
Figure 5.2 Architecture de l'amplificateur de courant.....	60
Figure 5.3 $Z_{in}$ et $R_m$ vs Fréquence .....	61
Figure 5.4 Gain vs Fréquence (8 configurations).....	62
Figure 5.5 Gain/Phase vs Fréquence (4 $G_m$ activés) .....	63
Figure A.1 Dessin de masque du suiveur.....	71
Figure A.2 Dessin de masque du $G_m$ .....	72
Figure A.3 Dessin de masque du CMFB.....	73
Figure A.4 Dessin de masque du condensateur programmable .....	74
Figure A.5 Dessin de masque du circuit de polarisation.....	75
Figure A.6 Dessin de masque du circuit complet.....	76
Figure B.1 Circuit de la carte de test (partie 1.8 V) .....	77
Figure B.2 Circuit de la carte de test (partie 5 V) .....	78
Figure B.3 Dessin de masque du circuit imprimé (couche supérieure) .....	79
Figure B.4 Dessin de masque du circuit imprimé (couche VDD) .....	79
Figure B.5 Dessin de masque du circuit imprimé (couche VSS).....	80
Figure B.6 Dessin de masque du circuit imprimé (couche inférieure).....	80

## LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES

### ABRÉVIATIONS

AC	Alternative Current (signaux variationnels)
CAB	Configurable Analog Block
CC	Capacité Commutée
CMFB	Common-mode FeedBack
CMOS	Complementary Metal Oxyde Semiconductor
DC	Direct Current (signaux fixes)
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
FFT	Fast Fourier Transform
FPAA	Field Programmable Analog Array
FPGA	Field Programmable Gate Array
FPMA	Field Programmable Mixed-Signal Array
MOS	Metal Oxyde Semiconductor
NMOS	Transistor MOS négatif
PMOS	Transistor MOS positif
P-P	Pointe à Pointe
RF	Radio Fréquence
SDR	Software Defined Radio
THD	Total Harmonic Distortion

### SYMBOLES

$C_{ox}$	Capacité de grille par unité de surface
dB	Décibel
Gm	Transconductance
Hz	Hertz

$I_B$ ou $I_{SS}$	Courant de polarisation DC
$I_D$ ou $i_D$	Courant de drain (DC ou AC respectivement)
$i_o$	Courant de sortie
$L$	Longueur de transistor
$m$	mètre
$mW$	milliWatt
$Q$	Facteur de qualité
$R$	Résistance
$R_m$	Transrésistance
$V_b$	Tension de polarisation (DC)
$v_{cm}$	Tension de mode commun
$V_{cn}$	Tension de polarisation cascode du NMOS
$V_{cp}$	Tension de polarisation cascode du PMOS
$V_{DD}$	Tension d'alimentation positive
$V_{DS}$	Tension drain-source du transistor MOS
$V_{GS}$ ou $v_{gs}$	Tension grille-source du transistor MOS
$v_{in}$ ou $v_{ip}$	Tension d'entrée (négative ou positive)
$V_{SS}$	Tension d'alimentation négative (ou masse)
$V_{th}$	Tension de seuil du transistor MOS
$W$	Largeur de transistor
$\mu_n$	Constante de mobilité des électrons
$\Omega$	Ohms
$\omega_0$	Fréquence centrale en radians par seconde

## LISTE DES ANNEXES

Annexe A : Dessins de masque .....	71
Annexe B : Carte de test.....	77
Annexe C : Code du microcontrôleur .....	81

# Chapitre 1

## Introduction

Le développement de la portion analogique d'un circuit mixte occupe une importante proportion du temps de design. La difficulté de la conception analogique s'explique par les compromis à plusieurs niveaux que ces circuits impliquent : bruit, linéarité, vitesse, consommation, impédance entrée/sortie, plage de tension/courant, etc. Les choix à faire requièrent donc des compétences spécialisées et de l'expérience.

Dans le monde de l'électronique numérique, la venue des circuits programmables, plus particulièrement les FPGA, a permis d'améliorer plusieurs aspects de la conception numérique. En effet, ces circuits couplés à des outils de synthèse permettent de réduire considérablement le temps de design d'une application numérique. De plus, l'utilisateur n'a nul besoin de connaître les détails du fonctionnement interne du dispositif pour l'utiliser. Il n'en demeure pas moins que l'interfaçage avec le monde extérieur nécessite toujours de l'électronique analogique. Il est donc souhaitable de vouloir amener la polyvalence et l'efficacité des FPGA dans le monde analogique en créant des circuits analogiques programmables.

De multiples applications peuvent bénéficier de circuits analogiques programmables, particulièrement si ceux-ci peuvent fonctionner à des fréquences de plusieurs dizaines de mégahertz. Des domaines d'applications sont, par exemple, l'acquisition et la conversion de données, le conditionnement de signaux, le filtrage et l'amplification de signaux dans le domaine des communications et du contrôle industriel.

En raison des différents compromis de la conception analogique, il n'est pas vraiment possible de concevoir un circuit analogique programmable pouvant réaliser n'importe quelle fonction à n'importe quelle fréquence. C'est pourquoi les circuits programmables



réalisés dans le cadre de cette maîtrise ciblaient principalement des fonctions de filtrages et d'amplification à hautes fréquences (100 MHz). Un filtre passe-bande et passe-bas de type biquadratique programmable au niveau de la fréquence de coupure ainsi que du facteur de qualité a été conçu et fabriqué. L'objectif était également de valider une nouvelle technique de programmation. En effet, les paramètres du filtre sont contrôlés par l'activation ou la désactivation de cellules de transconductance en parallèle. Un ajustement plus fin est également réalisé à l'aide d'une capacité programmable. Les dessins de masque de cette capacité ont été exécutés de manière à assurer un rapport fiable entre les différentes configurations possibles.

Un exemple d'application visé avec ce filtre est la radio numérique configurable (Software Defined Radio - SDR). Typiquement, un tel filtre pourrait servir en tant que sélecteur de bande dans une radio pouvant être reconfigurée en cours d'utilisation.

En utilisant la même technique de programmation, un amplificateur de courant constitué d'une cellule de transimpédance suivie de cellules de transconductance en parallèle a été conçu et simulé. Ce circuit pourrait donc être placé dans le même circuit intégré que le filtre décrit précédemment de manière à s'approcher de la versatilité des circuits intégrés analogiques programmables (Field Programmable Analog Array – FPAA) tout en conservant de bonnes performances à haute fréquence.

Une définition simple de FPAA serait : « un circuit intégré qui peut être programmé pour implémenter des circuits analogiques en utilisant des blocs analogiques flexibles et des interconnexions. Le circuit est doté de mémoire permettant de modifier la configuration et les paramètres. » (Sun, 2004). Les FPMA qui sont mentionnés plus tard sont quant à eux des circuits intégrés contenant à la fois un FPGA et un FPAA. Ce projet ne s'inscrit donc pas parfaitement sous l'appellation FPAA puisque les interconnexions proprement dites n'existent pas pour maximiser les performances en éliminant les interrupteurs dans le chemin du signal.

## **1.1 Organisation du mémoire**

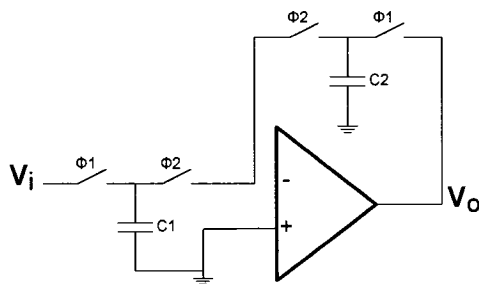
Ce mémoire débute par une discussion des raisons justifiant le choix des circuits en temps continu plutôt que commutés temporellement. Un survol des FPAA disponibles commercialement est présenté pour ensuite s'attarder aux travaux de recherche de pointe dans le domaine. Les différentes architectures de cellules de transconductance et de transimpédance dominent cette revue de littérature. Les différentes composantes du circuit intégré fabriqué sont décrites dans un chapitre incluant un article de journal soumis à Springer Analog Integrated Circuits and Signal Processing Journal. Les principaux résultats expérimentaux en font également partie. Un complément de résultats suit pour apporter des précisions sur les simulations et les résultats expérimentaux. Un autre chapitre est consacré à l'amplificateur de courant. En conclusion, un retour sur le projet est accompagné de recommandations pour de futurs travaux.

## **1.2 Capacités commutés versus temps continu**

Les FPAA à base de MOS peuvent être regroupés en deux catégories : les circuits à base capacités commutées (CC) et ceux fonctionnant en temps continu. Il est utile de décrire dès maintenant ces catégories, puisque ce projet est centré sur les circuits en temps continu, mais bon nombre de FPAA sont à base de capacités commutées

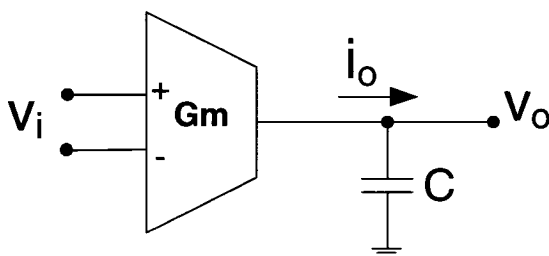
Les cellules utilisant des capacités commutées (CC) se composent généralement d'un amplificateur opérationnel dont les résistances de contre-réaction sont remplacées par des capacités entourées d'interrupteurs, contrôlés par des horloges sans recouvrement comme à la Figure 1.1. Le signal à traiter est donc échantillonné. Il est démontrable que, suivant le théorème de Nyquist, les blocs capacité/interrupteurs se présentent comme des résistances si la fréquence de contrôle des interrupteurs est au moins 2 fois plus grande que celle du signal à traiter. De plus, la valeur apparente des résistances varie en fonction de la fréquence d'horloge.

Cette technique limite toutefois à quelques MHz la fréquence maximale des signaux pouvant être traités. En effet, un temps minimum est nécessaire à la charge des capacités forçant ainsi une durée minimum de l'application du signal d'horloge. Les paramètres du circuit dépendent généralement de rapports de capacités et il est possible d'en obtenir des assez précis dans les circuits intégrés (0.1%) (Johns et al., 1997). De plus la fréquence d'horloge est aussi contrôlable précisément de sorte que les circuits à CC offrent une bonne précision et linéarité. Par ailleurs, les commutations présentent le désavantage d'introduire du bruit.



**Figure 1.1 Exemple de circuit à capacités commutées**

La catégorie temps continu comprend tous les autres circuits où le signal n'est pas échantillonné (disponible en tout temps). Il peut donc s'agir de cellules à base de transconductances (Figure 1.2), de convoyeurs de courant, d'amplificateurs opérationnels ou de transrésistances. Le fait de ne pas échantillonner élimine la nécessité d'un filtre anti-recouvrement et offre de meilleures performances au niveau du bruit. On peut également s'attendre à une consommation de puissance moindre que les circuits à capacités commutées. Le principal avantage demeure la possibilité de traiter des signaux de l'ordre des centaines de MHz. Les circuits en temps continu sont toutefois plus dépendant des variations du procédé, donc moins précis. Il peut également être plus difficile d'obtenir de bonnes performances en linéarité.



**Figure 1.2 Exemple de circuit en temps continu**

Cette maîtrise vise des applications haute-vitesse, c'est pourquoi il a été choisi de se concentrer sur les circuits en temps continu. Pour différentes raisons qui seront exposées plus tard, la cellule de transconductance a été choisie comme bloc de base.

### **1.3 FPAA commerciaux**

La recherche industrielle et celle académique sont liées et s'inspirent mutuellement. Cette section se veut un survol des fabricants de FPAA et de leurs produits disponibles sur le marché. Ce survol permettra de mieux situer notre contribution dans ce domaine.

La compagnie Anadigm est sans doute le chef de file dans le domaine des FPAA. Le fabricant en est à sa deuxième génération de composants. Le principe des capacités commutées est utilisé, ce qui limite la bande passante des signaux analogiques traités à 2 MHz. L'architecture consiste en une petite matrice (2x2 ou 2x1) de blocs configurables interconnectés (Anadigm, 2006). Ces blocs configurables (Configurable Analog Block - CAB) dynamiquement peuvent réaliser plusieurs fonctions analogiques différentes : amplificateur, différentiateur, comparateur, intégrateur, filtre, additionneur, multiplicateur, redresseur, etc. De plus, l'implémentation du circuit sur le FPAA est facilitée par le logiciel AnadigmDesigner.

Toujours suivant le principe des CC, la compagnie Lattice propose une approche différente avec sa série ispPAC (Lattice, 2006). En effet, les différentes fonctions à bande passante faible sont réalisables et configurables et se retrouvent dans des circuits intégrés différents plus spécialisés. On retrouve donc un circuit de conditionnement de signal (ispPAC10), de contrôle de système (ispPAC20) et d'interfaçage analogique (ispPAC30) qui réalisent principalement des fonctions d'amplification et de filtrage de base. Le ispPAC80/81 pour sa part est un filtre programmable de 5<sup>e</sup> ordre (limité à 750 kHz).

Cypress est une des rares compagnies actives dans le domaine des circuits programmables en temps continu, plus particulièrement des FPMA. Dans une optique d'acquisition de données, le PSoC (Cypress, 2006) de Cypress est un système sur puce

comprenant des éléments programmables d'amplification et de filtrage ayant une bande passante de l'ordre de 10 MHz.

Bien que le produit n'est plus en production, Zetex s'était démarqué avec son TRAC (Totally Reconfigurable Analog Circuit) . Vingt cellules en temps continu réalisant des fonctions arithmétiques configurables (log, intégration, somme, soustraction, multiplication et division) sont interconnectables pour former une fonction de traitement de signal complète supportant des signaux de l'ordre des 10 MHz.

Sans pouvoir les qualifier de FPAA, il est pertinent de mentionner également les fabricateurs de microcontrôleurs qui intègrent de plus en plus des blocs analogiques plus ou moins configurables à leurs produits. Par exemple, chez Microchip et Atmel, on retrouve abondamment des microcontrôleurs équipés de comparateurs, de convertisseurs numérique-analogique et analogique-numérique. Ces pratiques confirment l'intérêt de l'industrie pour les FPMA.

Notons également que la majorité des fabricants de circuits intégrés (Advanced Linear Devices, Maxim, Micrel, etc.) offre une gamme de circuits programmables (amplificateur opérationnel, résistance, potentiomètres et références de tension).

Nous constatons que les principaux acteurs dans le monde des FPAA commerciaux offrent dans la majorité des cas des circuits à capacités commutées limités en bande passante. Les autres circuits commerciaux basés sur d'autres principes ne dépassent guère les 10 MHz. Ceci laisse donc beaucoup de place pour la recherche sur des circuits en temps continu programmables permettant le traitement de signaux à des fréquences beaucoup plus élevées (> 100 MHz).

## **Chapitre 2**

### **Aperçu des FPAA et des architectures de transconductances**

#### ***2.1 Introduction***

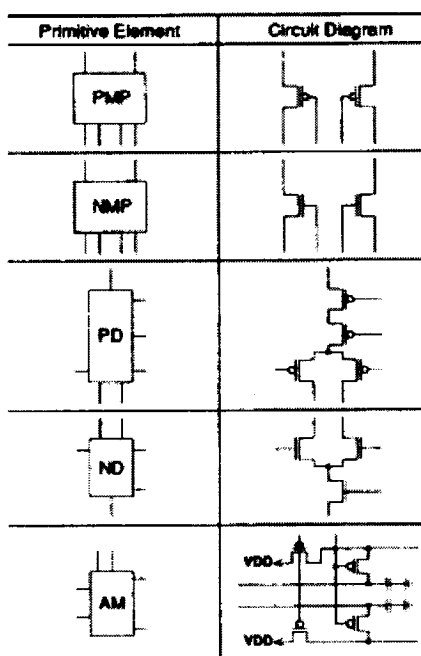
Les FPAA représentent un champ de recherche actif. Un survol des FPAA disponibles commercialement a déjà été présenté et ce chapitre met l'accent sur les travaux de recherche de pointe dans ce domaine. Le circuit programmable réalisé dans le cadre de ce projet étant à base de cellules de transconductance, différentes architectures seront passées en revue afin de justifier le choix de celle utilisée. L'amplificateur de courant programmable faisant appel à une cellule de transrésistance, les options qui s'offrent pour ce circuit seront également présentées.

#### ***2.2 Architectures de circuits FPAA***

Il est possible d'identifier plusieurs points communs entre les différents FPAA issus de la recherche académique, mais aussi commerciale. On y retrouve systématiquement un bloc analogique configurable (Configurable Analog Block - CAB) à l'instar des blocs de logique configurable d'un FPGA. La nature de ces blocs et leur nombre varient grandement d'un FPAA à l'autre. Un réseau de routage est également inévitable pour relier les CAB entre eux. Des éléments de mémoire, souvent des registres, sont également une constante dans le monde des FPAA, puisqu'ils sont nécessaires pour permettre des modifications et une rétention de différentes configurations. D'autres éléments ne sont pas utilisés systématiquement, mais peuvent s'avérer utiles. Des mécanismes de calibration permettent d'améliorer la fiabilité des gains et/ou des fréquences de coupures selon l'utilisation du FPAA. De plus, les références de tension

sont un élément important des circuits analogiques et ils se retrouvent donc souvent à l'intérieur d'un FPAA. La suite de ce chapitre présente les réalisations de différents chercheurs en matière de FPAA et met l'accent sur les particularités des designs.

(Lee et al., 1991) ont misé sur l'utilisation d'éléments relativement primitifs comme à la Figure 2.1: paire différentielle, miroir de courant. Plusieurs interrupteurs contrôlés par des bits en mémoire relient ces éléments. Le CAB ainsi formé permet plusieurs configurations : comparateur, multiplieur, étage tampon de courant ou de tension. L'objectif était la réalisation de réseaux de neurones configurables. La grande flexibilité des CAB limite toutefois la bande passante du FPAA qui en découle.



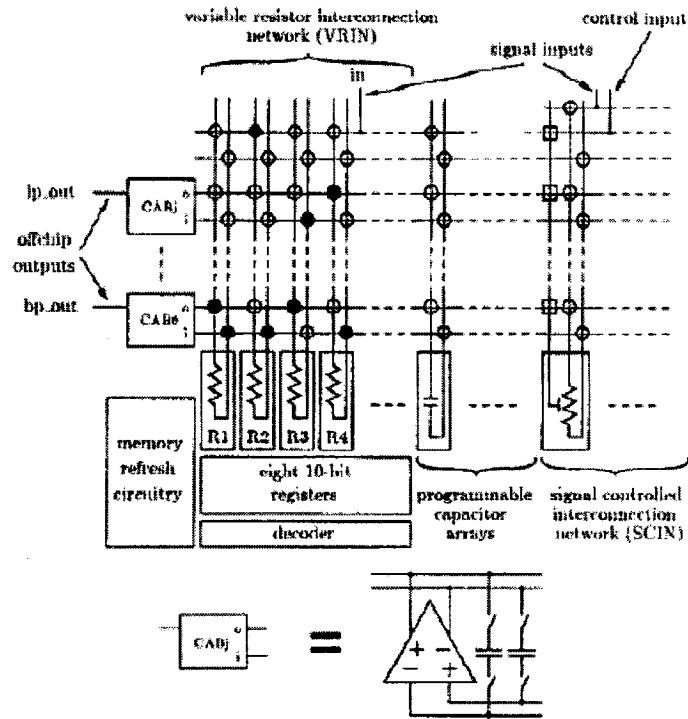
© IEEE 1991

**Figure 2.1 Cellules de base du FPAA (Lee et Gulak, 1991)**

L'utilisation de cellules de transconductance est également répandue comme dans le design de la Figure 2.2 (Lee et al., 1995). Des résistances variables sont utilisées pour contrôler les paramètres du FPAA plutôt que des interrupteurs. La linéarité en est



améliorée selon les auteurs. Encore une fois, il s'agit des débuts des FPAA en temps continu et la bande passante est de l'ordre du kHz.

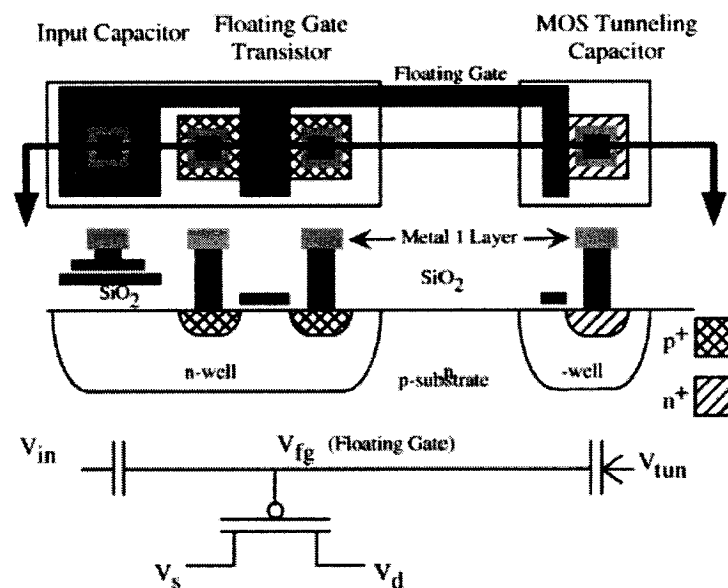


© IEEE 1995

**Figure 2.2 Réseau d'interconnexions avec des résistances programmables (Lee et Gulak, 1995)**

Plus récemment, les transistors à grille flottante ont fait leur entrée dans le domaine des FPAA (Hall et al., 2005). Le principe de ces transistors tel qu'illustré à la Figure 2.3 consiste à n'avoir aucun chemin DC à la grille du transistor. Les connexions à la grille sont toutes faites à travers une capacité. Une capacité sert à appliquer un signal à la grille tandis qu'une autre sert à y injecter des électrons afin de modifier la charge à la grille. Un avantage certain de cette technologie est que telle une mémoire EEPROM, la charge sur la grille est maintenue même en l'absence d'alimentation. Ceci permet par exemple la création de vastes réseaux d'interconnexions comme dans ce FPAA. Ces

interrupteurs peuvent également agir comme résistances programmables permettant un contrôle accru. De plus, ce FPAA utilise des CAB à base de transconductances. L'utilisation de transistors à grille flottante à l'intérieur de ces cellules permet donc de pouvoir contrôler (et programmer) les courants de polarisation et par conséquent les paramètres de transconductance. Cette technologie est prometteuse vu la grande versatilité qu'elle apporte. Les résultats présentés dans (Hall et al., 2005) comprennent d'ailleurs plusieurs configurations de filtres programmables réalisables avec cette technologie dans un FPAA. Des bandes passantes de l'ordre du MHz sont réalisées mettant en évidence une fois de plus que la perte de bande passante est le prix à payer pour la versatilité. Dans le même ordre d'idées, Yasunari et al, 2004 utilisent également des résistances programmables (MOS cette fois) dans ses FPAA. (Yasunari et al., 2004).

