

**Titre:** Conception et réalisation d'un échantillonneur bloqueur à 14 bit et  
Title: 50 MÉ/S dédié à un CAN pipeline

**Auteur:** Younes Chouia  
Author:

**Date:** 2004

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Chouia, Y. (2004). Conception et réalisation d'un échantillonneur bloqueur à 14 bit  
Citation: et 50 MÉ/S dédié à un CAN pipeline [Master's thesis, École Polytechnique de  
Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/7353/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**  
Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/7353/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de  
recherche:** Mohamad Sawan, & Fadhel M. Ghannouchi  
Advisors:

**Programme:** Unspecified  
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CONCEPTION ET RÉALISATION D'UN ÉCHANTILLONNEUR BLOQUEUR À  
14 BIT ET 50MÉ/S DÉDIÉ À UN CAN PIPELINÉ

YOUNES CHOUIA

DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

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

DÉCEMBRE 2004



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: 0-494-01298-6*

*Our file* *Notre référence*

*ISBN: 0-494-01298-6*

#### 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 MONTREAL  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce Mémoire intitulé :

CONCEPTION ET RÉALISATION D'UN ÉCHANTILLONNEUR BLOQUEUR À 14  
BIT ET 50MÉ/S DÉDIÉ À UN CAN PIPELINÉ

Présenté par: Younes Chouia

En vue de l'obtention du diplôme de Maîtrise és Sciences Appliquées

Jury d'examen constitué de :

M. SAVARIA Yvon, Ph.D., Président

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

M. GHANNOUCHI Fadhel, Ph.D., membre et codirecteur

M. AUDET Yves, D.Sc.A., membre

*À mes Parents,  
à Nina et à toute ma Famille*

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier chaleureusement mon directeur de recherche Mohamad Sawan et mon codirecteur Fadhel Ghannouchi pour m'avoir proposé cette étude aussi enrichissante que diversifiée. Leurs précieux conseils ainsi que leurs aides technique, morale et financière, m'ont permis de mener à bien ma maîtrise.

Je souhaite également remercier le groupe des étudiants qui m'ont soutenu sans discontinuer.

Enfin, je souhaite remercier la Société Canadienne de Microélectronique (SCM) pour les outils de conception et simulation et pour la fabrication de circuit intégré, ainsi que le Conseil de recherche en sciences naturel et en génie du Canada (CRSNG) pour le support financier de ce projet.

# RÉSUMÉ

L'échantillonneur bloqueur (EB) frontal du CAN est un circuit fondamental du point de vue réduction des erreurs dynamiques, spécialement quand il s'agit des signaux d'entrée à haute fréquence. Une topologie de «condensateurs commutés» (Switched Capacitor-SC) a été utilisée pour la réalisation du circuit EB, malgré que cette technique n'est pas souhaitable dans les applications à basse consommation puisque la tension qui contrôle les commutateurs est insuffisante, c'est pour cette raison que la technique d'«amorçage» (bootstrapping) a été proposée afin de résoudre ce problème.

Basée sur la modélisation comportementale de chaque élément du circuit, et en utilisant le langage Verilog-A, une telle approche nous permet d'obtenir une meilleure optimisation du circuit, avec peu du temps de simulation.

Les résultats basés sur des simulations avec Cadence en utilisant les modèles de transistors de la technologie CMOS 0.18 $\mu$ m, et en introduisant les transistors natifs, montrent une résolution de 14 bits avec 7mW en consommation de puissance pour une

largeur de bande qui atteint 20MHz à un taux d'échantillonnage de 50MHz. Après l'implémentation du dessin des masques du circuit conçu, la simulation de ce dernier a montré une dégradation de seulement 2 bits pour avoir une résolution de 12 bits, ce qui reste dans les limites du bon fonctionnement du circuit.



## ABSTRACT

The front end sample and hold (SH) circuit used in ADCs is a fundamental component that reduce the in dynamic errors, especially with high frequency input signals.

A "switched capacitors" (SC) circuit topology was used in the realization of the SH circuit, although this technique is not desirable in low power applications, since the voltage that control the switches is insufficient. In order to avoid associated performance degradation the "bootstrapping" technique was proposed.

Based on the behavioral modeling of each element of the circuit, and by using the Verilog-A language, it was possible to better optimize the circuit with very fast simulations.

Results based on simulations with Cadence using transistors' models of the 0.18 $\mu$ m CMOS technology, and native transistors, gave a 14 bits resolution with a power consumption of 7mW and a bandwidth of 20MHz at a sampling rate of 50MHz.

Based on a layout implementation of the designed circuit, simulations of an extracted model showed a degradation of only 2 bit to end up with a 12 bits resolution, which remains within the limits of the needed operation of the circuit.