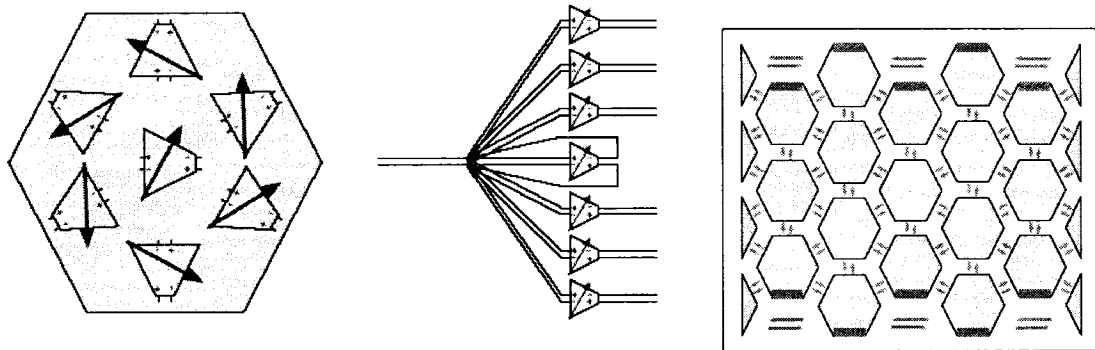


© IEEE 2005

**Figure 2.3 Transistor à grille flottante (Hall et al., 2005)**

Certaines innovations sont aussi possibles au niveau structurel. Becker et al. utilisent des CAB de forme hexagonale (Figure 2.4) composés de transconductance qui sont disposés en nid d'abeille. Une grande flexibilité au niveau des interconnexions est possible. Les

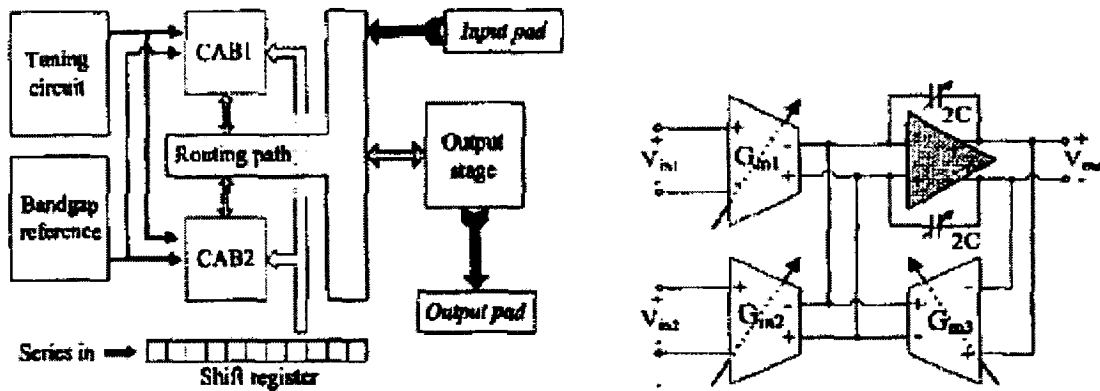
performances attendues sont de l'ordre des dizaines de MHz. Similairement au projet de cette maîtrise, la technique de programmation fait appel au branchement en parallèle de transconductances.



© IEEE 2004

**Figure 2.4 Disposition en nid d'abeille (Becker et al., Mai 2004)**

À l'instar de ce projet, plusieurs préconisent un réseau d'interconnexions et un nombre de cellules de transconductance limité afin de favoriser les performances en fréquence (Pankiewicz et al., 2002; Lon-Kou et al., 2004). Dans les deux cas, la programmabilité est basée sur des condensateurs programmables ainsi que le contrôle de la transconductance. L'architecture de Lon-Kou et al, 2004 est montrée à la Figure 2.5. Avec seulement deux CAB, la création de filtres de 1<sup>er</sup> et de 2<sup>e</sup> ordre opérant à des fréquences autour de 1 MHz est possible.



© IEEE 2004

a)

b)

**Figure 2.5 Nombre de CAB limité (Lon-Kou et al, 2004) : a) schéma bloc b) CAB**

En conclusion, il est à noter qu'une grande proportion des FPAA récents est à base de transconductances. Les principaux avantages sont la possibilité de les fabriquer facilement avec la technologie CMOS maintenant incontournable en analogique. En effet, la CMOS est plus avantageuse pour les circuits numériques et ceux-ci représentent une plus grande proportion des circuits fabriqués. Les Gm peuvent aussi bien fonctionner aux tensions d'alimentation toujours plus faibles suivant la miniaturisation des procédés de fabrication. De plus, comparativement à un amplificateur opérationnel, les Gm démontrent une meilleure linéarité et sont performants en fréquences.

### 2.3 Transconductance (Gm)

Différentes architectures de Gm et techniques pour faire varier la transconductance existent. La section suivante présente les principales approches pour créer des Gm dans un environnement CMOS. L'accent est toutefois mis sur les architectures différentielles puisque ces dernières sont les plus couramment utilisées dans les circuits modernes. En effet, les circuits complètement différentiels (entrée et sortie différentielles) présentent l'avantage de minimiser la distorsion causée par les harmoniques d'ordres paires. Deux

catégories de Gm peuvent être dressées : ceux impliquant des transistors opérant dans la région triode et ceux composés uniquement de transistors opérant dans la région de saturation (ou active).

Ces derniers fonctionnent en suivant le principe de la loi carré des transistors MOS donnée par l'équation (2.1).

$$I_D = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_m)^2 \quad (2.1)$$

Où  $I_D$  est le courant de drain,  $\mu_n$  la constante de mobilité des électrons,  $C_{ox}$  la capacité de grille par unité de surface,  $W$  la largeur du transistor,  $L$  sa longueur,  $V_{GS}$  la tension grille-source et  $V_m$  la tension de seuil du transistor. Le rôle d'un Gm étant de générer un courant de sortie en fonction d'une tension, le plus simple Gm pourrait donc être un unique transistor.

Tel que désiré dans un Gm, l'impédance d'entrée est élevée (la tension est appliquée à une grille), mais l'impédance de sortie (idéalement infinie) ne satisferait pas à de véritables applications surtout avec des signaux différentiels. Le problème le plus évident pour un unique transistor en région active est le terme au carré qui anéantirait toute linéarité entre l'entrée et la sortie. D'ailleurs, la plupart des efforts en matière de Gm se concentrent à produire une bonne linéarité.

### 2.3.1 Paire différentielle

Ceci nous amène à introduire les Gm à base de paires différentielles (Figure 2.6) pour lesquelles la linéarité repose sur une somme constante des tensions grille-source. En effet, pour 2 transistors Q1 et Q2, le comportement sera donné par l'équation (2.2).

$$i_{D1} - i_{D2} = \frac{\mu_p C_{ox} W}{2 L} (v_{GS1} + v_{GS2} - 2V_m)(v_{GS1} - v_{GS2}) \quad (2.2)$$

Donc pour des tensions d'entrée parfaitement symétriques, le courant différentiel ne dépend que de la différence des tensions d'entrée ( $v_{GS1} - v_{GS2}$ ). Ceci suppose toutefois, une tension de mode commun assurant le maintien des transistors dans la région active. De plus, en pratique, des signaux d'entrée non balancés sont courants.

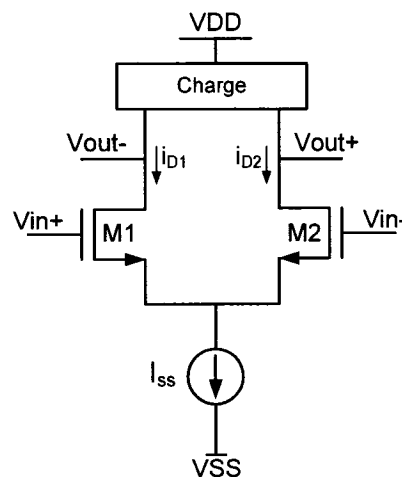


Figure 2.6 Paire différentielle

### 2.3.2 Paires différentielles croisées

L'avantage de cette topologie montrée à la Figure 2.7 est de conserver une bonne linéarité même en présence de signaux d'entrée qui ne sont pas parfaitement symétriques (débalancés). Elle est originalement attribuée à (Nedungadi et al., 1984) et a

aussi été améliorée (par l'ajout d'un étage de sortie cascode replié) et exploitée au sein de notre laboratoire Polystim (Voghell et al., May 2000). L'expression des courants différentiels est la suivante :

$$i_{o1} - i_{o2} = \left( \frac{n}{n+1} \right) 4 \sqrt{\frac{\mu_p C_{ox} W}{2L} I_B} (v_{ip} - v_{in}) \quad (2.3)$$

Où  $i_{o1}$  et  $i_{o2}$  sont les courants de sortie,  $v_{ip}$  et  $v_{in}$  les tensions d'entrée et  $n$  le rapport des largeurs  $M3/M2$  et  $M5/M4$ . On constate que contrairement à la formule de la simple paire différentielle, la somme des tensions de grille n'entre pas en ligne de compte, favorisant ainsi une meilleure linéarité. La grande intensité des courants DC devant traverser ce type de circuit est toutefois un désavantage en termes de consommation.

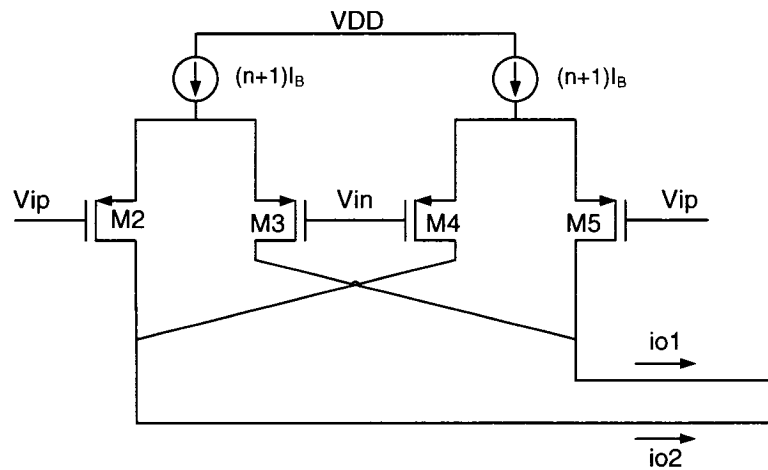


Figure 2.7 Paires différentielles croisées

### 2.3.3 Gm à base d'un transistor en triode

L'expression du courant de drain d'un transistor MOS dans la région triode est la suivante :

$$I_D = \mu_p C_{ox} \left( \frac{W}{L} \right) \left[ (V_{GS} - V_m) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \quad (2.4)$$

$V_{GS}$  n'étant plus élevé au carré, il est déjà possible de s'attendre à une meilleure linéarité en comparaison à un  $G_m$  à base de transistors en région active seulement. La Figure 2.8 montre un  $G_m$  à base d'un transistor en région triode. La fonction du transistor M9 dans ce circuit est de maintenir  $V_{GS1}$  et  $V_{GS2}$  constants. La transconductance de ce circuit est donnée par :

$$G_m = \mu_n C_{ox} \left( \frac{W}{L} \right) [V_{gs9} - V_m] \quad (2.5)$$

L'amélioration de la linéarité se fait au détriment des performances en vitesse. Par ailleurs, cette topologie présente l'avantage de permettre facilement l'ajout de branches de sortie pour la conception de  $G_m$  à sorties multiples.

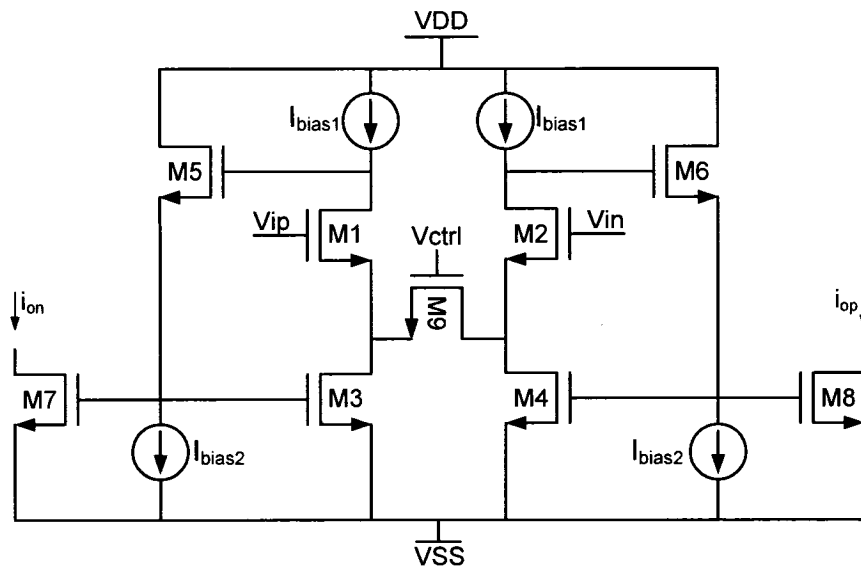


Figure 2.8  $G_m$  à base d'un transistor en triode

### 2.3.4 Étage de sortie

Dans tous les cas présentés, l'impédance de sortie est relativement faible. Afin de l'augmenter pour pouvoir alimenter une charge à une vitesse respectable, un étage de sortie est généralement nécessaire. Le choix le plus commun est un étage cascode replié



ou une de ses variantes (Bruun et al., 1995). Pour les architectures totalement différentielles, un circuit de rétroaction du mode commun (Commun Mode FeedBack - CMFB) est nécessaire pour éviter que le niveau DC à la sortie ne se retrouve à VDD ou VSS.

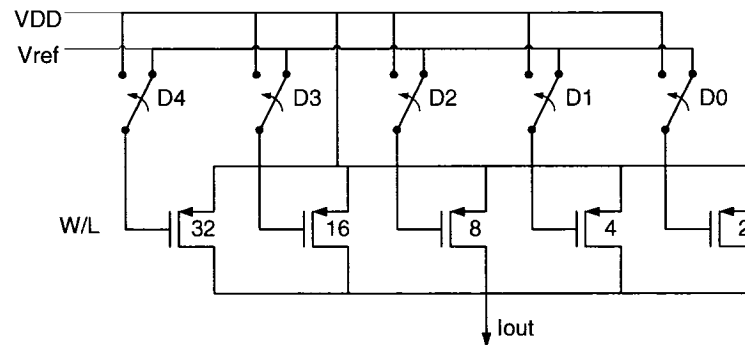
Le choix de la topologie de cellule Gm, le choix de l'étage de sortie, l'intensité des courants y circulant viendront influencer la vitesse d'opération. Par contre, le facteur le plus déterminant est le procédé de fabrication qui permet des gains en vitesse au fur et à mesure que la technologie permet de miniaturiser les transistors et par le fait même les capacités parasites.

## ***2.4 Programmation de la transconductance***

Que ce soit pour contrôler le gain d'un amplificateur à base de Gm ou les paramètres d'un filtre, différentes approches pour programmer des circuits à transconductance sont possibles. Comme il a déjà été mentionné, l'utilisation de capacités ou de résistances programmables sont des éléments qu'il est possible d'utiliser à l'extérieur du circuit Gm lui-même. Par contre, la plupart des FPAA implique également une programmation du Gm (valeur de transconductance) lui-même. Quelques techniques de programmation des Gm sont présentées dans cette section.

### **2.4.1 Source de courant programmable**

Comme la plupart des circuits CMOS actifs, les Gm présentés dans la section précédente comporte au moins une source de courant pour des fins de polarisation. Tout comme pour un transistor individuel, la transconductance d'un circuit sera influencée par l'intensité du courant qui le traverse. Le contrôle de l'intensité du courant aura donc une influence sur la transconductance. Ceci est réalisable en utilisant un circuit tel que celui de la Figure 2.9 (Voghell et al., 1998).



**Figure 2.9 Source de courant programmable**

Il s'agit en fait d'un convertisseur numérique à analogique (CNA) en mode courant. Des interrupteurs activent ou non des transistors ayant un poids binaire de par leur taille (ou plus pratiquement du nombre de transistors en parallèle). Ces transistors constituent un miroir de courant basé sur une tension  $V_{ref}$ . La Figure 2.9 montre donc un CNA de 5 bits. La plage de courant couverte peut toutefois être limitée puisqu'il faut s'assurer de maintenir les autres transistors du circuit dans leur région active.

#### 2.4.2 Contrôle en tension

Bien qu'il soit généralement plus facile de générer des courants avec précision, un contrôle en tension est aussi possible. Plus particulièrement dans le cas des  $G_m$  basés sur un transistor opérant dans la région triode, la programmation peut s'effectuer en faisant varier une tension qui est appliquée à une grille. Ceci est également applicable à la technologie des transistors à grille flottante précédemment présentée. Aussi, la tension qui alimente une branche du circuit peut permettre de contrôler le courant qui y circule et par conséquent la transconductance du circuit (Assi et al., August 1997). Pour ces exemples, un traditionnel CNA en tension peut apporter un contrôle numérique sur les circuits analogiques.

### 2.4.3 Gm multiples

Les techniques de programmation précédemment introduites présentent toutes un problème similaire : la plage sur laquelle il est possible de faire varier la transconductance est limitée puisqu'il faut maintenir la plupart des transistors dans leur région active. Une approche à la base de ce projet (Lebel et al., 2005) consiste à placer de multiples Gm en parallèle et à les activer au besoin pour faire varier la transconductance résultante. Cette technique sera donc discutée plus en détail dans le prochain chapitre. Des approches similaires ont également été proposées dans (Becker et al., Mai 2004) et (Quan et al., Mai 1998). Dans tous les cas, les désavantages sont des capacités parasites, une consommation et une surface de silicium plus élevées.

## 2.5 Transrésistance

Tel que mentionné dans l'introduction, une autre facette de ce projet consiste à réaliser un amplificateur de courant faisant appel à une cellule de transrésistance (ou transimpédance) suivi d'une cellule de transconductance. En effet, un amplificateur de courant résulte de cet agencement puisque la transrésistance convertit un courant en tension et la transconductance, une tension en courant. Cette section présentera donc les principales topologies de transrésistance.

La transrésistance ( $R_m$ ) idéale présente une impédance d'entrée la plus faible possible afin de minimiser l'excursion en tension engendrée par le courant d'entrée. Ceci est particulièrement important pour les procédés à faibles tensions d'alimentation. L'amplitude maximale des courants qui pourront être traités en dépend aussi. Pour toutes les architectures présentées, l'entrée du courant s'effectue donc sur un drain (ou une source) plutôt que sur une grille comme c'était le cas pour les Gm. Une application typique des  $R_m$  est l'acquisition de signaux en provenance de photodiodes qui sont de faibles courants.

### 2.5.1 Rm grille commune

Tel qu'utilisé dans un contexte d'amplificateur de courant dans (Bruun, 1994), l'étage de transrésistance est constitué d'une topologie à grille commune (Figure 2.10). L'impédance d'entrée (vue à la source de M1) est approximativement :

$$R_m = \frac{2}{g_{m1} + g_{mb1}} \quad (2.6)$$

Où  $g_{m1}$  et  $g_{mb1}$  sont respectivement la transconductance de M1 et la transconductance attribuable au substrat. Les paires de transistors M2-M3 et M4-M5 forment chacune un source de courant pour polariser l'étage grille-commune.

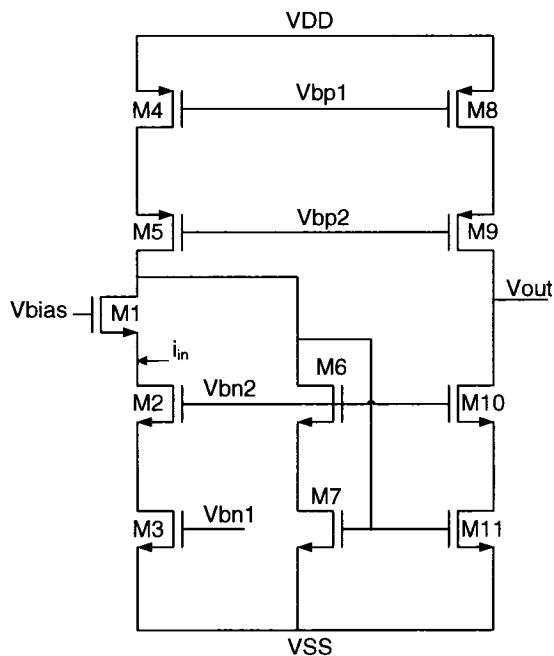


Figure 2.10 Topologie à grille commune

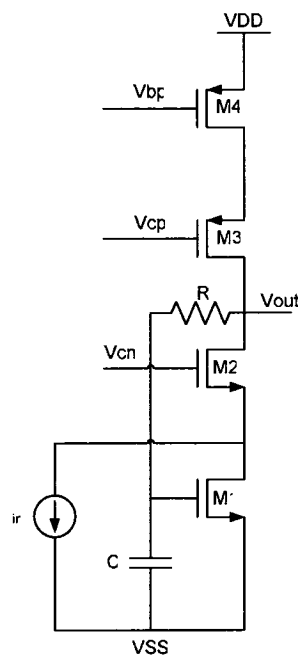
Il est donc possible de s'attendre à des impédances d'entrée de l'ordre des Kohms. Pour une transrésistance, il est toutefois souhaitable de maximiser l'impédance de sortie afin de maximiser du même coup la valeur de la transrésistance elle-même. C'est donc la

fonction du miroir de courant formé des transistors M6-M7 et M10-M11 dont l'impédance de sortie est environ :

$$R_{out} = g_{m10} (r_{ds10})^2 \quad (2.7)$$

Où  $r_{ds10}$  est la résistance drain-source de M10.

Toujours du type grille commune, l'architecture de type cascode de la Figure 2.11 (Baker, 2005) est surtout attirante par sa simplicité bien qu'on tente généralement d'éviter les résistances dans les circuits intégrés. L'impédance d'entrée est du même ordre que celle de l'architecture précédente. La résistance et le condensateur de grandes valeurs permettent quant à eux d'assurer la polarisation des transistors M1 et M2 indépendamment des signaux AC.



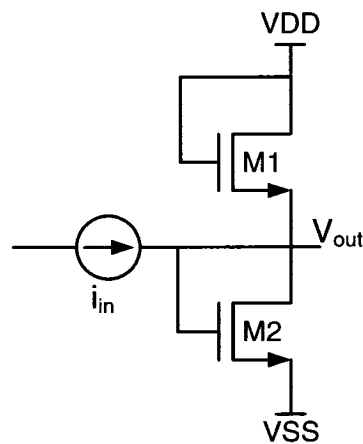
**Figure 2.11 Rm grille commune et cascode**

### 2.5.2 Rm à 2 transistors

Il existe plusieurs architectures à seulement 2 transistors. Sur la Figure 2.12, la transrésistance est formée de 2 transistors en diode (Wang, 1990). La valeur de transrésistance résultante est :

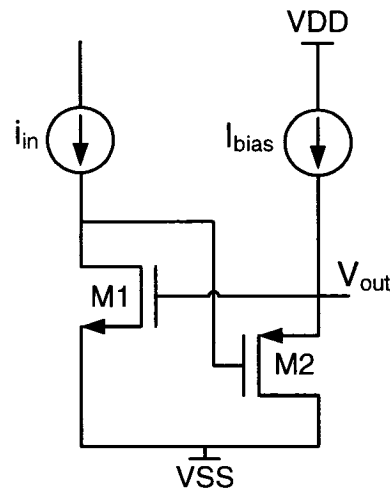
$$R = \frac{V_o}{I_{in}} = \frac{L}{WC_{ox}(VDD - V_T)} \quad (2.8)$$

La sortie et l'entrée étant le même nœud, on doit toutefois faire un compromis entre une faible impédance d'entrée ou une grande valeur de transrésistance. Selon les auteurs, ce circuit procure de bonnes performances en distorsion et en fréquence (vu sa simplicité).



**Figure 2.12 Deux transistors branchés en diode**

Une autre topologie fait appel à un transistor en région triode comme sur la Figure 2.13 (Schlannann et al., 2000).



**Figure 2.13 Deux transistors avec contre-réaction**

Le transistor M1 doit être dans la région triode et M2 en saturation. La contre-réaction permet de maintenir cet état. Par contre, le fonctionnement interne hautement non linéaire de ce circuit rend son expression mathématique difficile. Il offre tout de même de bonnes performances en fréquence et en linéarité. Une version complètement différentielle est également envisageable. Son ajustement s'est toutefois avéré difficile en CMOS 0.18 $\mu$ m.

### 2.5.3 Rm à étages multiples

Plusieurs architectures de transrésistance sont similaires à celle de (Ping-Hsing et al., 1994) et (Parnklang et al., 2000) de la Figure 2.14. L'étage typique grille commune (avec M2 et M3) se retrouve à l'entrée. M7 et M8 forme un étage tampon de type suiveur de source. L'étage formé de M5 et M6 constitue une transconductance suivant un modèle d'inverseur. Sa fonction est de créer une contre réaction de type shunt-shunt afin d'améliorer la bande passante, la linéarité du circuit de transrésistance. Cet étage contribue également au principal avantage du circuit : procurer à la fois une faible impédance d'entrée et de sortie. L'impédance de sortie peut ne pas être critique si ce circuit est branché à la grille du transistor d'un autre étage. Une faible impédance peut toutefois être primordiale si une ligne de transmission y est branchée.

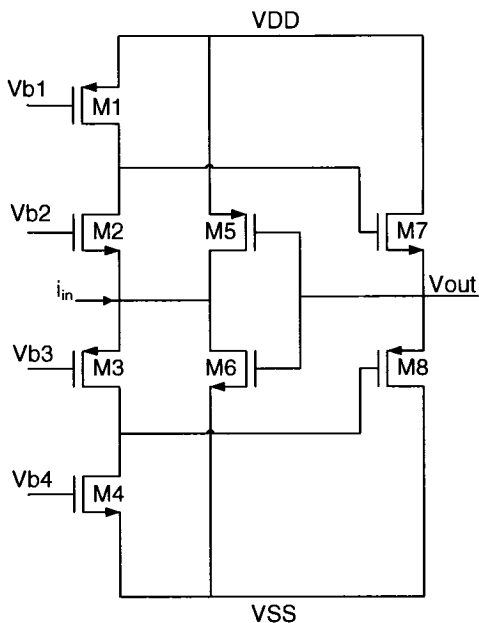


Figure 2.14 Rm à étages multiples

## 2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, quelques architectures de FPAA en temps continu à base de cellules de transconductance ont été présentées. Différentes topologies de Gm complètement différentielles ont aussi été passées en revue. Différents compromis sont faits au niveau, entre autres, de la linéarité, de la plage d'opération en fréquence et en tension. Les circuits programmables nécessitent de pouvoir faire varier les transconductances et quelques techniques ont été abordées. Le chapitre suivant présentera l'architecture choisie et son application dans un filtre programmable.

Quelques architectures de transrésistance ont également été présentées. On retrouve un étage typique d'une grille commune dans la plupart des cas, de sorte que l'impédance d'entrée est souvent du même ordre de grandeur. Les autres paramètres comme l'impédance de sortie, la valeur de la transrésistance du circuit complet et sa bande passante dépendent davantage des étages subséquents qui peuvent ou non impliquer de la contre-réaction. Le choix d'architecture sera discuté dans le chapitre qui traite de l'amplificateur de courant.



## Chapitre 3

### Filtres Gm-C hautes fréquences programmables

#### 3.1 *Présentation de l'article*

Le chapitre 2 présentait différentes architectures de FPAA ainsi que différentes topologies de Gm qui peuvent en être à la base. Dans le cas particulier d'un FPAA implémentant un filtre programmable, il a été mentionné que le problème qui revient souvent est une plage de fréquence limitée. Le présent chapitre propose un filtre programmable haute-fréquence sous forme d'un article soumis à la revue « *Analog Integrated Circuits And Signal Processing* » de Springer en janvier 2006. Le filtre en question a été fabriqué avec la technologie CMOS 0.18  $\mu\text{m}$ . Afin de favoriser les performances en fréquence, le concept de FPAA a été délaissé un peu pour se concentrer sur un filtre. Ce dernier est tout de même basé sur une matrice de Gm et offre une sortie passe-bande et passe-bas. De plus, la programmation permet de contrôler à la fois la fréquence centrale du filtre et son facteur de qualité sur une large plage. L'originalité réside dans l'utilisation de cellules Gm en parallèle (pour les ajustements grossiers) branchées à des condensateurs programmables pour les ajustements plus fins.

L'organisation de l'article consiste en une introduction qui expose l'intérêt des circuits Gm-C pour la réalisation de filtres programmables en hautes fréquences. Différents travaux concurrents trouvés dans la littérature sont également présentés. Le principe de fonctionnement et l'architecture du filtre ainsi que les différents blocs le composant sont ensuite expliqués : Gm, CMFB, polarisation, étage tampon et capacité programmable. Les principaux résultats expérimentaux sont finalement présentés de même qu'une comparaison avec des réalisations similaires.

Afin de présenter de façon plus complète le circuit intégré, l'article est suivi d'un complément expliquant la méthode de tests et donnant davantage de résultats de simulation et expérimentaux.

### **3.2 PROGRAMMABLE MONOLITHIC GM-C BAND-PASS FILTER: DESIGN AND EXPERIMENTAL RESULTS**

*E. Lebel<sup>1</sup>, A. Assi<sup>1,2</sup>, and M. Sawan<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Polystim Neurotechnologies Laboratory,  
Department of Electrical Engineering, Ecole Polytechnique de Montréal,  
Montreal, Quebec, Canada

<sup>2</sup>Department of Electrical Engineering, United Arab Emirates University  
eric.lebel@polymtl.ca

**Abstract** - We propose in this paper a programmable band-pass filter based on an array of fully differential transconductance circuits that controls the filter parameters. The signal path does not contain any switch in the interconnection network, and fine-tuning of the filter parameters is implemented using programmable capacitors. A digital building block is implemented in the proposed band-pass filter to tune its central frequency as well as its bandwidth. The filter circuit is based on a biquad topology, which is designed and implemented with CMOS 0.18 $\mu$ m technology. Experimental results show a programming ability of the center frequency between 5.9 MHz and 58 MHz, and the quality factor can be tuned from 0.36 to 10. These features are obtained for a total power consumption of less than 10.5 mW from a single 1.8V power supply.

**Keywords:** CMOS analog circuits, transconductance, programmable band-pass filters, continuous-time filters, capacitor arrays, digital tuning.

### 3.2.1 Introduction

Analog filters are key circuits in electronic systems involving signal processing. In order to decrease the development time or to increase the flexibility of systems using such filters, programmability is one of the important features required in filters. Programmability in terms of not only the center frequency but also the bandwidth can be useful in applications such as Software Defined Radio and front-end biomedical signal acquisition systems. Commercially available programmable filters and Field Programmable Analog Arrays (FPAAs) have already hit the market, but most of the available circuits are switched capacitor based filters [1, 2]. For signals with frequencies higher than few tens of megahertz, continuous-time circuits are the best choice for designers to achieve such frequencies. On the other hand, transconductor-based circuits are currently an active research area [3-11]. The linearity and relatively wide bandwidth of transconductors make these circuits appropriate for continuous-time filters.

Programming techniques based on current or voltage tuning of the programmed circuit are widely used in filtering systems [5, 8-11], but keeping the transistors in the saturation region over a wide range is one of the limiting problems in such techniques [6], for instance, linearity and noise performances become a concern when using these techniques.

We propose in this paper a new approach to design and implement programmable band-pass filters using transconductors as basic building blocks. Transconductor blocks connected in parallel are activated and deactivated by controlling their power supply [12]. This technique has been used also in realizing a programmable current amplifier [3]. The parallelism technique has already been exploited for the design of band-pass filters [4, 6, 7], in this work we use this technique without switches in the signal path (except at the programmable capacitors); this will let our band-pass filter operates at a wider frequency range. Moreover, integrated grounded programmable capacitors allow for finer tuning of the filter parameters. The band-pass filter presented in this paper has

three basic advantages: 1) Use of simple transconductance (Gm) circuits, 2) Simplicity of the digital tuning scheme, and 3) Integration of the whole filter circuitry on a single chip.

The proposed band-pass filter has been designed and fabricated with the TSMC 0.18 $\mu$ m CMOS process. It operates from a single 1.8V power supply. The architecture is presented in section II. The building blocks are described in section III. Experimental results along with comparisons against similar works are presented in section IV.

As mentioned previously, all the Gm's in the array are identical. It is true that binary-weighted rows would lead to more possible combinations and therefore a better control on the filter parameters. For instance, row #2 Gm's could be formed by 2 basic Gm cells in parallel, row #3 Gm's by 4 basic cells and row #4 Gm's by 8 basic cells. However, the resulting circuit would be too large. Different Gm cells with different transconductance in each row is another approach. However, it was decided not to follow this path either because the transconductance of the Gm's used in this work cannot be tuned on a large scale (multiplied by 2, 4 or 8). This would inevitably lead to a different frequency response from one row to another. Moreover, linearity issues would arise since transistors would leave their saturation region as the transconductance is scaled.

### **3.2.2 The band-pass filter architecture**

Figure 3.1 shows the proposed Gm-C array to build the programmable band-pass filter. It consists of four groups of four Gm blocks. Each Gm block includes two switches as shown in Figure 3.1. The programmability of the band-pass filter is implemented using switches that control whether the Gm blocks are connected (powered) or disconnected to the power supply sources VDD and VSS. The switches are merely large N-transistors for VSS and P-transistors for VDD.

### 3.2.2.1. Circuit Analysis

Horizontally, the Gm blocks are connected as a second order filter providing low-pass and band-pass outputs. Vertically, they are connected in parallel. Therefore, they share the same inputs, outputs and capacitive loads. Selectively activating and deactivating the Gm blocks can set four different transconductance values for a given column. Therefore, several bandwidth and center frequency configurations can be obtained for the filter. To control the filter parameters, it is not necessary to control all columns independently as it will be indicated by the equations of the next section. Switches selecting the Gm's of the first two columns ( $G_{m1,j}$  and  $G_{m2,j}$  with  $j = a, b$  or  $c$ ) are controlled by the same three bits ( $S_{1a}$ ,  $S_{1b}$  and  $S_{1c}$ ) (Figure 3.2). Three other bits configure the last two columns ( $S_{2a}$ ,  $S_{2b}$  and  $S_{2c}$ ). Switches are included in the first row even if they are always on. This is to ensure constant voltage drop caused by the switches among all Gm blocks in the array.

The fully differential nature of the Gm blocks requires the use of a common mode feedback (CMFB) circuit to stabilize the output voltage around the common mode voltage. Only two CMFB circuits are necessary since the Gm blocks in columns 1, 2 and 4 share the same output. In order to drive the output pads of the chip, buffers are used at the low-pass and band-pass outputs.

Programmable capacitors are used to allow finer tuning of the filter parameters while coarse tuning (band selection) is implemented using switches. The 3-bit programmable capacitor allows for 7 different capacitance values. Capacitors  $C_1$  and  $C_2$  are respectively controlled by the configuration words  $N_{C1}$  and  $N_{C2}$ .

The configuration words of the circuit are fed serially and stored in registers at the power up or as needed during operation. A total of 12 bits is required to program the array and they are arranged as shown on Figure 3.2.

The transfer function of a quadratic filter (neglecting second order effects) is given by equation (1):

$$H(s) = \frac{(Gm_1/C_1)s}{s^2 + (Gm_2/C_1)s + Gm_3Gm_4/C_1C_2} \quad (3.1)$$

where

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{Gm_3Gm_4}{C_1C_2}} \quad (3.2)$$

and

$$\frac{\omega_0}{Q} = \frac{Gm_1}{C_1} = \frac{Gm_2}{C_1} \quad (3.3)$$

As mentioned previously, all the Gm blocks have the same transconductance value and the same bits control columns 1 and 2. Therefore, the actual transconductance value of either column 1 or 2 is given by:

$$Gm_1 = Gm_2 = N_1Gm \quad (3.4)$$

where  $N_1$  is the number of activated Gm blocks in the column that can be 1, 2, 3 or 4.  $N_1$  is applied to the switches controlling  $Gm_{1,j}$  and  $Gm_{2,j}$ . The same technique also applies to columns 3 and 4:

$$Gm_3 = Gm_4 = N_2Gm \quad (3.5)$$

The capacitors can take a value that is multiple of 1 to 7 of the basic capacitor ( $C = 0.4$  pF):

$$C_1 = N_{c1}C \quad (3.6)$$

and

$$C_2 = N_{c2}C \quad (3.7)$$

The equations describing the global array will be:

$$\omega_0 = \frac{N_2}{\sqrt{N_{c1}N_{c2}}} \frac{Gm}{C} \quad (3.8)$$

and

$$Q = \frac{N_2}{N_1} \sqrt{\frac{N_{C1}}{N_{C2}}} \quad (3.9)$$

The parasitic capacitance  $C_p$  at the outputs is not negligible and taking it into account leads to a more accurate equation:

$$\omega_0 = \frac{N_2}{\sqrt{N_{C1}N_{C2}}} \frac{Gm}{C + C_p} \quad (3.10)$$

Although the center frequency depends on the actual transconductance and capacitor values, the quality factor of the filter depends only on the programmed settings. It can already be expected that the minimum and maximum  $Q$  will be 0.1 and 10.6 respectively. In theory 784 different configurations can be programmed: 4 different possible values for  $N_1$  and  $N_2$ , and 7 for  $N_{C1}$  and  $N_{C2}$  ( $N_{C1}$  or  $N_{C2} = 0$  is not used since only the parasitic capacitances would be left) so  $4 \times 4 \times 7 \times 7 = 784$ . However, several configurations lead to the same or very similar frequency response. Moreover, it is not possible, for example, to have the highest  $Q$  (or the lowest  $Q$ ) at any frequency because of the dependency between  $\omega_0$  and  $Q$ . We can see from equations (8) and (9) that  $\omega_0$  and  $Q$  are both proportional to  $N_2$ . For any given frequency, it is always possible to have at least 4 different  $Q$ s (by varying  $N_1$  only). Sixteen different  $Q$ s can be achieved if the product  $N_{C1} \times N_{C2}$  remains constant e.g.  $N_{C1} \times N_{C2} = 6 \times 1, 3 \times 2, 2 \times 3$  or  $1 \times 6$ . Nevertheless, several useful configurations can be programmed.

### 3.2.2.2. Building blocks

#### • The transconductance circuit

The basic building block of the band-pass filter circuit is the  $Gm$  circuit (Figure 3.3). The circuit of the  $Gm$  block has been designed originally within our Polystim team using the  $0.35\mu\text{m}$  technology[8]. In this work we use the same transconductor topology and redesign it with the  $0.18\mu\text{m}$  CMOS process. The cross-coupled input stage provides the circuit with good linearity and the wide-swing folded cascode output stage provides

it with high output impedance. For the circuit shown in Figure 3.3, we can write the following:

$$\begin{aligned} G_m &= \frac{i_{out}}{v_{ip} - v_{in}} \\ &= \sqrt{2\mu_p C_{ox} (W_{2,3,4,5}/L)} (\sqrt{I_{D0}} - \sqrt{I_{D1}}) \end{aligned} \quad (3.11)$$

where  $i_{out} = i_{o1} - i_{o2}$ , M1, M2, M3, M4 and M5 are matched and the dimensions ratio between M0 and M1 is equal to  $k$ , taking into account this fact, equation (11) becomes:

$$G_m = \sqrt{2\mu_p C_{ox} (W_{2,3,4,5}/L) I_{D0}} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{k}}\right) \quad (3.12)$$

#### • The CMFB block

The purpose of this circuit (Figure 3.4) is to maintain a constant common mode voltage at the differential output of a  $G_m$  ( $V_{on}$  and  $V_{in}$ ) without affecting the AC mode. Transistors M1 and M2 are matched to provide branches M7-M9 and M8-M10 with the same current. The desired common mode voltage is applied to  $V_{cm}$ . The circuit is sensitive to common mode voltage difference between  $V_{cm}$  and  $V_{on}$  and  $V_{op}$ . For instance, a voltage drop at  $V_{in}$  and  $V_{op}$  relative to  $V_{cm}$  will cause the current in M8-M9 to increase. Consequently, the current in M7-M9 will decrease so will the voltage  $V_{fb}$ .  $V_{fb}$  is the feedback voltage applied as a bias voltage to gate of the lower N transistors in the output stage of the  $G_m$  blocks whose outputs are connected to the CMFB circuit. In this example, the  $V_{fb}$  voltage drop will cause a drain-source resistance increase, so the common mode voltage will also increase to finally stabilize around the desired  $V_{cm}$ .

#### • The Bias circuit

A wide-swing constant-transconductance bias circuit (Figure 3.5) was chosen. The main characteristic of this circuit is that the  $G_m$  of all transistors depends on the resistor as



proposed in [13]. Therefore, the transconductance of transistors are independent of the power supply and are more immune to temperature variations. Since the purpose of this circuit is to provide Gm blocks with bias voltage, stable Gm values; consequently stable filter characteristics can be expected.

- **The Buffer circuit**

The buffers (Figure 3.6) used to drive the pads are typical single-ended operational amplifiers. They are internally wired as voltage follower. The pads and the instrument probes were modeled by a 20 pF capacitor. The design and the compensation were tuned to obtain a constant gain (ideally 0 dB); constant to frequencies well over the filter range. A large source-follower output stage allows for output currents of about 100  $\mu$ A. In further designs, it would be advisable to use fully differential buffers.

- **The Programmable capacitor array**

The layout of the programmable capacitors is shown in Figure 3.7. To maximize the linearity, grounded capacitors were used. However, being in a fully differential environment, this means that the negative and the positive signals are connected to different capacitors. It is suitable to have the same capacitance for both signals. The 0.2 pF unit capacitors were connected in a way to maximize the matching. The numbers shown in Figure 3.7 indicate to which bit a given unit capacitor is associated. Moreover, the active capacitors are surrounded by dummies.

As in [5], switches were used to program the capacitors. The size of the switches allowing the signal in and out of the capacitors was chosen in order to minimize the resistance and to maximize the linearity.

### 3.2.3 The filter results

Three sample chips of this filter have been fabricated in a 0.18 $\mu\text{m}$  six-metal one-poly CMOS technology offered by TSMC. Figure 3.8 shows the microphotograph of one of the measured chips, whose die area is 1 mm<sup>2</sup>. All measurements were performed using RF transformer with a center-tap in order to produce differential signals from single-ended signal generator.

Figure 3.9 shows the frequency response with constant quality factor  $Q$ . The center frequency can be tuned from 5.9 MHz to 58 MHz. The quality factor ( $Q = 1$  in theory) is actually located between 1.2 and 1.7.

The measured reduction in the frequency range compared to the theoretical and simulation results is attributed to larger parasitic capacitances even if they were taken into account during post-layout simulations. Figure 3.10 presents similar settings, but the low-pass output is observed here. Also, Figure 3.11 shows the ability to program  $Q$  at a fixed frequency. Three fabricated chips have been measured and Table 3.1 summarizes the performance of the worst case among the three chips.

Table 3.2 presents a comparison with other programmable filter designs based on Gm-C architecture. Our circuit has the advantages to provide a low-pass and a band-pass output with good quality factor and frequency range although the frequency range could certainly be improved considering the advanced technology used (0.18 $\mu\text{m}$  CMOS process). The use of several transconductor cells in the circuit can be a drawback in terms of power consumption, but still the results obtained are excellent considering the achieved flexibility of the proposed programmable filter.

### 3.2.4 Conclusion

A high performance programmable band-pass filter using an array of transconductance circuits is presented. The filter parameters are controlled by selectively activating and deactivating transconductance blocks so current source and biasing voltages are fixed. Fine-tuning is implemented with programmable capacitors. Silicon measurements showed frequency operating range from 5.9 MHz to 58 MHz and a quality factor that can be tuned from 0.36 to 10. Future work involves the design of an FPAA that can be configured to provide more analog functions such as programmable current and voltage amplifiers within the same chip.

### 3.2.5 Acknowledgments

The authors would like to thank the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) for the financial support and the Canadian Microelectronics Corporation (CMC Microsystems) for providing the design tools.

### 3.2.6 References

- [1] M. Jankovec and M. Topic, "Analog circuit development system", in *Proc. IEEE Region 8 Computer as a Tool EUROCON*, vol. 1, pp. 125-129, September 2003.
- [2] P. G. Gulak, "Field programmable analog arrays: past, present and future perspectives", in *Proc. IEEE Region 10 International Conference on Microelectronics and VLSI*, pp. 123-126, November 1995.
- [3] A. Assi and M. Sawan, "High Performance CMOS Transconductor for Mixed-Signal Analog-Digital Applications," *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 19, pp. 303-317, 1999.
- [4] J. Becker and Y. Manoli, "A new architecture of field programmable analog arrays for reconfigurable instantiation of continuous-time filters", in *Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, pp. 367-370, May 2004.

- [5] B. Pankiewicz, M. Wojcikowski, S. Szczepanski, and S. Yichuang, "A field programmable analog array for CMOS continuous-time OTA-C filter applications," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 37, pp. 125-136, 2002.
- [6] S. Pavan, Y. P. Tsividis, and K. Nagaraj, "Widely programmable high-frequency continuous-time filters in digital CMOS technology," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 35, pp. 503-511, 2000.
- [7] X. Quan, S. H. K. Embabi, and E. Sanchez-Sinencio, "A current-mode based field programmable analog array architecture for signal processing applications", in *Proc. IEEE Custom Integrated Circuits Conference*, pp. 277-280, May 1998.
- [8] J. C. Voghell and M. Sawan, "Current tuneable CMOS transconductor for filtering applications", in *Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, vol. 5, pp. 165-168, May 2000.
- [9] S. D'Amico and A. Baschiroto, "0.18/spl mu/ CMOS Gm-C digitally tuned filter for telecom receivers", in *Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, vol. 1, pp. I-493-I-496, 2003.
- [10] T. S. Hall, C. M. Twigg, J. D. Gray, P. Hasler, and D. V. Anderson, "Large-Scale Field-Programmable Analog Arrays for Analog Signal Processing," *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 52, pp. 2298-2307, 2005.
- [11] R. G. Jensen, K. r. T. Christensen, and E. Bruun, "Programmable Baseband Filter for Multistandard Mobile Phones," *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 34, pp. 49-57, 2003.
- [12] E. Lebel, A. Assi, and M. Sawan, "Field programmable Gm-C array for wide frequency range bandpass filter applications", in *Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, vol. 3, pp. 1952-1955, 2005.
- [13] J. M. Steininger, "Understanding wide-band MOS transistors," *IEEE Circuits and Devices Magazine*, vol. 6, pp. 26-31, 1990.
- [14] J.-C. Voghell, "Realisation de filtres analogiques Gm-C configurables dans les circuits integres," Master's Thesis, Ecole Polytechnique, Montreal, Qc, Canada, 2002.

### **3.2.7 List of figures**

Figure 3.1 Proposed filter architecture

Figure 3.2 Programming logic building block

Figure 3.3 Transconductance circuit

Figure 3.4 CMFB circuit

Figure 3.5 Bias circuit

Figure 3.6 Buffer circuit

Figure 3.7 Programmable capacitor array

Figure 3.8 Chip microphotograph

Figure 3.9 Various frequency settings for constant quality factor

Figure 3.10 Various low-pass settings

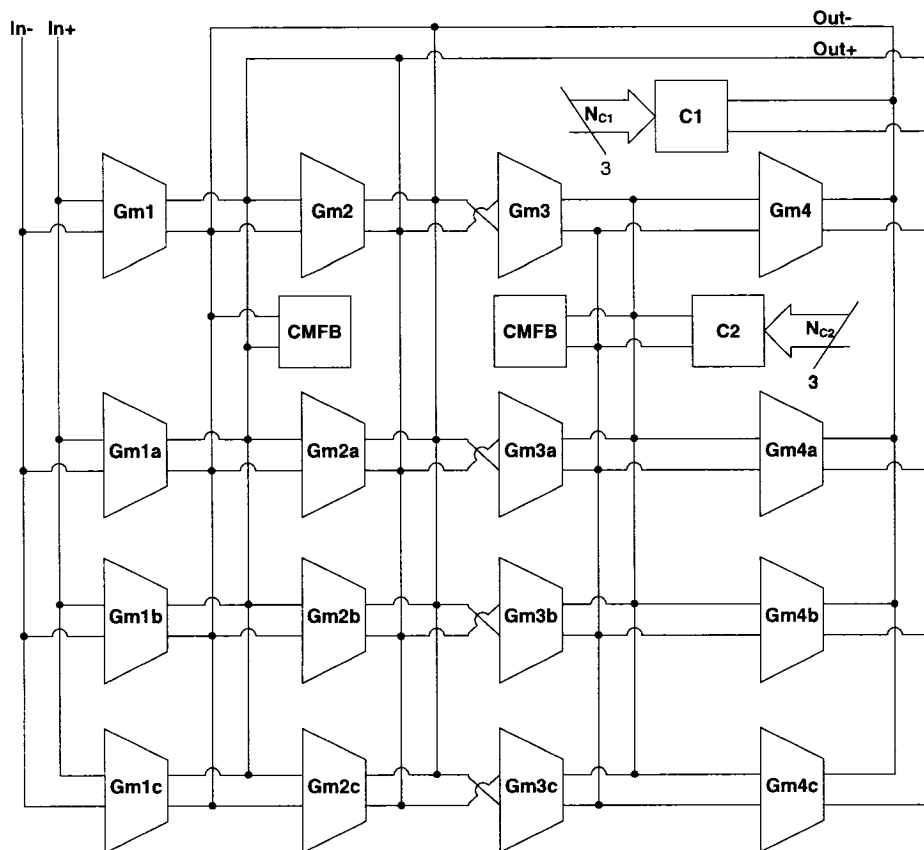
Figure 3.11 Q programming at the lowest and highest frequencies

### **3.2.8 List of tables**

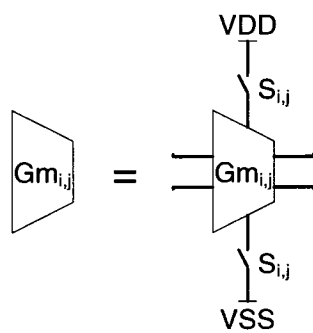
Table 3.1 Results summary

Table 3.2 Results comparisons

## 3.2.9 Figures

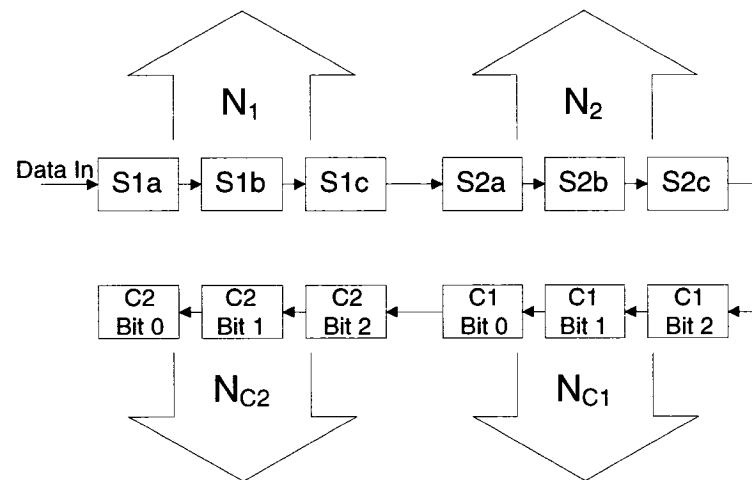


(a)

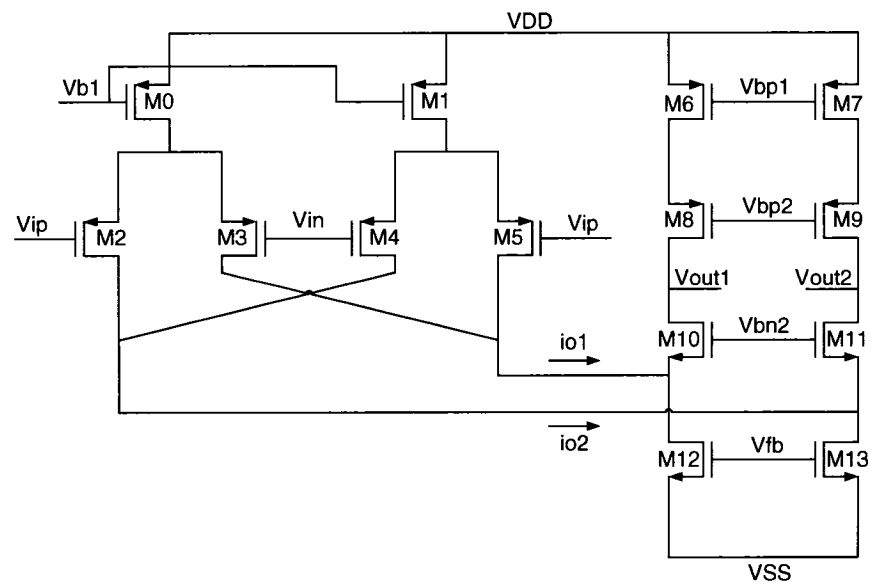


(b)

**Figure 3.1 Proposed filter architecture**  
 (a) array of Gm's, (b) interconnection of one Gm



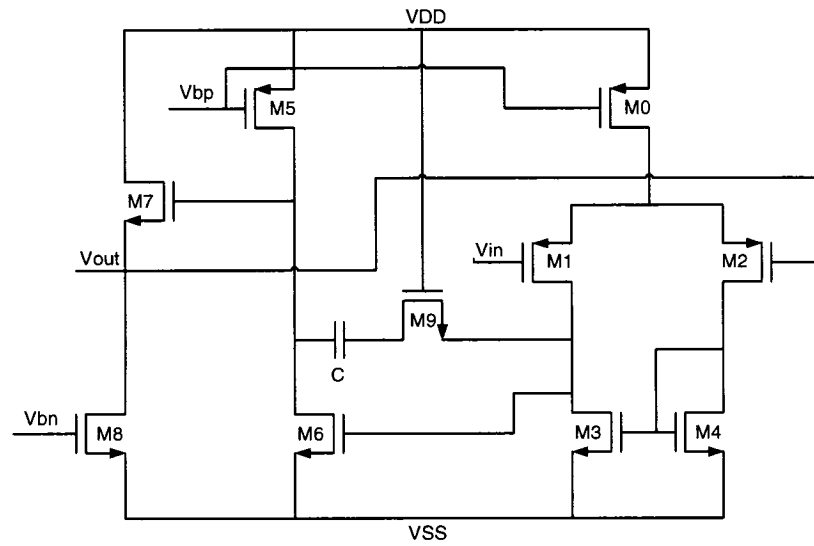
**Figure 3.2 Programming logic building block**



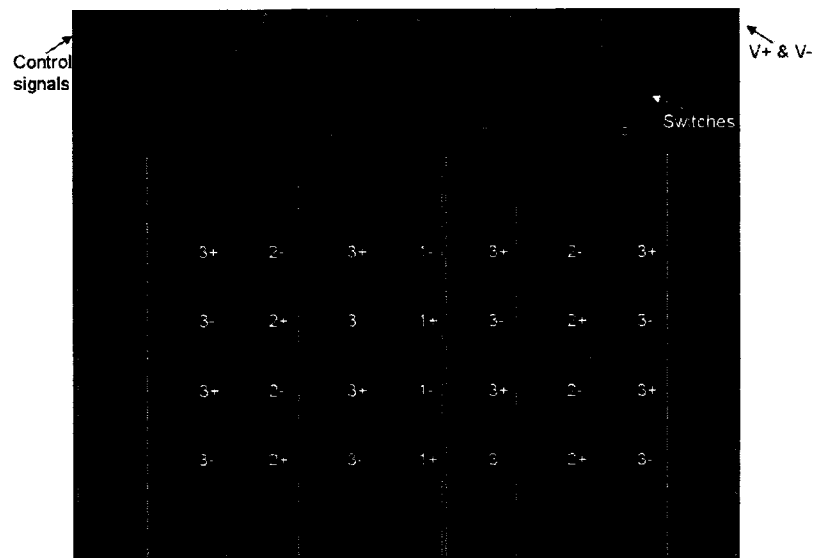
**Figure 3.3 Transconductance circuit**



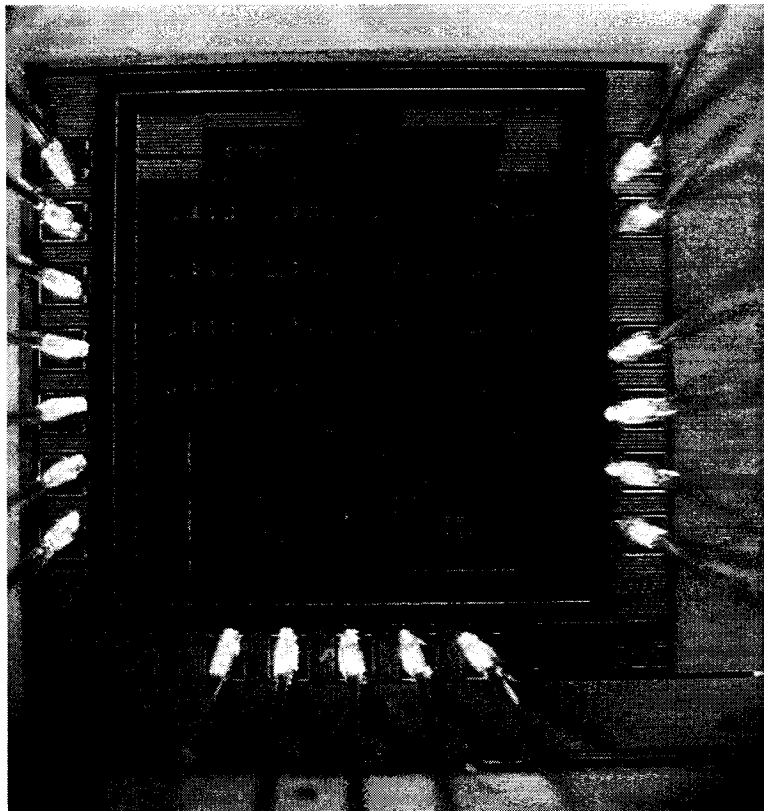




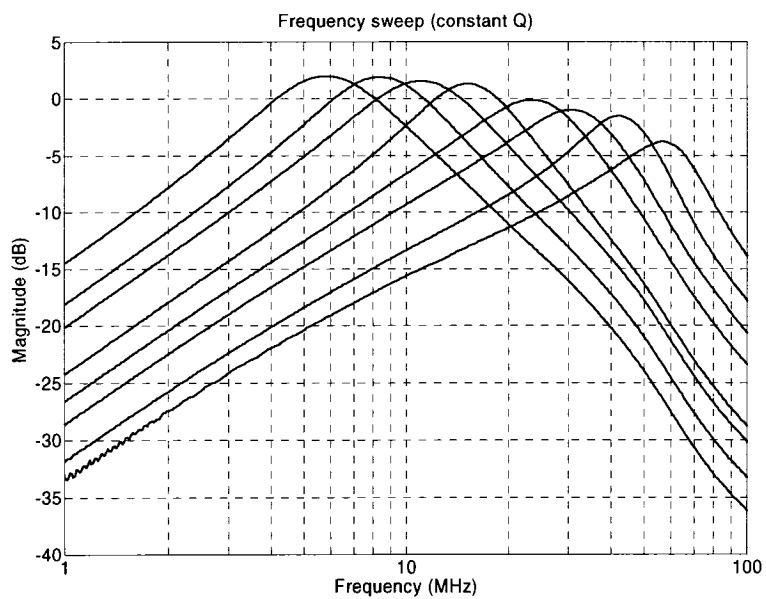
**Figure 3.6 Buffer circuit**



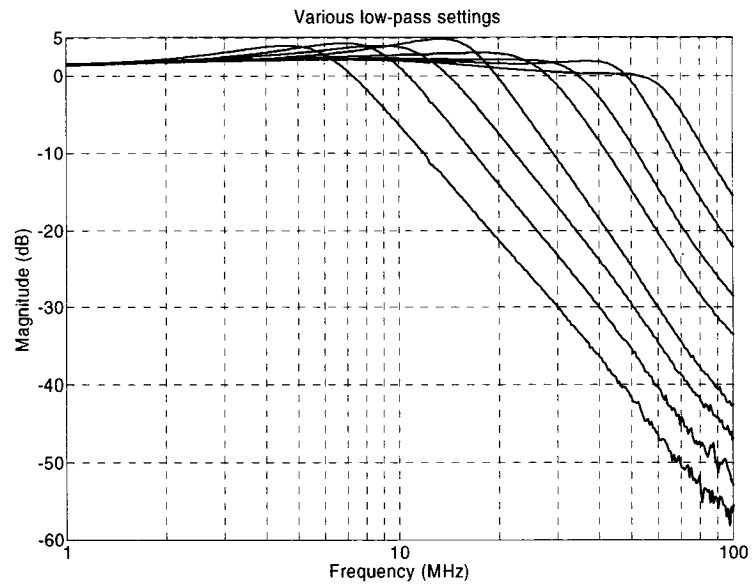
**Figure 3.7 Programmable capacitor array**



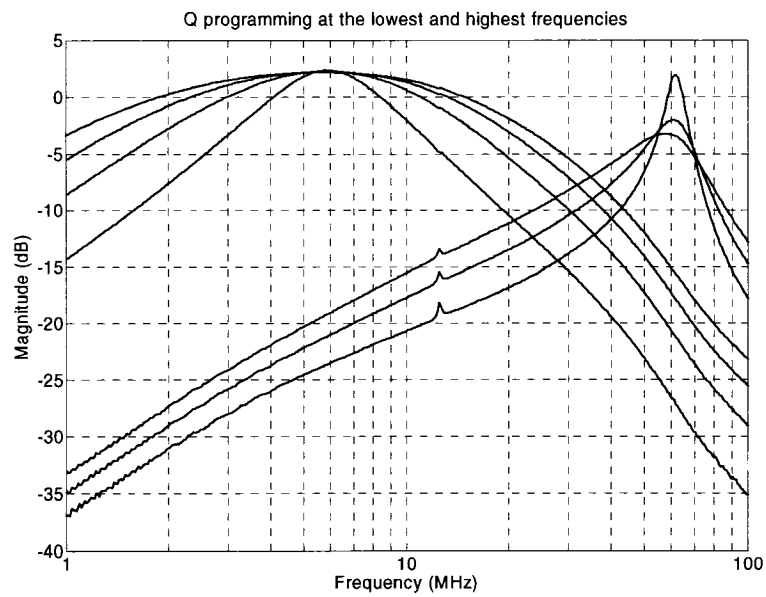
**Figure 3.8 Chip microphotograph**



**Figure 3.9 Various frequency settings for constant quality factor**



**Figure 3.10** Various low-pass settings



**Figure 3.11** Q programming at the lowest and highest frequencies

## 3.2.10 Tables

Table 3.1 Results summary

Parameter	Measured
Die area (mm <sup>2</sup> )	1
Frequency range (MHz)	5.9 – 58
Quality factor range	0.36 – 10
V <sub>ipp</sub> max (THD < 40 dB) (mV)	250
THD @ 100 mV <sub>pp</sub> , 6 MHz (dB)	52
Power consumption (mW)	10.5
CMRR (dB)	52
PSRR (dB)	43
$\Delta f$ for VDD 1.8-1.6 (%)	4.8
$\Delta f$ for VCM 0.8 – 1.1 (%)	2.8

Table 3.2 Results comparisons

Characteristic	Design			
	<i>Ref. [14]</i>	<i>Ref. [7]</i>	<i>Ref. [6]</i>	<i>This work</i>
Technology ( $\mu\text{m}$ )	0.35	0.8	0.25	0.18
Power supply (V)	3.3	+/-5	3.3	1.8
Filter type	BP	LP & BP	LP	LP & BP
Filter order	4 <sup>th</sup>	2 <sup>nd</sup>	4 <sup>th</sup>	2 <sup>nd</sup>
Frequency range (MHz)	2.7 – 6.7	0.7 - 4	60-350	5.9 - 58
Q range	2.8 – 3.5	5	-	0.36 – 10
THD (dB)	-	-58	-	-52*
Power consumption (mW)	<32.4	88	70	<10.5

\*Input amplitude = 100 mV, frequency = 6 MHz

## Chapitre 4

### Tests et validation de filtres programmables

Nous expliquons dans ce chapitre comment les mesures ont été prises sur les circuits intégrés. La documentation n'étant pas abondante sur les façons de faire notamment pour traiter des signaux différentiels, les explications qui suivent sont pertinentes. De plus, des problèmes de version du modèle CMOS18 sont survenus au cours de ce projet compromettant la validité des simulations. Il a été décidé que ces problèmes ne seraient pas détaillés dans l'article de journal pour éviter de semer la confusion. De plus amples explications et résultats font donc également partie de ce complément.

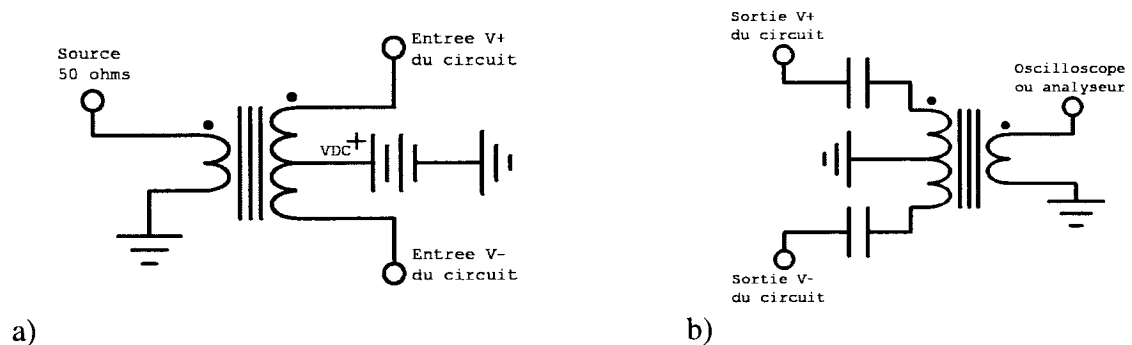
#### ***4.1 Traitement de signaux différentiels***

La plupart des instruments de mesure sont à sortie unique référencée à la masse. Le circuit fabriqué étant entièrement différentiel, ces instruments ne pouvaient pas être branchés directement aux entrées du circuit. De plus, les signaux présentés au circuit doivent avoir une tension DC de 0.9 V pour se situer à mi-chemin de l'alimentation. Un transformateur haute fréquence de la compagnie Mini-Circuits (Modèle T2-1T-KK81) a donc été utilisé (Figure 4.1a). Un rapport de 2 entre la bobine primaire et secondaire a été utilisé afin que l'impédance de 50  $\Omega$  typique aux instruments de test et des câbles coaxiaux utilisés soit préservée du côté secondaire (entrées du circuit). De plus, la prise médiane à la bobine secondaire permet d'appliquer une tension DC (0.9 V) de sorte que les signaux AC sont centrés autour de cette tension. La fonction principale du transformateur est de générer 2 signaux AC déphasés de 180° aux bornes du secondaire, ce qui est recherché pour des entrées différentielles.

Ces transformateurs ont également été utilisés à la sortie différentielle du circuit afin de pouvoir l'appliquer à un instrument à entrée unique (l'analyseur de réseau dans notre

cas). Vu la polarisation DC de la sortie, l'utilisation de condensateurs de couplage a été nécessaire afin de ne pas créer un court-circuit au niveau DC (Figure 4.1b).

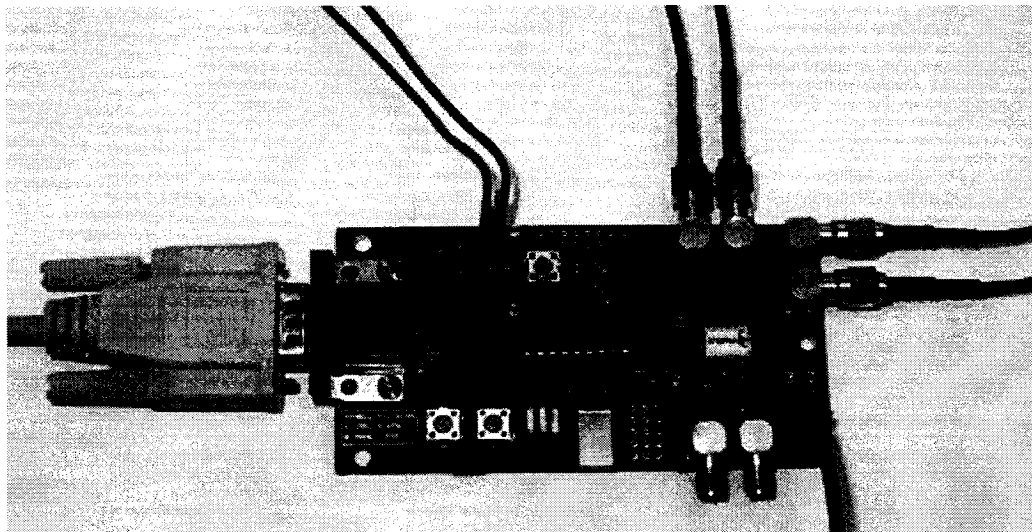
Le modèle choisi présente une faible atténuation dans une plage de fréquence allant de 80 kHz à 200 MHz. Cette caractéristique s'avère satisfaisante puisque les fréquences d'intérêt du circuit se trouvent bien à l'intérieur de cette plage.



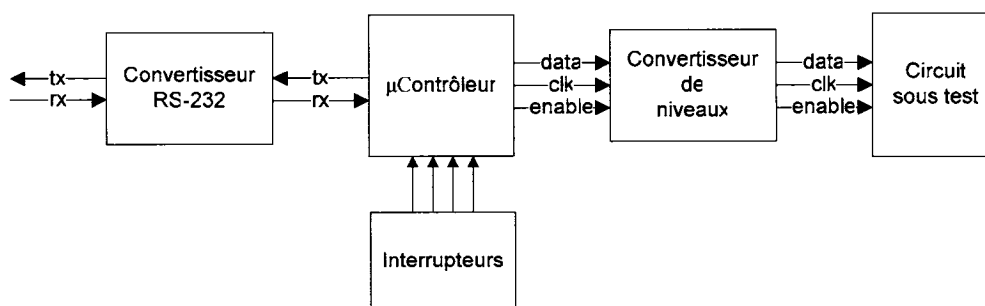
**Figure 4.1 Transformateurs haute-fréquence : a) entrée du circuit b) sortie du circuit**

## 4.2 Carte de test

Afin d'améliorer la reproductibilité des tests et d'en faciliter l'exécution, une carte de test a été conçue sur un circuit imprimé (Figure 4.2). Le circuit qui s'y trouve est représenté de façon simplifiée à la Figure 4.3.



**Figure 4.2 Photo de la carte de test**



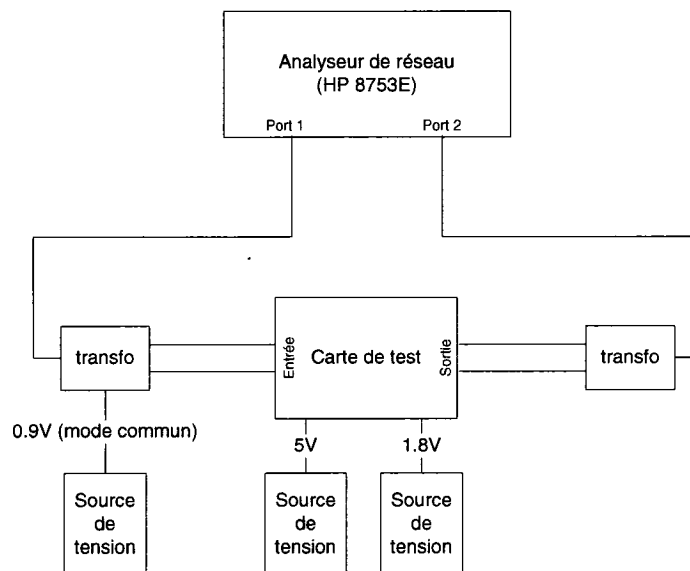
**Figure 4.3 Schéma bloc de la carte de test**

Le microcontrôleur (Microchip PIC16F628) se charge d'envoyer de façon sérielle les 12 bits nécessaires à la configuration du circuit. Il contrôle donc les signaux d'horloge et d'activation du registre à décalage. Ces signaux sont d'abord convertis au bon niveau (1.8 V) en traversant le circuit intégré MAX3393. De plus, une interface RS-232 permet de communiquer avec le microcontrôleur via un ordinateur. Ceci permet d'entrer dans un logiciel de terminal la configuration désirée en hexadécimal en tapant par exemple « LOAD B93 », B93 étant la configuration de 12 bits. Certaines configurations d'intérêts peuvent également être mises dans la mémoire EEPROM du microcontrôleur et être sélectionnées à l'aide des interrupteurs par la suite, ne rendant pas obligatoire la présence d'un ordinateur pour effectuer des mesures.

Il est à noter que toutes les entrées et sorties du circuit véhiculant des signaux à hautes fréquences sont reliées à des connecteurs RF de type SMA (hautes fréquences) par des traces d'une impédance contrôlée à  $50 \Omega$  dans le but de minimiser les réflexions.

### 4.3 Montage de test

Toutes les mesures qui impliquent l'acquisition de réponses fréquentielles ou l'étude des variations de la fréquence centrale en fonction de différents paramètres (alimentation, mode commun) ont été effectuées à l'aide du montage de la Figure 4.4. L'analyseur de réseau permet d'obtenir directement la réponse fréquentielle du circuit placé entre les ports 1 et 2.

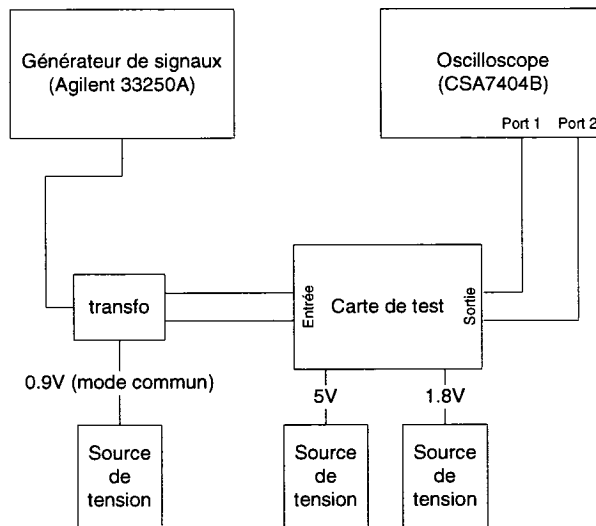


**Figure 4.4 Montage de test pour étude fréquentielle**

Les autres mesures ont été prises à l'aide du montage de la Figure 4.5. L'oscilloscope numérique est utile notamment pour calculer la distorsion harmonique à l'aide de sa fonction FFT. Il permet évidemment de visualiser dans le temps les signaux et leur amplitude. Par contre, la sensibilité limitée des oscilloscopes disponibles au laboratoire



a rendu difficile les mesures nécessitant l'observation de faibles signaux comme le PSRR, CMRR puisque le gain du filtre est fixe à 0 dB. Par contre, l'utilisation d'un analyseur de spectre pour ces mesures aurait été plus appropriée. Il a d'ailleurs été impossible d'évaluer les performances de bruit.



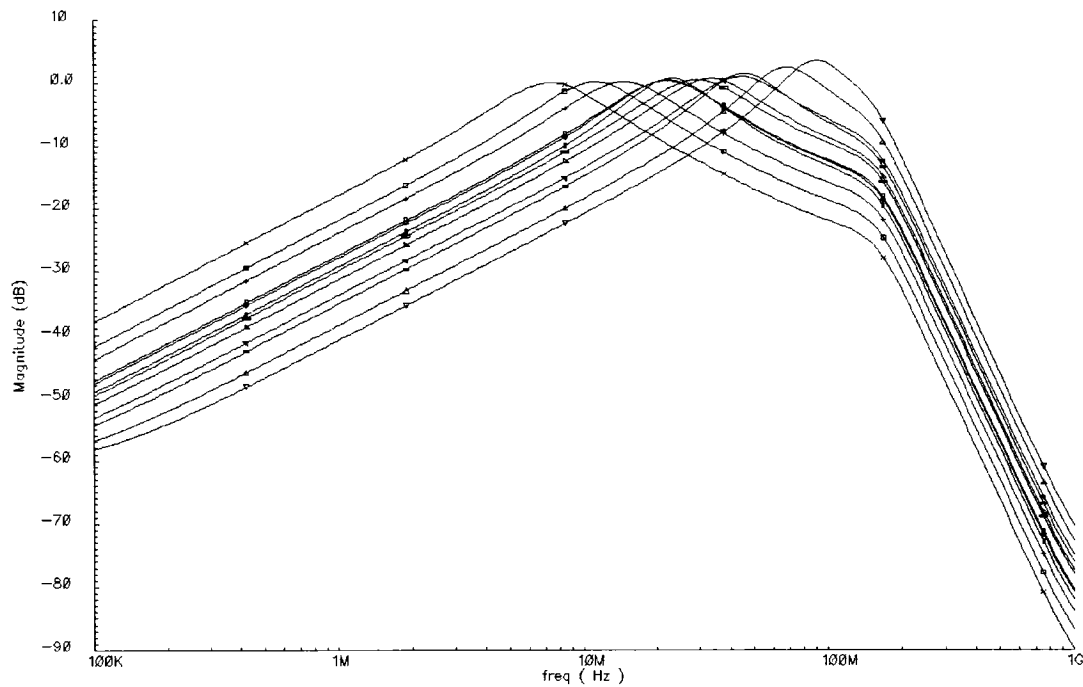
**Figure 4.5 Montage de test pour étude temporelle**

#### ***4.4 Divergences entre les résultats expérimentaux et de simulation***

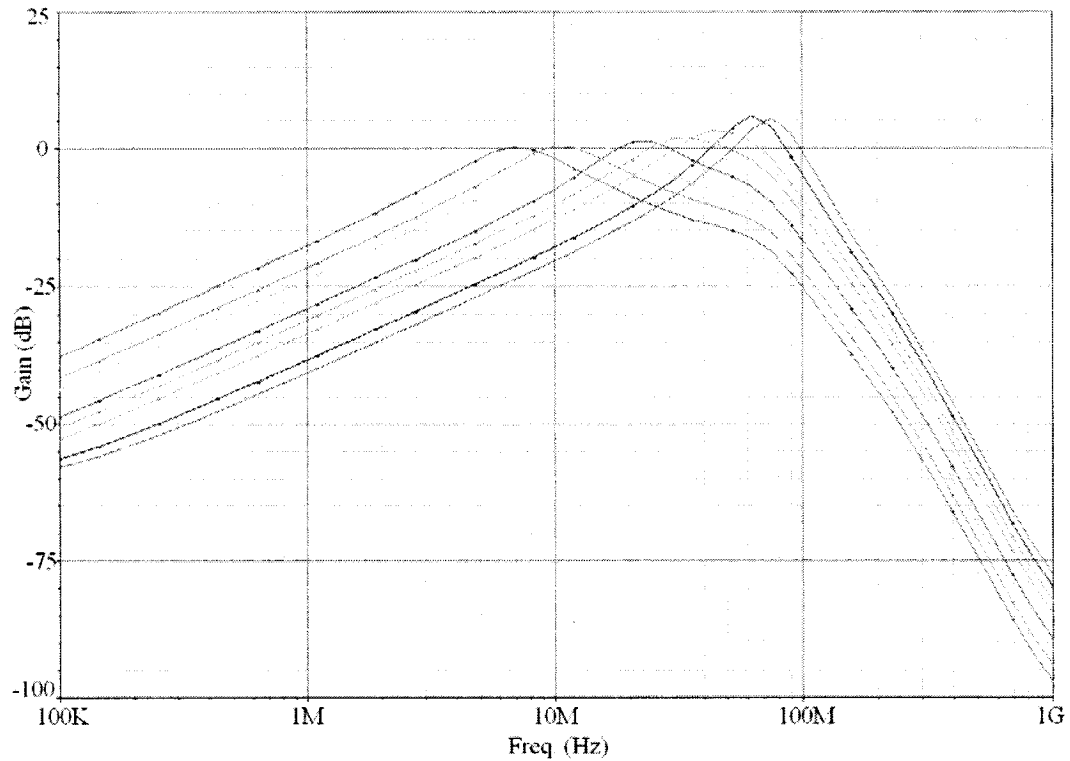
Il importe tout d'abord de préciser que toutes les simulations effectuées avant la fabrication du circuit intégré utilisaient la version 4.6 du modèle CMOS18. La Figure 4.6 montre une simulation post-layout avec cette version.

La Figure 4.7 correspond à la même simulation, mais en utilisant la version 5 (V5) du modèle CMOS18. Les simulations avec ce modèle révèlent deux problèmes qu'il aurait été souhaitable de déceler avant la fabrication du circuit. Premièrement, la plage d'opération du filtre passe-bande est plus faible en comparaison avec les premières simulations. Deuxièmement, pour des facteurs de qualité élevés, un gain très élevé est

observé comme sur la Figure 4.8, ce qui n'était pas le cas avec CMOSP18 V4.6. De plus, des simulations des 4 extrêmes (coins) des paramètres des transistors P et N (lent-lent, rapide-rapide, lent-rapide, rapide-lent) ont été effectuées pour les deux versions du modèle. Bien que des variations d'au plus 5% de la fréquence centrale et du gain du filtre ont été observées, les problèmes mentionnés ne se sont pas manifestés lors de ces simulations. Des simulations de type Monte Carlo auraient été également pertinentes, mais les outils ne le permettaient pas à ce moment.

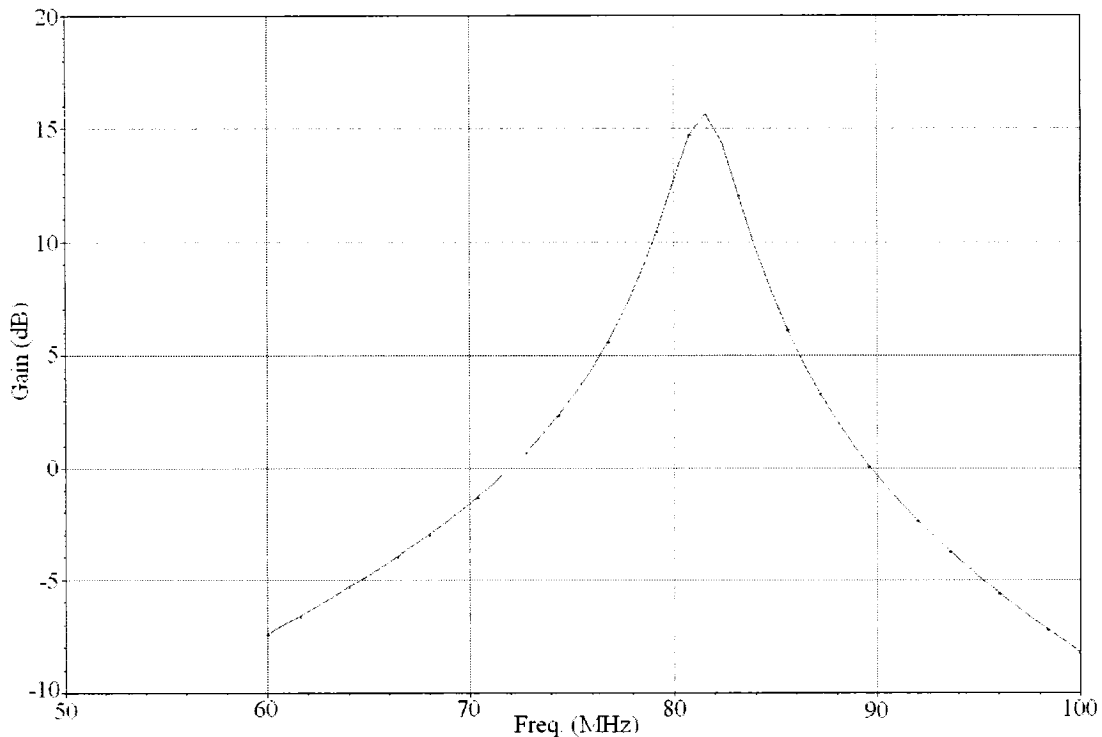


**Figure 4.6 Balayage en fréquence à Q constant (simulation CMOSP18 V4.6)**



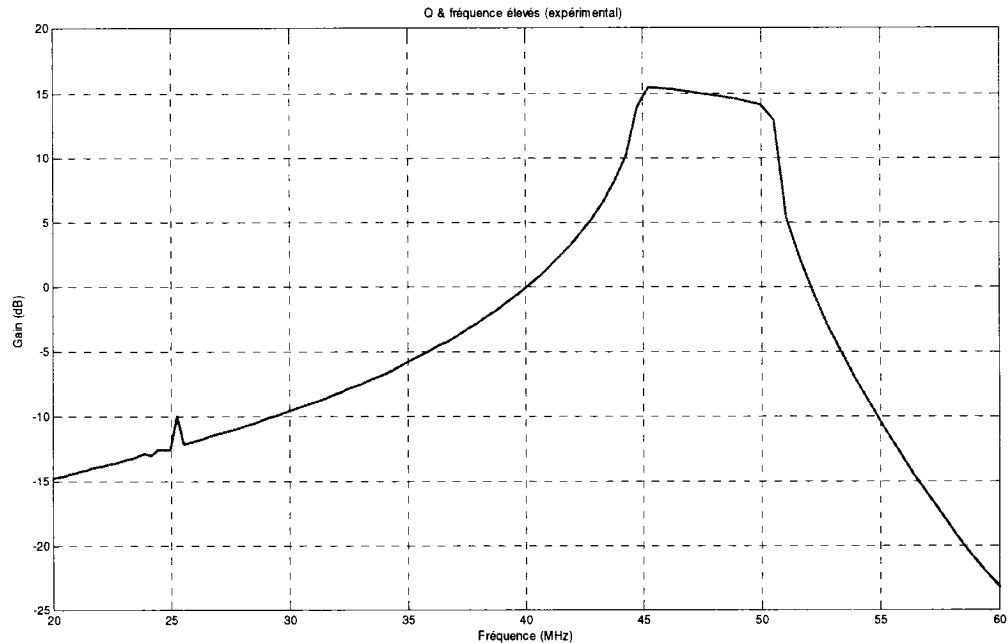
**Figure 4.7 Balayage en fréquence à Q constant (simulation CMOSP18 V5)**

On peut toutefois affirmer que CMOSP18 V5 représente mieux la réalité, particulièrement en ce qui concerne le gain pour un facteur de qualité élevé. En effet, comme le montre la courbe mesurée expérimentalement de la Figure 4.9, à gain élevé, le filtre passe-bande devient inutilisable. Par ailleurs, la plage de fréquence expérimentale demeure plus faible comparée aux simulations CMOSP18 V4.6 et V5 (bien que la divergence soit moindre avec la version 5).



**Figure 4.8 Simulation pour un facteur de qualité élevé (CMOSP18 V5)**

Pour expliquer ce phénomène, l'hypothèse suivante a été posée: les capacités parasites internes au circuit intégré sont en réalité plus importantes. La disposition matricielle des cellules de transconductance requiert en effet d'imposants fils métalliques pour les relier entre eux. De plus, la taille des transistors agissant comme interrupteurs dans les capacités programmables a été choisie dans le but de minimiser la distorsion harmonique. Par contre, il en résulte des transistors de taille appréciable qui n'aident en rien l'ampleur des capacités parasites. Des simulations «post-layout» ont donc été effectuées en forçant une capacité parasite plus élevée aux nœuds internes se trouvant à l'entrée des suiveurs de tension. Il est alors possible d'obtenir des fréquences centrales et des facteurs de qualité très près des résultats expérimentaux et ce tant pour des fréquences élevées que faibles. Le manque de précision de l'algorithme d'extraction de Cadence serait donc en cause.

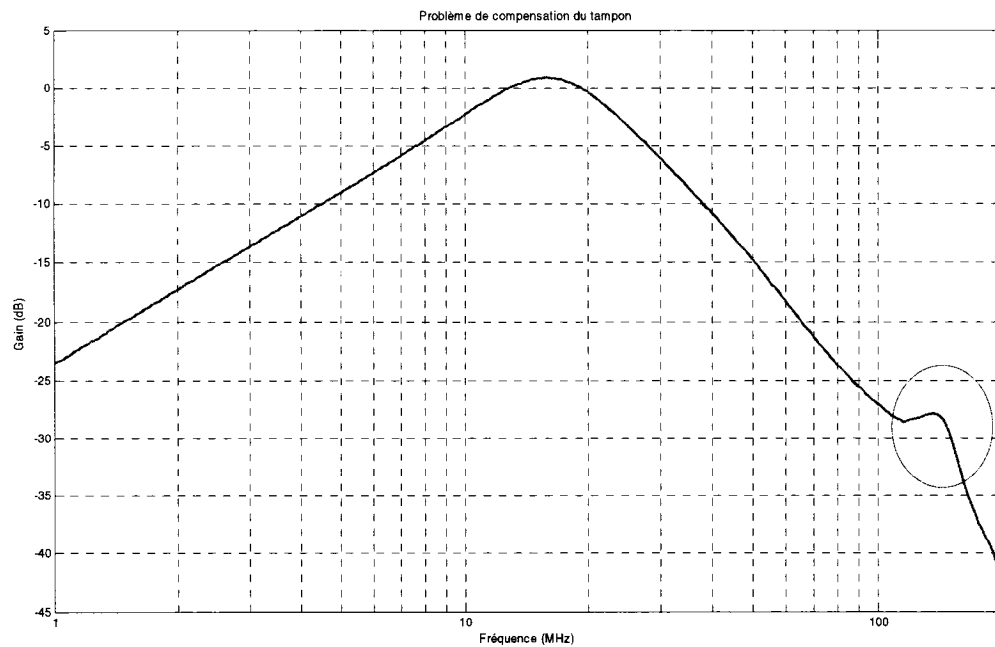


**Figure 4.9 Résultats expérimentaux pour un facteur de qualité élevé**

Il est important de préciser que la charge capacitive appliquée à la sortie du circuit intégré n'est pas responsable de la plage de fréquence plus faible que prévue. En effet, dans un premier temps, toutes les simulations «pré-layout» et «post-layout» comportaient une charge de 20 pF afin de représenter les pads et les instruments (sondes). De plus, les suiveurs de tension présents à toutes les sorties isolent la sortie des cellules de transconductance et les capacités programmables du monde extérieur. Une charge capacitive trop élevée à la sortie du circuit intégré engendre une atténuation pour les fréquences plus élevées, mais la fréquence centrale du filtre et le facteur de qualité ne sont pas affectés.

Deux problèmes relatifs au suiveur de tension mériteraient d'être traités dans un futur design. Tout d'abord, comme le montre la Figure 4.10, une bosse apparaît dans la réponse fréquentielle à haute fréquence. Ceci porte à croire que la compensation de l'amplificateur opérationnel servant de tampon est insuffisante et a moins d'effet que

lors des simulations où ce problème n'était pas présent. De plus, on remarque sur les courbes présentant plusieurs configurations de filtre (Figure 3.9) que l'amplitude est nettement plus faible à haute fréquence. On en conclut donc que la fréquence de coupure du tampon est plus faible que prévue. Une marge de sécurité plus grande devrait donc être accordée au tampon en termes de largeur de bande et de compensation.



**Figure 4.10 Illustration des problèmes du tampon (expérimentale)**

Le Tableau 4.1 présente un résumé comparatif entre les simulations du filtre programmable et ses résultats expérimentaux.

**Tableau 4.1 Résumé comparatif du filtre Gm-C proposé**

<b>Caractéristique</b>	<b>CMOSP18 V4.6</b>	<b>CMOSP18 V5</b>	<b>Capacités parasites élevées</b>	<b>Expérimentale</b>
Plage de fréquences (MHz)	8 – 96	7.0 - 76	6.0 – 58	5.9 - 58
Plage de Q	0.15 – 12	0.23 - 34	0.4 - *	0.36 – *
Consommation max. (mW)	5.2	13.4	13.4	10.5

\* Non mesurable (trop élevé)

Une précision mérite d'être apportée quant à la nomenclature utilisée pour le filtre que l'on qualifie de 2<sup>e</sup> ordre. Un filtre de 2<sup>e</sup> ordre est généralement associé à une atténuation de -40 dB par décade au-delà de la fréquence de coupure. Dans le cas du filtre fabriqué, « 2<sup>e</sup> ordre » réfère plutôt au nombre de pôles (2) qui découle du terme « s » au carré dans la fonction de transfert du filtre biquadratique (équation 3.1). Dans le cas d'un filtre passe-bande, il en résulte donc une atténuation à 20 dB par décade de part et d'autre de la fréquence centrale. C'est d'ailleurs ce qu'on observe les courbes de simulation et expérimentales. Par contre, à plus hautes fréquences, l'atténuation augmente à 40 dB par décade. Cette caractéristique est indépendante du filtre, elle est plutôt attribuable à l'entrée en jeu du pôle du suiveur de tension qui vient accentuer l'atténuation.

En conclusion, ce chapitre visait à donner des informations qui ne se retrouvaient pas dans l'article de journal. Les détails sur la prise de mesures pour un circuit totalement différentiel sauront peut-être aider Polystim à poursuivre des travaux similaires. De plus, les résultats de simulations avec deux versions successives du modèle CMOSP18 confrontés aux résultats expérimentaux du filtre programmable ont été présentés. Des hypothèses pour expliquer les différences ont été données ainsi que des points importants à surveiller ou à améliorer ont été proposés.

## **Chapitre 5**

### **Amplificateur de courant programmable**

#### **5.1 Introduction**

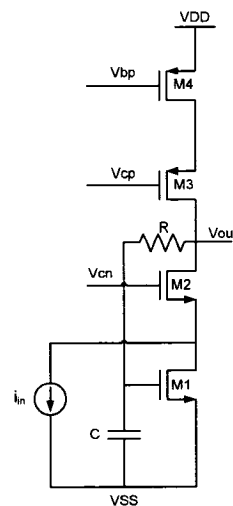
Ce chapitre présente un amplificateur de courant programmable. Plusieurs amplificateurs de courant performants existent déjà, mais sont conçus spécifiquement à cette fin. L'objectif était plutôt de créer un circuit programmable tout en réutilisant au maximum les blocs développés pour le filtre programmable exposé au chapitre précédent. L'idée (Assi et al., August 1997) consiste donc à placer une cellule de transrésistance suivi de plusieurs Gm en parallèle permettant ainsi de réutiliser le Gm du filtre et la technique de programmation. Une transrésistance permet de convertir un courant en tension et la fonction du Gm est de convertir une tension en courant. Un Rm branché à un Gm permet donc de demeurer en mode courant à l'entrée et la sortie. Typiquement, un tel circuit peut servir à amplifier un signal provenant d'une photodiode considéré comme un courant puisque la photodiode est caractérisée par une grande impédance de sortie. Ce circuit pourrait donc éventuellement être intégré sur la même puce que le filtre de manière à offrir une fonction supplémentaire. Le choix et la conception de la transrésistance seront d'abord discutés suivi des résultats de simulation de l'amplificateur.

#### **5.2 Conception**

L'expérience acquise dans la conception de la transconductance et du filtre programmable nous a appris quelques leçons qui ont guidé la réalisation de la transrésistance. Étant donné que l'objectif premier est la performance en fréquence, le choix d'architecture se pose sur un circuit simple afin de minimiser les nœuds internes qui introduisent des pôles et détériorent rapidement la réponse fréquentielle. Un autre facteur qui est venu influencer la décision est les simulations réalisées sur la plupart des



circuits de la section 2.5. En effet, des tentatives ont été faites pour faire fonctionner ces circuits en simulation. Toutefois, la faible marge de manœuvre qu'offre la technologie CMOS 0.18 $\mu\text{m}$  en raison de sa faible tension d'alimentation a rendu impossible de faire fonctionner des circuits qui auraient pu être viables pour des technologies plus anciennes. Le problème le plus commun se traduit par l'impossibilité de maintenir tous les transistors qui doivent l'être dans leur région active. Même dans le cas contraire, les performances étaient souvent marginales. Ayant eu plus de succès avec les architectures simples, le choix s'est arrêté sur l'architecture de la Figure 2.11 (répétée à la Figure 5.1 pour commodité) plus particulièrement parce que l'architecture de type cascode permettait la réutilisation du circuit de polarisation, ce qui peut s'avérer utile dans l'éventualité d'une intégration de l'amplificateur de courant sur le même circuit intégré que le filtre.



**Figure 5.1 Architecture de transrésistance choisie**

On note tout d'abord qu'en mode AC les tensions grille source des transistors M1 (puisque le condensateur est un court-circuit en AC) et M4 sont nulles et la tension de grille de M2 est à la masse (tension de polarisation DC = 0 VAC). On peut donc avancer :

$$i_{in} = g_{m2} v_{gs2} = g_{m2} (-v_{ds1}) \quad (5.1)$$

Le courant de drain qui traverse M2 en AC est  $i_{in}$  et on peut donc calculer la tension de sortie

$$v_{out} = (g_{m2} r_{ds}^2 // g_{m3} r_{ds}^2) (-i_{in}) \quad (5.2)$$

Et réarranger en termes de transrésistance

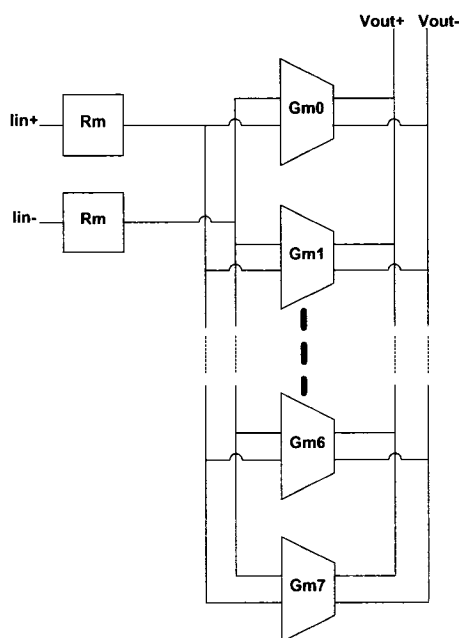
$$R_m = \frac{v_{out}}{i_{in}} = -(g_{m2} r_{ds}^2 // g_{m3} r_{ds}^2) \quad (5.3)$$

C'est donc cette valeur que nous avons tenté de maximiser par simulations tout en minimisant l'impédance d'entrée qui tel que mentionné est de  $1/g_{m2}$ . Bien que c'était une préoccupation secondaire, il va sans dire que maximiser  $g_m$  implique d'augmenter les courants de polarisation (donc la consommation) puisqu'en région active pour un MOS nous avons :

$$g_m = \sqrt{2\mu_p C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right) I_D} \quad (5.4)$$

La transrésistance cr e e a donc été utilisée dans le cadre d'un amplificateur de courant dont l'architecture est montrée à la Figure 5.2.  tant donné que la transrésistance n'est pas différentielle, il a été nécessaire d'en utiliser deux. Cette situation n'est pas idéale puisque dans un circuit intégré, ces deux cellules risqueraient d'introduire un débalancement dans les signaux à moins que des techniques d'appariement ne soient appliquées au niveau des dessins de masque. En effet, deux transrésistances indépendantes seront affectées différemment par les variations du procédé sur la puce de silicium et ne se comporteront pas de manière identique. Branchés aux transrésistances, on compte 8 transconductances en parallèle. Comme dans le cas du filtre programmable, la première ( $G_{m0}$ ) est toujours activée et la programmation s'effectue en contrôlant les 7 autres à partir de leur entrée numérique (0 = désactivé, 1 = activé). L'activation d'un  $G_m$  a pour effet d'augmenter le gain de l'amplificateur et 8 configurations différentes

sont donc possibles. Bien qu'absent de la figure, un CMFB est également nécessaire pour stabiliser les Gm. Pour des gains faibles, les Gm désactivés ne consomment pas de courant, mais ce principe de fonctionnement a pour désavantage de requérir beaucoup d'espace sur le circuit intégré.

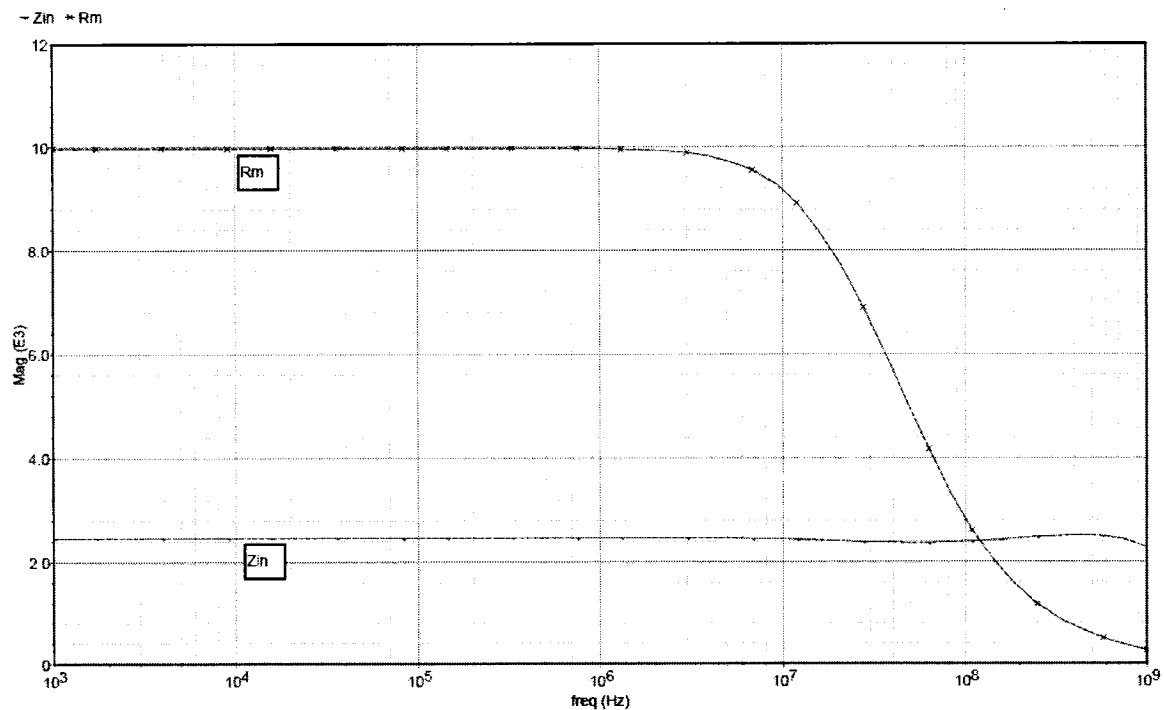


**Figure 5.2 Architecture de l'amplificateur de courant**

### **5.3 Résultats**

Des simulations ont d'abord été effectuées sur la transrésistance. Les simulations ont été faites en mode complètement différentiel (deux cellules comme dans l'architecture de l'amplificateur). La Figure 5.3 montre l'impédance d'entrée ainsi que la valeur de la transrésistance elle-même en fonction de la fréquence. Cette dernière commence à chuter à partir d'une dizaine de MHz. C'est d'ailleurs ce fait qui influence le plus la réponse en fréquence de l'amplificateur de courant complet comme il est possible de le voir sur les figures qui suivent. L'impédance d'entrée est d'environ 2 Kohms alors que la transrésistance est de 10 Kohms. Bien que ce soit loin des caractéristiques d'une transrésistance idéale, le but fondamental est atteint : la transrésistance est plus grande

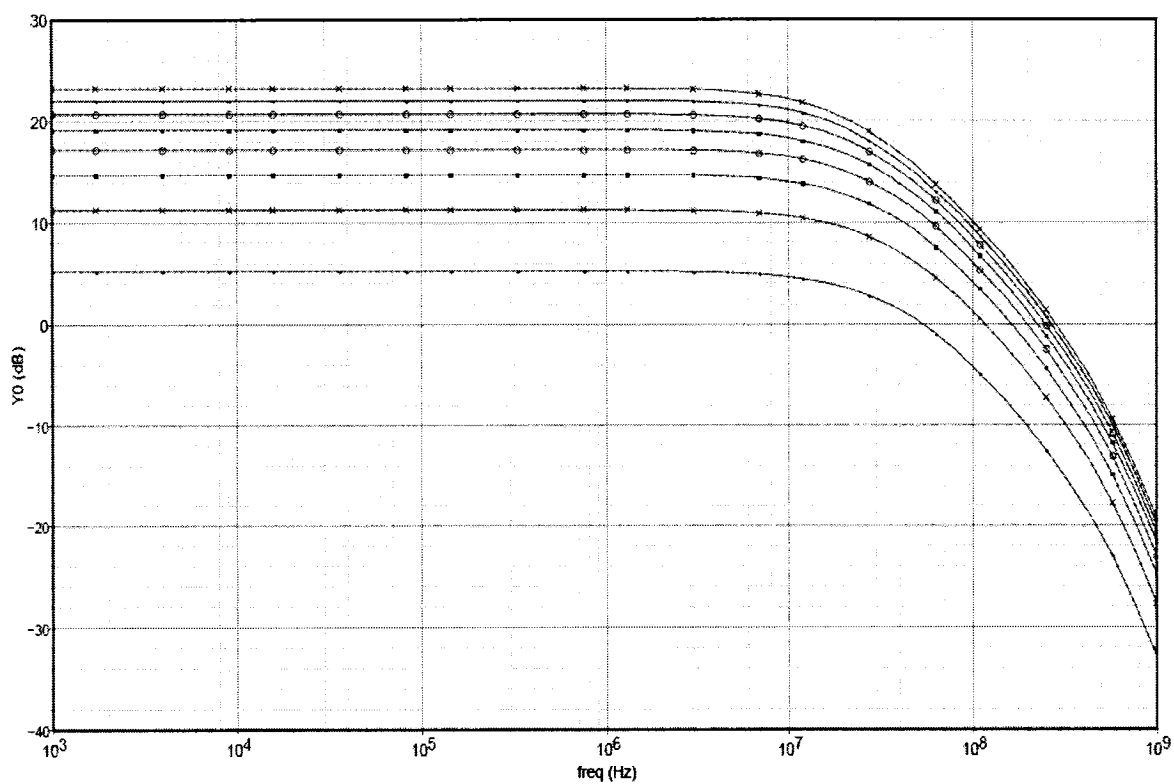
que l'impédance d'entrée. Sans cette caractéristique, il aurait été tout aussi avantageux d'utiliser une simple résistance ( $Z_{in} = R_m$ ).



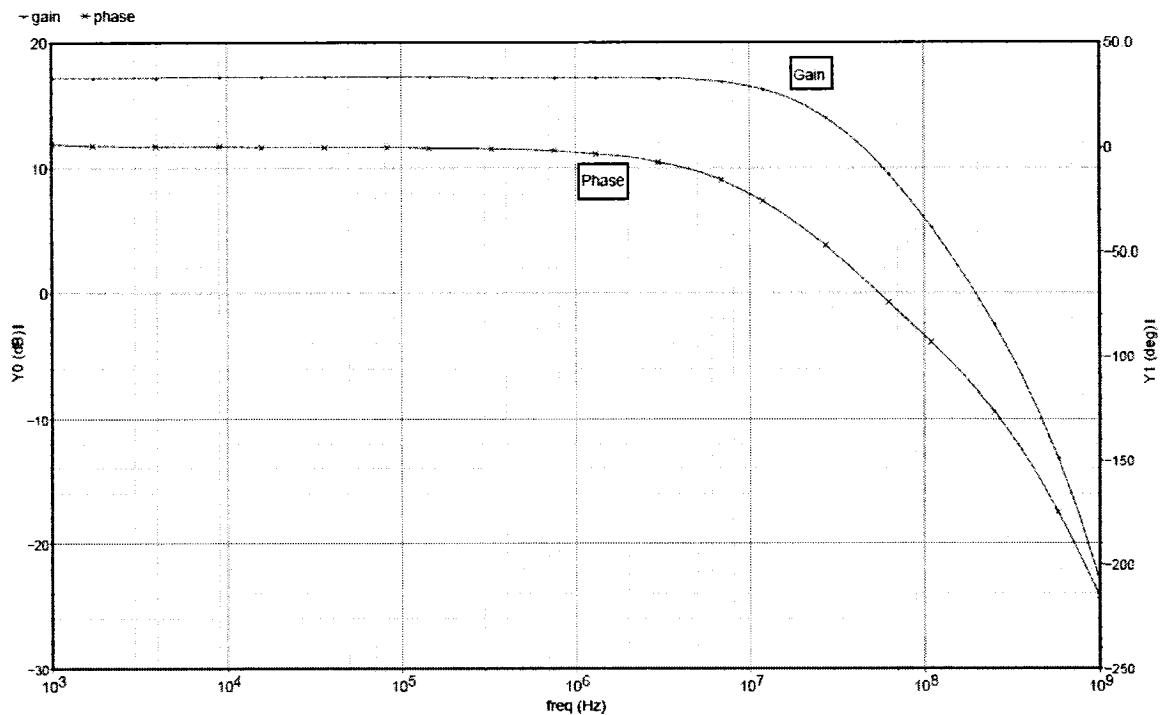
**Figure 5.3 Zin et Rm vs Fréquence**

Les résultats qui suivent ont été obtenus par des simulations de l'amplificateur de courant suivant l'architecture de la Figure 5.2. La Figure 5.4 présente les différents gains en courant programmés en fonction de la fréquence. Il est donc possible de programmer un gain entre 5 dB (1 Gm activé) et 24.5 dB (8 Gm activés). Dans tous les cas, la fréquence de coupure est de 20 MHz. Tel que mentionné, les performances en fréquence sont limitées par les transrésistances puisque les transconductances sont capables de meilleures performances à ce niveau. Malheureusement, les incréments de gain au fur et à mesure qu'un Gm supplémentaire est activé ne sont pas constants. Par exemple, la différence de gain entre 1 et 2 Gm activé est plus grande que celle entre 7 et 8 Gm activés.

La Figure 5.5 présente le gain et la phase pour une configuration à mi-chemin des extrêmes (4 Gm activés). Dans ce cas comme dans tous les autres, la marge de phase est supérieure à 45°.



**Figure 5.4 Gain vs Fréquence (8 configurations)**



**Figure 5.5 Gain/Phase vs Fréquence (4 Gm activés)**

Le Tableau 5.1 résume les résultats qui viennent d'être présentés et en introduit des supplémentaires qui ont aussi été mesurés par simulation.

**Tableau 5.1 Résumé des performances de l'amplificateur**

Gain	5 à 24.5 dB
Fréquence de coupure (-3 dB)	20 MHz
Produit gain-bande passante	282 MHz
Marge de phase	>50°
Impédance d'entrée	2 Kohms
Courant de sortie	820 $\mu$ A p-p
Distorsion harmonique (1 MHz, sortie 100 $\mu$ A p-p)	-50 dB
Consommation	3.5 mW

## **5.4 Conclusion**

Ce chapitre a présenté la conception d'un amplificateur de courant à partir d'une cellule de transrésistance suivie de cellules de transconductance développées auparavant. Une architecture de transrésistance simple a été choisie afin de prioriser les performances en fréquences au détriment du gain global ou d'une impédance d'entrée faible. Il a été montré que la technique de programmation misant sur les transconductances en parallèle fonctionne bien dans le cadre de l'amplificateur de courant. Par contre, les gains obtenus sont assez faibles de sorte qu'en réalité les usages de cet amplificateur seraient limités. Pour des signaux d'entrée de l'ordre des  $\mu\text{A}$ , l'amplificateur se trouve dans sa plage d'utilisation idéale.

## Chapitre 6

### Discussion Générale Conclusion et Recommandations

#### 6.1 *Discussion Générale*

Ce mémoire se voulait une exploration des circuits analogiques programmables en temps continu basés sur des matrices de transconductances. Ce type de circuits, notamment les FPAA, est prometteur si l'on se fie aux avantages similaires que les FPGA ont apportés dans le monde numérique. Dans cette optique, un filtre programmable passe-bande/passe-bas (fabriqué) et un amplificateur de courant programmable (simulé) ont été développés.

Les FPAA issus de la recherche font largement appel aux circuits en temps continu et souvent à des matrices de transconductance, mais encore une fois il y a place à l'amélioration quant à la vitesse de fonctionnement. Différentes architectures de transconductances et de transrésistances ont été présentées puisqu'elles constituent les éléments de base de nos circuits.

Nous avons démontré que la technique de programmation par activation de  $G_m$  en parallèle fonctionne tout comme les ajustements plus fins réalisés à l'aide de condensateurs intégrés programmables. L'objectif de contrôler la fréquence du filtre et son facteur de qualité a été atteint. Par contre, la fréquence maximale du filtre est moindre que prévue.

Ensuite, nous avons expliqué les divergences entre les simulations et les mesures expérimentales. Un manque d'exactitude du modèle CMOS18 utilisé lors du design est une des causes primaires. De plus, les mesures sur des circuits complètement différentiels présentent quelques difficultés qui ont également été traitées.



Le principe de programmation par des Gm en parallèle a été validé une fois de plus dans le cadre d'un amplificateur de courant programmable qui a été conçu et simulé. L'amplificateur s'avérerait idéal dans des applications d'amplification de signaux de l'ordre des  $\mu\text{A}$  et allant jusqu'à 20 MHz. Une augmentation du gain (25 dB) et le design de transrésistances complètement différentielles seraient toutefois souhaitables pour mieux s'harmoniser avec le Gm et se conformer à ce qui est devenu une norme en microélectronique analogique.

Il reste plusieurs étapes à la réalisation de circuits programmables performants et qui peuvent réaliser de multiples fonctions. Par contre, il est maintenant établi que les matrices de transconductances sont une approche intéressante. D'autres avenues peuvent également s'avérer intéressantes et quelques recommandations s'imposent.

## **6.2 Conclusion et Recommandations**

Les circuits programmables constituent un perpétuel compromis entre la flexibilité et la vitesse. À titre d'exemple, l'insertion d'interrupteurs dans le chemin du signal traité implique inévitablement l'apparition de pôles dans la fonction de transfert du circuit et par conséquent une baisse des performances en fréquences. L'absence d'interrupteurs dans le filtre programmable visait d'ailleurs à favoriser les performances haute-vitesse. Par contre, le filtrage biquadratique demeure la seule fonction qu'il réalise. À l'opposé de circuits vus au chapitre 2 qui faisaient appel à des interrupteurs apportant ainsi une polyvalence accrue, mais à plus basse vitesse.

Un circuit analogique programmable offrant de multiples configurations et fonctions possibles à haute fréquence est donc difficilement réalisable. C'est pourquoi il peut être avantageux de cibler des applications haute-vitesse et de créer plusieurs circuits programmables s'acquittant bien de la tâche plutôt que d'essayer d'en faire un seul qui

tente de tout faire. Il demeure quand même possible de placer plusieurs de ces circuits sur la même puce ou dans le même boîtier.

La miniaturisation des procédés complique de plus en plus la réalisation de circuits analogiques. Si on mise sur la vitesse, il est souhaitable, surtout en début de projet, de porter davantage d'attention aux architectures de circuits simples qui ont plus de chance de bien fonctionner à haute vitesse une fois fabriqués. Bien entendu, on perdra entre autres au niveau de la linéarité et de la consommation, mais il sera plus facile de se concentrer sur l'aspect programmation et l'architecture du FPAA.

Brièvement mentionné dans ce mémoire, la technologie des transistors à grille flottante semble bien adaptée au contexte des circuits programmables et mériterait d'être explorée plus à fond. Pour finir, les concepteurs s'entendent généralement pour dire que les architectures en boucle ouverte sont peu précises et grandement dépendante des facteurs comme l'alimentation, la température et les variations du procédé de fabrication. Comme dans le cas de l'amplificateur de courant, des architectures impliquant de la contre-réaction seraient probablement à privilégier.

## BIBLIOGRAPHIE

- ANADIGM. (2006). FPAA Technology, [http://www.anadigm.com/Sol\\_05.asp](http://www.anadigm.com/Sol_05.asp).
- ASSI, A., SAWAN, M. et RAUT, R. (August 1997). A fully differential and tunable CMOS current mode opamp based on transimpedance-transconductance technique. Proc. of the 40th Midwest Symposium on Circuits and Systems, 168-171.
- BAKER, R. J. (2005). CMOS Circuit Design, Layout, and Simulation Hoboken, N.J., Wiley-Interscience.
- BECKER, J. et MANOLI, Y. (Mai 2004). A new architecture of field programmable analog arrays for reconfigurable instantiation of continuous-time filters. Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 367-370.
- BRUUN, E. (1994). A high-speed CMOS current op amp for very low supply voltage operation, 509-512 vol.5.
- BRUUN, E. et SHAH, P. (1995). Dynamic range of low-voltage cascode current mirrors. Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 1328-1331 vol.2.
- CYPRESS. (2006). PSoC Mixed-Signal Controllers, <http://www.cypress.com>.
- HALL, T. S., TWIGG, C. M., GRAY, J. D., HASLER, P. et ANDERSON, D. V. (2005). "Large-Scale Field-Programmable Analog Arrays for Analog Signal Processing." IEEE Transactions on Circuits and Systems **52**(11): 2298-2307.
- JOHNS, D. A. et MARTIN, K. (1997). Analog Integrated Circuit Design. Toronto; New York, John Wiley & Sons, Inc.
- LATTICE. (2006). Lattice Programmable Analog ICs: ispPAC Devices, <http://www.latticesemi.com/products/maturedevices/isppac>.
- LEBEL, E., ASSI, A. et SAWAN, M. (2005). Field programmable Gm-C array for wide frequency range bandpass filter applications. Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 1952-1955.

- LEE, E. K. F. et GULAK, P. G. (1991). "A CMOS field-programmable analog array." Solid-State Circuits, IEEE Journal of **26**(12): 1860-1867.
- LEE, E. K. F. et GULAK, P. G. (1995). A transconductor-based field-programmable analog array, 198-199, 366.
- LON-KOU, C., LI-SHEN, L. et CHIH-HUEI, H. (2004). A field programmable analog array using current mode transconductor-capacitor (G/sub m/-C) technique. Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 721-724 vol.2.
- NEDUNGADI, A. et VISWANATHAN, T. (1984). "Design of linear CMOS transconductance elements." Circuits and Systems, IEEE Transactions on **31**(10): 891-894.
- PANKIEWICZ, B., WOJCIKOWSKI, M., SZCZEPANSKI, S. et YICHUANG, S. (2002). "A field programmable analog array for CMOS continuous-time OTA-C filter applications." IEEE Journal of Solid-State Circuits **37**(2): 125-136.
- PARNKLANG, J., RIEWRUJA, V. et JULPRAPA, A. (2000). CMOS tunable transresistance amplifier, 174-176 vol.1.
- PING-HSING, L., CHUNG-YU, W. et MING-KAI, T. (1994). "Design techniques for tunable transresistance-C VHF bandpass filters." Solid-State Circuits, IEEE Journal of **29**(9): 1058-1067.
- QUAN, X., EMBABI, S. H. K. et SANCHEZ-SINENCIO, E. (Mai 1998). A current-mode based field programmable analog array architecture for signal processing applications. Proc. IEEE Custom Integrated Circuits Conference, 277-280.
- SCHLANNANN, M. E. et GEIGER, R. L. (2000). A simple 2-transistor transresistor, 1252-1255 vol.3.
- SUN, Y. (2004). Wireless Communication Circuits and Systems, Institution of Electrical Engineers.
- VOGHELL, J. C. et SAWAN, M. (May 2000). Current tuneable CMOS transconductor for filtering applications. Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 165-168.

- VOGHELL, J. C., SAWAN, M., ROY, M. et BOURRET, S. (1998). Programmable current source dedicated to implantable microstimulators. Proc. Tenth International Conference on Microelectronics, 67-70.
- WANG, Z. (1990). "2-MOSFET transresistor with extremely low distortion for output reaching supply voltages." Electronics Letters **26**(13): 951-952.
- YASUNARI, J., INOUE, T. et TSUNEDA, A. (2004). A CMOS continuous-time FPAA analog core using automatically-tuned MOS resistors. MWSCAS '04, I-153-6 vol.1.

## Annexe A

### Dessins de masque

Cette annexe contient les dessins de masque des différents blocs ayant servi à la construction du filtre programmable. Il est à noter que tous les blocs sont entourés de deux anneaux de garde branchés respectivement à VSS et VDD. Ceux-ci n'apparaissent pas sur les figures afin de les alléger.

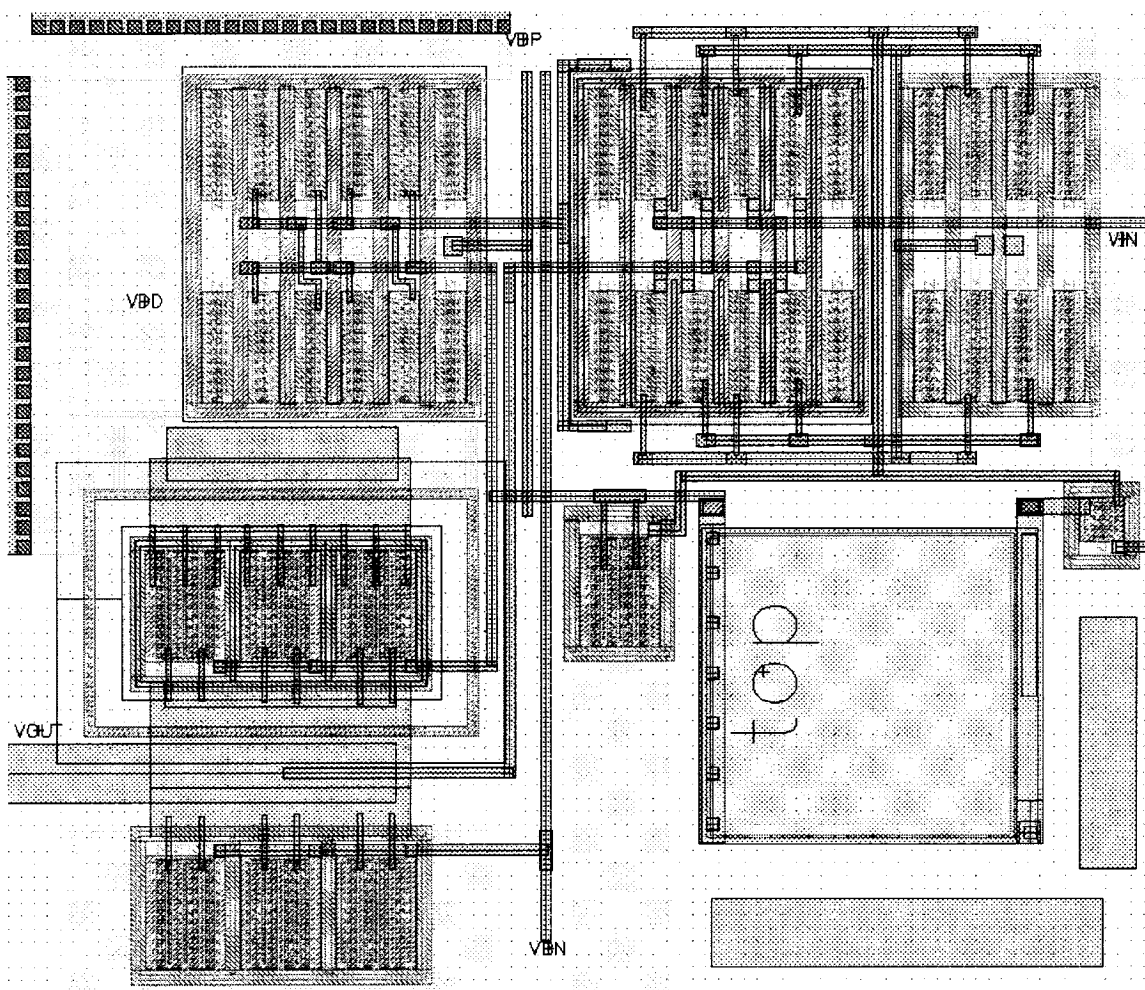


Figure A.1 Dessin de masque du suiveur

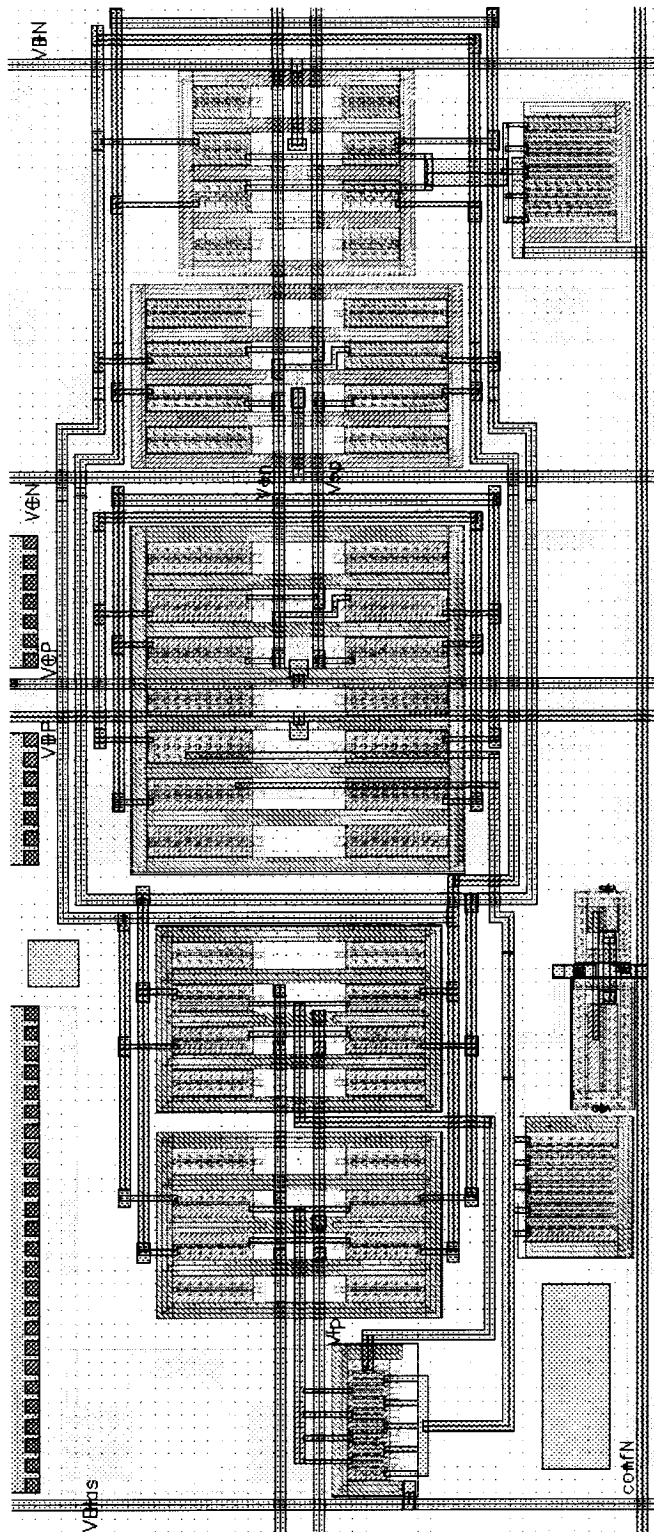


Figure A.2 Dessin de masque du Gm

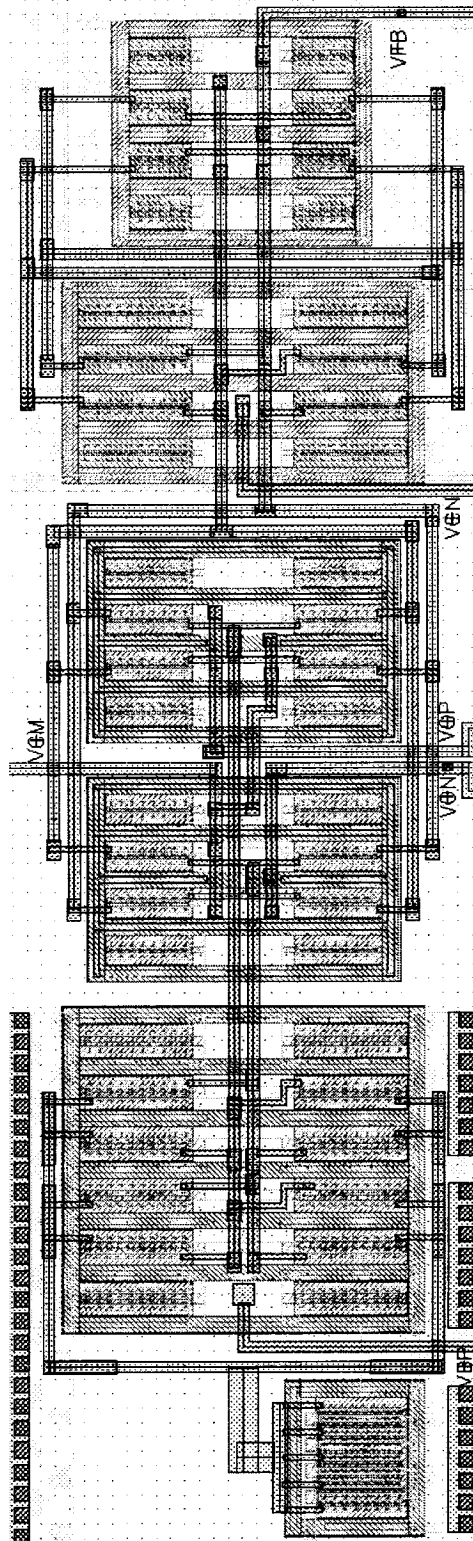
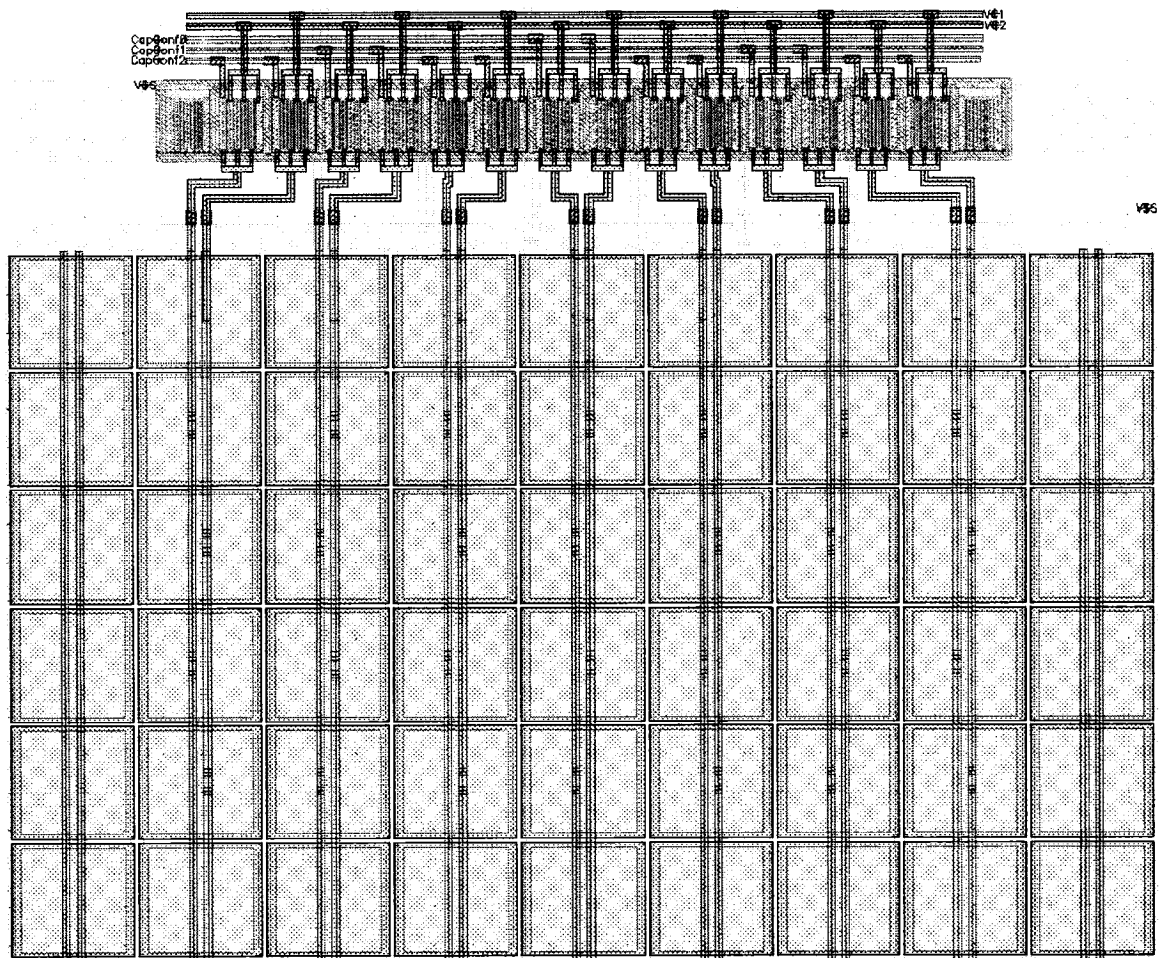


Figure A.3 Dessin de masque du CMFB





**Figure A.4 Dessin de masque du condensateur programmable**

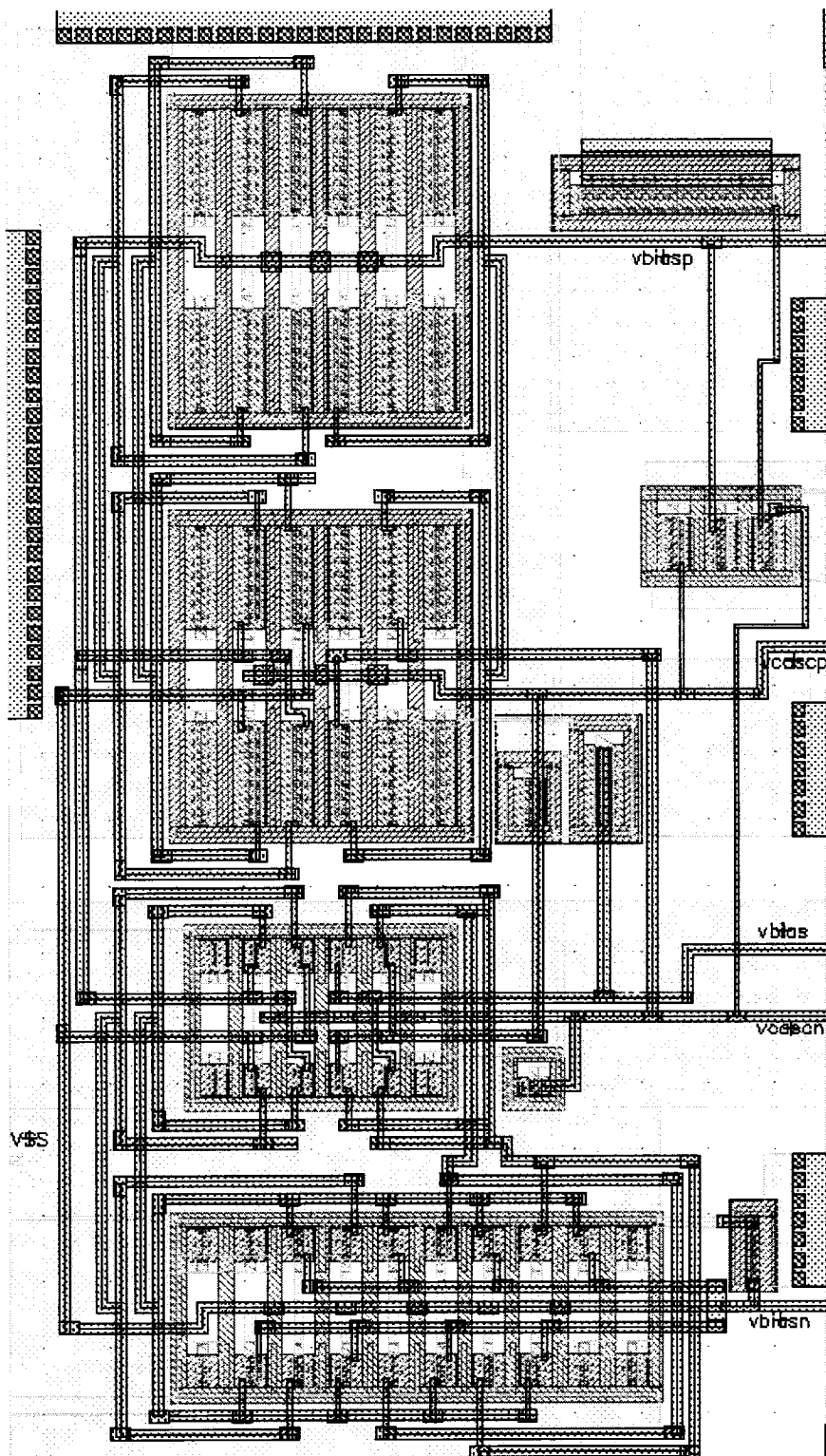


Figure A.5 Dessin de masque du circuit de polarisation

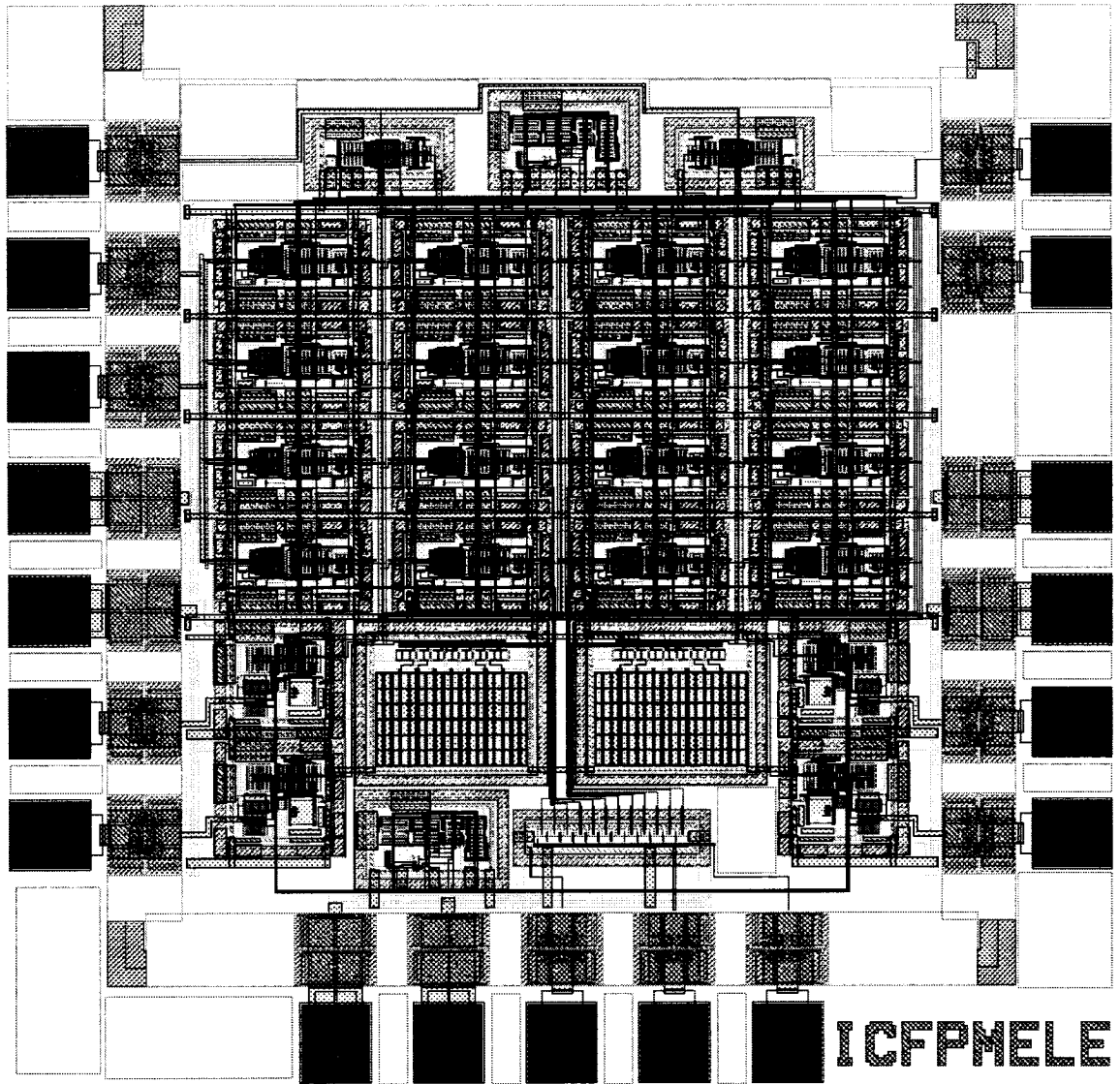


Figure A.6 Dessin de masque du circuit complet

## Annexe B

### Carte de test

Cette annexe montre le schéma électrique de la carte de test (séparé en deux figures pour une meilleure résolution) ainsi que les dessins de masque de son circuit imprimé (4 couches).

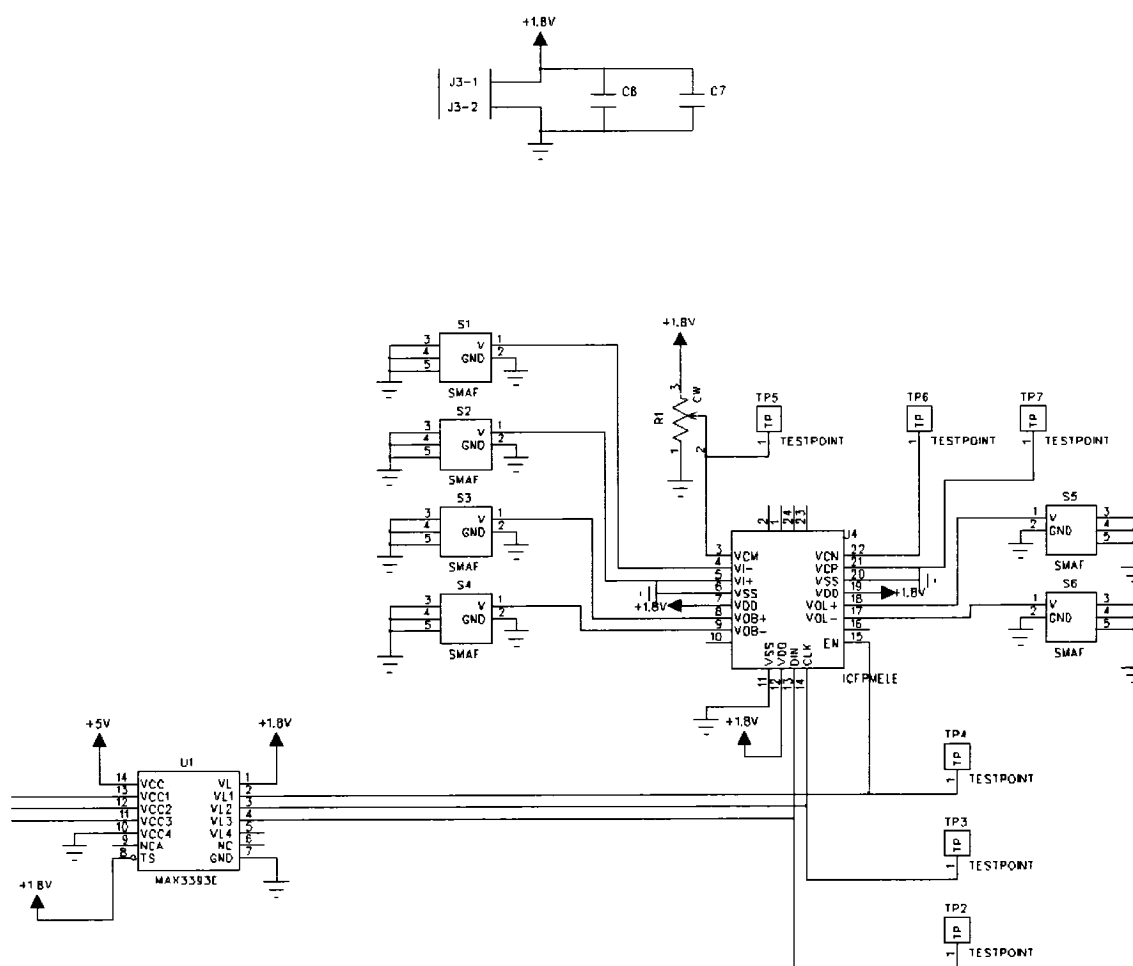


Figure B.1 Circuit de la carte de test (partie 1.8 V)



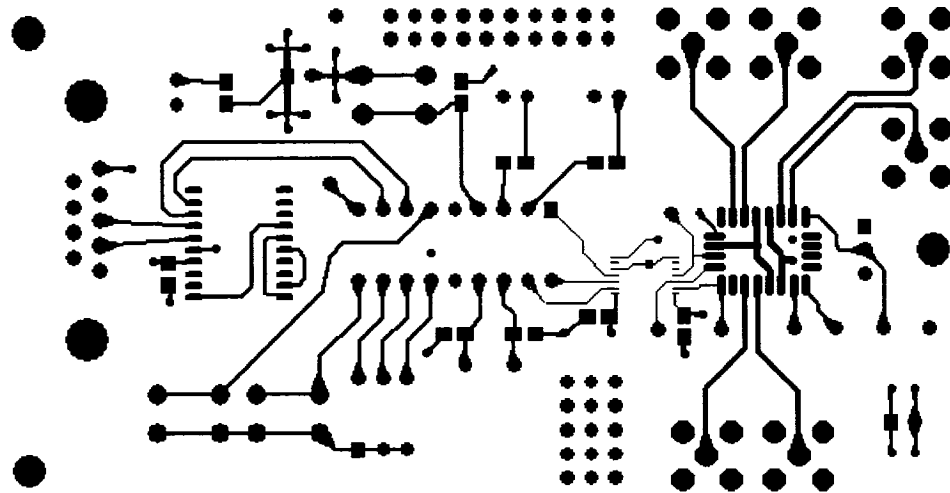


Figure B.3 Dessin de masque du circuit imprimé (couche supérieure)

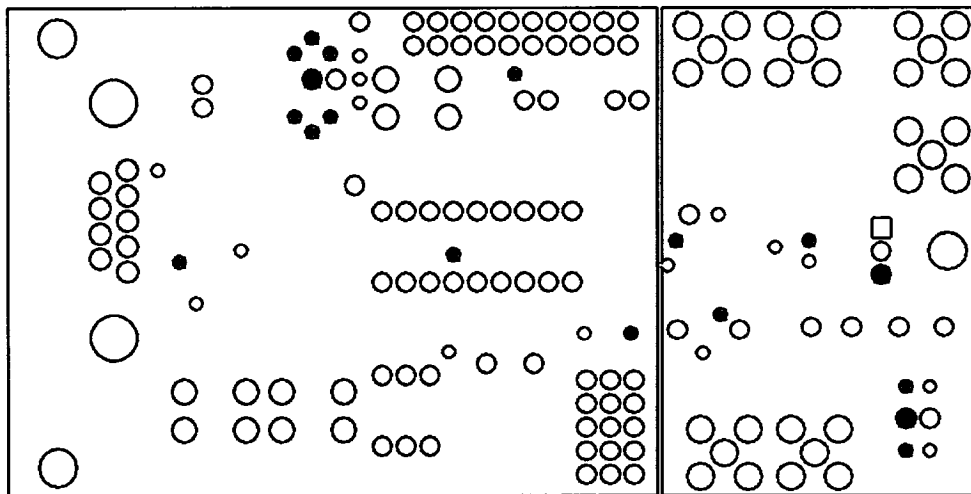


Figure B.4 Dessin de masque du circuit imprimé (couche VDD)

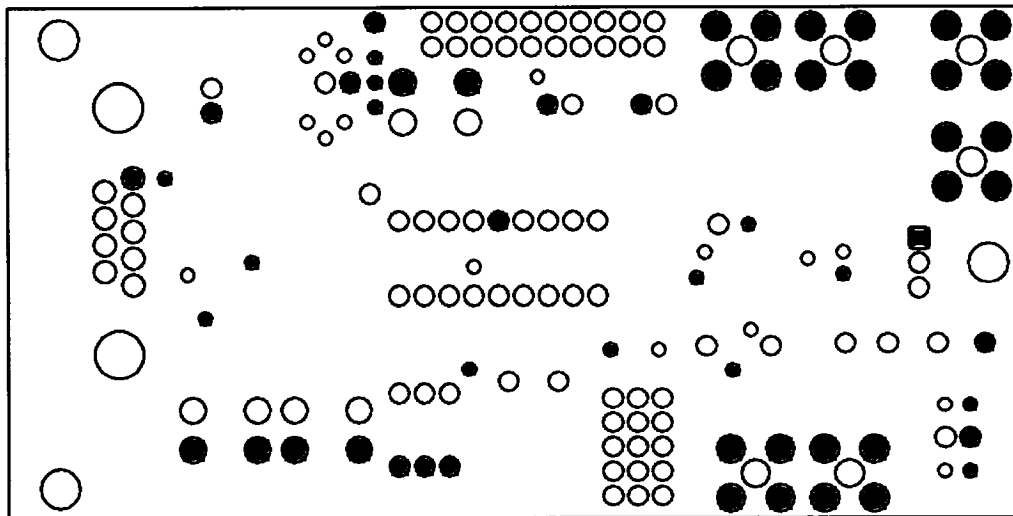


Figure B.5 Dessin de masque du circuit imprimé (couche VSS)

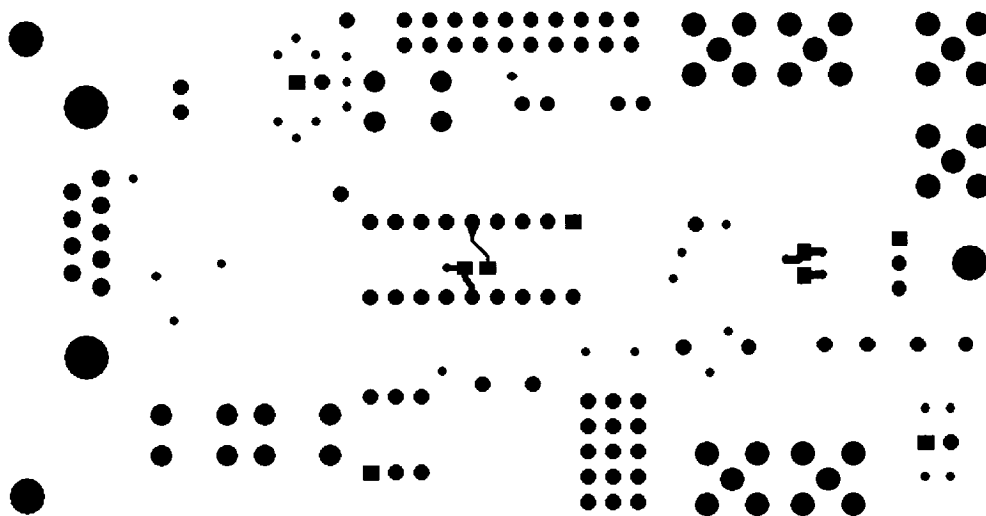


Figure B.6 Dessin de masque du circuit imprimé (couche inférieure)

## Annexe C

### Code du microcontrôleur

Cette annexe présente le code en assembleur du microcontrôleur Microchip PIC16F28 qui permettait de configurer le filtre programmable.

```

;*****
list    p=16f628
#include <p16f628.inc>
errorlevel -302
        _CONFIG_CP_OFF & _WDT_OFF & _BODEN_OFF & _PWRTE_ON & _MCLRE_ON &
        _LVP_OFF & _XT_OSC

;Definition des bits et des constantes

;***** Interface avec le IC
ChipPort    EQU    PORTA
ChipCLK     EQU    1
ChipEN      EQU    0
ChipDATA    EQU    2

;***** UART
SPBRG_VAL   EQU    .51    ;baud rate = 1200 pour horloge 4Mhz
RX_BUF_LEN  EQU    .32    ;taille du tampon circulaire

;***** LEDs
LEDport     EQU    PORTA
LEDgreen    EQU    3
LEDyellow   EQU    4

TestPoint   EQU    3

;***** INTERRUPTEURS
SwPort      EQU    PORTB
DipSw1      EQU    5
DipSw2      EQU    6
DipSw3      EQU    7
MomSw1      EQU    0
MomSw2      EQU    4
SwMask      EQU    b'10001111'

; Flags bits
ReceivedCR  EQU    0    ;indique <CR> a ete recu

```



```
;***** VARIABLES
```

```
                CBLOCK      0x70
```

```
w_temp
status_temp
fsr_temp
Flags
cntmsec
cntdelay
cnt
tempTx
```

```
char2
char1
char0
```

```
conflsb
confmsb
```

```
                ENDC
```

```
                CBLOCK      0x20
```

```
RxByteCount      ;number of bytes received
RxBuffer:RX_BUF_LEN ;receive data buffer
tempB0
cntHelp
                ENDC
```

```
-----
; Macros pour selection des banque de memoire
```

```
Bank0            MACRO                                ;macro to select data RAM bank 0
                  bcf     STATUS,RP0
                  ;bcf    STATUS,RP1
                  ENDM
```

```
Bank1            MACRO                                ;macro to select data RAM bank 1
                  bsf     STATUS,RP0
                  ;bcf    STATUS,RP1
                  ENDM
```

```
Bank2            MACRO                                ;macro to select data RAM bank 2
                  bcf     STATUS,RP0
                  bsf     STATUS,RP1
                  ENDM
```

```
Bank3            MACRO                                ;macro to select data RAM bank 3
                  bsf     STATUS,RP0
                  bsf     STATUS,RP1
                  ENDM
```

```

;***** EEPROM
    org h'2100'
conf0 de "204"
conf1 de "30C"
conf2 de "39C"
conf3 de "3FC"
conf4 de "E07"
conf5 de "F0F"
conf6 de "F9F"
conf7 de "FFF"

;*****
ORG 0x000 ; reset vector

    goto main ; aller au programme principal

ORG 0x004 ; interrupt vector location
retfie ; return (pas d'interruption)

Char2hex
;Table de conversion ascii a hex
ADDWF PCL
retlw H'0'
retlw H'1'
retlw H'2'
retlw H'3'
retlw H'4'
retlw H'5'
retlw H'6'
retlw H'7'
retlw H'8'
retlw H'9'
retlw H'0'
retlw H'0'
retlw H'0'
retlw H'0'
retlw H'0'
retlw H'0'
retlw H'0'
retlw H'0'
retlw H'0'
retlw H'0'
retlw H'0'
retlw H'A'
retlw H'B'
retlw H'C'
retlw H'D'
retlw H'E'
retlw H'F'
IF ((HIGH ($)) != (HIGH (Char2hex+1)))
    ERROR "string_table CROSSES PAGE BOUNDARY!"
ENDIF

;*****
;*****

```

; Programme principal

main

```

; compareurs desactives
movlw 0x07
movwf CMCON

```

```

; port A & B a 0
clrf  PORTA
clrf  PORTB

```

```

Bank1
movlw 0x00 ; Port A conf. en sorties
movwf TRISA

```

```

;initialiser port serie
call  SetupSerial

```

```

; Initialisation des compteurs
clrf TMR0
Bank1
movlw b'01010011'; ; TMR0 prescaler 1:16 + pull-up sur port B
movwf OPTION_REG

```

```

Bank0

```

```

; Sequence d'allumage affichee sur les LEDs
call  msec250
bsf  LEDport, LEDgreen
call  msec250
bcf  LEDport, LEDgreen

```

```

; Boucle principale
loop  call SwMon
call  ReceiveSerial
call  ProcessSerial
goto loop

```

```

;*****
;*****
; ROUTINES

```

```

SetupSerial:

```

```

    Bank1
    movlw 0xF7           ;Port B = sorties sauf RB3
    movwf TRISB
    movlw SPBRG_VAL     ;initialiser baud rate
    movwf SPBRG
    movlw 0x20          ;permettre transmission
    movwf TXSTA
    Bank0
    movlw 0x90          ;activer port serie
    movwf RCSTA
    clrf  Flags
    return

```

```

;*****
;*****

```

```

ReceiveSerial:

```

```

    Bank0
    btfss PIR1,RCIF     ; octet en attente?
    return              ; non

    ; Verification des flags d'erreur
    btfsc RCSTA,OERR
    goto  ErrSerialOverr
    btfsc RCSTA,FERR
    goto  ErrSerialFrame
    movlw RX_BUF_LEN
    xorwf RxByteCount,W
    btfsc STATUS,Z
    goto  ErrRxBufOver

```

```

ReceiveSer1:

```

```

    BANKISEL RxBuffer   ; adressage indirect
    movlw LOW RxBuffer  ; debut du tampon
    addwf RxByteCount,W ; position courante
    movwf FSR           ; placer pointeur FSR
    movf  RCREG,W       ; charger l'octet recu
    movwf INDF
    xorlw 0x0d          ;comparer avec <CR>
    btfsc STATUS,Z
    bsf  Flags,ReceivedCR ; <CR> recu
    xorlw 0x0d          ; restorer

    incf  RxByteCount,F ; incrementer nb d'octets recus
    return

```

```

;*****
;*****

```

```

; Gestion des erreurs du port serie

; Depassement du registre d'entree
ErrSerialOverr:
    ; repartir le port serie
    bcf    RCSTA,CREN
    bsf    RCSTA,CREN
    return

; Gestion d'une erreur de trame (ex. bit d'arret non present)
ErrSerialFrame:
    movf   RCREG,W    ; laisser tomber cette trame
    return

; Gestion d'une erreur de depassement du tampon
ErrRxBufOver:
    decf   RxByteCount,F ;decrement byte count to overwrite last
    goto  ReceiveSer1

; Gestion des interrupteurs
SwMon
    ; Eteindre l'horloge
    btfss  SwPort, MomSw2
    call   GoSleep

    btfsc  SwPort, MomSw1
    return

    ; Charger une config. en memoire EEPROM
    ; en fonction de la position des « dip switches »
    movf   SwPort, w
    movwf  cnt
    rrf    cnt, f
    rrf    cnt, f
    rrf    cnt, f
    rrf    cnt, f
    rrf    cnt, f
    comf   cnt, w
    andlw  b'00000111'
    call   CompAdrW
    call   LoadFromEEW

    call   msec250
    call   msec250
    call   msec250
    call   msec250

    return

```

;; Eteindre l'horloge du uC et afficher une sequence sur les LEDS  
GoSleep

```

call    msec250
bsf     LEDport, LEDgreen
call    msec250
bcf     LEDport, LEDgreen
call    msec250
bsf     LEDport, LEDgreen
call    msec250
bcf     LEDport, LEDgreen
sleep
call    msec250
bsf     LEDport, LEDgreen
call    msec250
bcf     LEDport, LEDgreen
return

```

; Traiter la commande recue  
ProcessSerial

```

;<CR> recu?
btfs    Flags,ReceivedCR
return

bcf     Flags, ReceivedCR      ; reset CR flag
clrf    RxByteCount           ; reset RXBuffer

movlw   0                      ; lire 1er caractere
call    GetRXBufChar

xorlw   'T'
btfs    STATUS,Z              ; caractere = T ?
goto    TestMode              ; oui
xorlw   'T'                    ; non: restore data

xorlw   'L'
btfs    STATUS,Z
goto    LoadMode
xorlw   'L'

xorlw   'E'
btfs    STATUS,Z
goto    StoreMode
xorlw   'E'

xorlw   'R'
btfs    STATUS,Z
goto    ReadMode
xorlw   'R'

xorlw   'T'
btfs    STATUS,Z
goto    LoadFromEE

```

```

xorlw  'I'

xorlw  'S'
btfsc STATUS,Z
goto   GoSleep
xorlw  'S'

xorlw  '?'
btfss STATUS,Z
goto   $ + 2
call   TxHelp

movlw  '?'           ; commande inconnue
call   TxW
movlw  D'13'
call   TxW
movlw  D'10'
call   TxW

return

```

; Controle des LEDs (pour ins de testt)

TestMode

```

movlw  1           ; lire 1er caractere
call   GetRXBufChar

xorlw  '1'
btfsc STATUS,Z    ; character = 1 ?
bcf    LEDport, LEDgreen
xorlw  '1'       ; restore data

xorlw  '2'
btfsc STATUS,Z
bsf    LEDport, LEDgreen
xorlw  '2'

return

```

;Chargement d'un config dans le circuit

LoadMode

```

movlw  1           ; lire 1er caractere
call   GetRXBufChar
movwf  char2

movlw  2
call   GetRXBufChar
movwf  char1

movlw  3
call   GetRXBufChar
movwf  char0

```

SetConf

; Convertir sequence ASCII en HEX

```

movlw D'48'
subwf char2, w
call Char2hex
movwf confmsb

```

```

movlw D'48'
subwf char1, w
call Char2hex
movwf conflsb
swapf conflsb, f

```

```

movlw D'48'
subwf char0, w
call Char2hex
iorwf conflsb, f

```

;Shift in dans le circuit

```

bsf LEDport, LEDgreen
bcf ChipPort, ChipEN
bcf ChipPort, ChipCLK

```

```

movlw D'8'
movwf cnt

```

ShiftLSB

```

btfss conflsb, 0
goto $+3
bsf ChipPort, ChipDATA
goto $+2
bcf ChipPort, ChipDATA

```

```

call microd
bsf ChipPort, ChipCLK ; CLK front montant
call microd
bcf ChipPort, ChipCLK ; CLK front descendant
rrf conflsb, f
decfsz cnt, f

```

goto

ShiftLSB

```

movlw D'4'
movwf cnt

```

ShiftMSB

```

btfss confmsb, 0
goto $+3
bsf ChipPort, ChipDATA
goto $+2
bcf ChipPort, ChipDATA
call microd
bsf ChipPort, ChipCLK ; CLK front montant
call microd
bcf ChipPort, ChipCLK ; CLK front descendant

```



```

                rrf    confmsb, f
                decfsz cnt, f
goto          ShiftMSB

                bsf    ChipPort, ChipEN
                bcf    ChipPort, ChipDATA
                call   msec250
                call   msec250
                bcf    LEDport, LEDgreen

                call   TxOK

                return

;; Memoriser 3 caracteres de config dans une espace de la EEPROM
StoreMode
                ; Calculer l'adresse EEPROM a partir de l'index donne
                call   CompAdr

StoreConf
                ; Sauver les 3 caracteres dans la EEPROM

Bank0
movlw 2          ; lire 1er chiffre
call  GetRXBufChar
Bank1
movwf EEDATA
call  WriteEE
movlw 3          ; lire 2e chiffre
call  GetRXBufChar
Bank1
movwf EEDATA
incf  EEADR, f
call  WriteEE
movlw 4          ; lire 3e chiffre
call  GetRXBufChar
Bank1
movwf EEDATA
incf  EEADR, f
call  WriteEE

                call   TxOK
                return

;; Recuperer 3 caracteres dans la EEPROM
ReadMode
                ; Calculer l'adresse EEPROM a partir de l'index donne
                call   CompAdr

TxConf
                Bank1
                ; Transmettre les 3 caracteres (sur port serie)
                call   ReadEEd

```

```

call    TxW
Bank1
incf    EEADR, f
call    ReadEEd
call    TxW
Bank1
incf    EEADR, f
call    ReadEEd
call    TxW
movlw   D'13'
call    TxW
movlw   D'10'
call    TxW
return

```

LoadFromEE

```

call    CompAdr
LoadFromEEW
; Recuperer 3 caracteres de l'EEPROM
Bank1
call    ReadEEd
movwf  char2
Bank1
incf    EEADR, f
call    ReadEEd
movwf  char1
Bank1
incf    EEADR, f
call    ReadEEd
movwf  char0

call    SetConf

return

```

CompAdr

```

; Calculer l'adresse EEPROM a partir de l'index donne
movlw  1
call   GetRXBufChar

movwf  cnt

Bank1
movlw  0
movwf  EEADR

movlw  D'48'

```

```

        subwf  cnt, f
        btfsc STATUS, Z
        return

add3:   movlw  3
        addwf EEADR, f
        decfsz cnt, f
        goto  add3

        return

```

### CompAdrW

```

        movwf  cnt

        Bank1
        movlw  0
        movwf  EEADR

        movf   cnt, f
        btfsc STATUS, Z
        return

add32:  movlw  3
        addwf  EEADR, f
        decfsz cnt, f
        goto  add32

        return

```

```

;*****
;*****
; Ecriture dans la EEPROM

```

### WriteEE

```

BSF      EECON1, WREN ; Permettre ecriture
BCF      INTCON, GIE ; Desactiver interruptions
MOVLW   0x55
MOVWF   EECON2 ; Ecrire 55h
MOVLW   0xAA ;
MOVWF   EECON2 ; Ecrire AAh
BSF      EECON1, WR ; WR bit = 1
BTFSC   EECON1, WR ; attendre
GOTO    $-1
BSF      INTCON, GIE ; Retablir les interruptions
Bank0
return

```

```

;*****
;*****
; Lecture dans la EEPROM

ReadEE
    Bank1
    movwf EEADR      ; Adresse a lire
ReadEEEd
    bsf    EECON1, RD ; Lire
    nop
    movf   EEDATA, W  ; W = EEDATA
    Bank0
    return

;*****
;*****

GetRXBufChar:
    movwf tempB0
    BANKISEL RxBuffer ; adressage indirect
    movlw LOW RxBuffer ; debut du tampon
    movwf FSR          ; dans pointeur FSR
    movf   tempB0, w
    addwf  FSR, f
    movf   INDF,W      ; W = caractere pris dans le tampon
    return

;*****
;*****
TxW      btfss   PIR1,TXIF      ; transmetteur occupe?
        goto    $-1            ; attendre qu'il se libere
        movwf  TXREG          ; transmettre
        return

TxOK
        movlw  'O'
        call  TxW
        movlw  'K'
        call  TxW
        movlw  D'13'
        call  TxW
        movlw  D'10'
        call  TxW
        return

;*****
;*****
;Delai

microd
movlw D'248'
micro4: addlw H'FF'      ; W = W - 1
btfss STATUS,Z        ; arreter si 0 atteint
goto micro4           ; boucler

```

```

return

;*** Delai de 250 ms ***
msec250:
movlw D'250'

;*** Delai de N ms ***
nmsec:
    movwf cntmsec        ; delai de N ms (dans W)
msecloop
    movlw D'248'        ; 1 usec
    call micro4         ; 995 usec
    nop                 ; 1 usec
    decfsz cntmsec,f    ; 1 usec, (2 au dernier)
    goto msecloop      ; 2 usec, loop = 995+5 = 1 msec
    return

;*****
;*****
;Transmettre l'aide
TxHelp
    CLRf    cntHelp
loopTx
    movlw  LOW helptab
    addwf  cntHelp, f
    movlw  HIGH helptab
    btfsc  STATUS, C
    addlw  1
    movwf  PCLATH
    MOVF  cntHelp,w
    CALL  helptab
    andlw  0xFF        ; w = 0?
    btfsc  STATUS,Z
    return
    btfss  PIR1,TXIF    ;transmetteur busy?check if transmitter busy
    goto  $-1          ;attendre qu'il se libère
    movwf  TXREG        ; et transmettre
    incf  cntHelp, f
    goto  loopTx
return

org    0x600
;Table AIDE (afficher si "?" est entre)
helptab
    ADDWF PCL, f
    dt "Commandes:", .13, .10
    dt "Lxxx Load config : L04D", .13, .10
    dt "S Sleep", .13, .10
    dt "Exyyy Store config in EEPROM space x: E104D", .13, .10
    dt "Rx Read EEPROM space x: R1", .13, .10
    dt "Ix Load config x from EEPROM: I1", .13, .10, 0
end

```