# TABLE DES MATIÈRES

|   |       |
|---|-------|
| DÉDICACE .....  | iv    |
| REMERCIEMENT .....  | v     |
| RÉSUMÉ .....  | vi    |
| ABSTRACT .....  | viii  |
| TABLE DES MATIÈRES .....                                  | x     |
| LISTE DES FIGURES .....                                   | xiv   |
| LISTE DES TABLEAUX .....                                  | xviii |
| LISTE DES ABRÉVIATIONS .....                              | xix   |
| LISTE DES ANNEXES .....                                   | xxi   |
| INTRODUCTION .....  | 01    |
| 1.1 Motivation .....                                      | 01    |
| 1.2 Organisation du mémoire .....                         | 03    |
| CHAPITRE 1 – LES CIRCUITS ÉCHANTILLONNEUR-BLOQUEURS ..... | 05    |
| 1.1 Principe de fonctionnement .....                      | 05    |

|  |    |
|--|----|
| 1.2 Analyse spectrale de l'échantillonnage .....                     | 08 |
| 1.3 Le bruit dans les circuits EB .....                              | 10 |
| 1.3.1 Le bruit thermique .....                                       | 10 |
| 1.3.2 Gigue de l'horloge d'échantillonnage .....                     | 12 |
| 1.3.3 Autres sources de bruit .....                                  | 12 |
| 1.4 Architectures des circuits EB.....                               | 13 |
| 1.4.1 Architectures à boucle ouverte .....                           | 13 |
| 1.4.2 Architectures à boucle fermée .....                            | 14 |
| 1.5 Exemples des circuits EB .....                                   | 16 |
| 1.5.1 Circuits EB à capacité de Miller .....                         | 16 |
| 1.5.2 Circuits EB à gain défini par le rapport des résistances ..... | 18 |
| 1.5.3 Circuits EB à gain défini par le rapport des capacités .....   | 19 |
| 1.5.4 Circuits EB sans la phase de remise à zéro .....               | 20 |
| CHAPITRE 2 – L'AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL .....                      | 24 |
| 2.1 Amplificateur à compensation de Miller .....                     | 25 |
| 2.2 Amplificateur cascode plié (folded) .....                        | 26 |
| 2.3 Amplificateur cascode télescopique .....                         | 27 |
| 2.3.1 Le bruit thermique .....                                       | 29 |
| 2.3.2 Le bruit de clignotement .....                                 | 30 |
| 2.3.3 Le gain DC .....   | 31 |
| 2.3.4 L'établissement linéaire .....                                 | 31 |
| 2.3.5 Le temps de réaction .....                                     | 34 |

|   |  |    |
|---|--|----|
| 2.3.6   | Rétroaction du mode commun .....                       | 34 |
| 2.3.7   | La polarisation .....                                  | 35 |
| 2.4   | La modélisation comportementale .....                  | 37 |
| CHAPITRE 3 – LES AUTRES BLOCS DU CIRCUIT EB ..... |  | 38 |
| 3.1   | L'injection de charge .....                            | 39 |
| 3.2   | La technique d'embase (bottom plate) .....             | 42 |
| 3.3   | La non-linéarité des commutateurs .....                | 44 |
| 3.3.1   | La linéarisation des commutateurs de base .....        | 45 |
| 3.3.2   | L'amorçage (boosting) de la grille .....               | 47 |
| 3.3.3   | L'amorçage (bootstrapping) simple du commutateur ..... | 49 |
| 3.3.4   | Le commutateur à double amorçage .....                 | 50 |
| 3.4   | La modélisation comportementale .....                  | 52 |
| 3.5   | Génération du signal d'horloge .....                   | 53 |
| 3.5.1   | La gigue .....   | 54 |
| 3.5.2   | Le circuit d'horloge .....                             | 55 |
| 3.5.3   | Les tampons de sortie .....                            | 56 |
| CHAPITRE 4 – METHODOLOGIE DE CONCEPTION .....     |  | 58 |
| 4.1   | L'amplificateur opérationnel .....                     | 59 |
| 4.1.1   | Le gain DC .....                                       | 60 |
| 4.1.2   | La fréquence du gain unitaire .....                    | 61 |
| 4.1.3   | Le temps de réaction .....                             | 61 |
| 4.1.4   | L'optimisation de l'amplificateur.....                 | 62 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.2 Les commutateurs .....                    | 67  |
| 4.3 L'horloge .....                           | 69  |
| 4.4 Dessin des masques .....                  | 73  |
| CHAPITRE 5 – IMPLÉMENTATION & RÉSULTATS ..... | 77  |
| 5.1 L'amplificateur opérationnel .....        | 78  |
| 5.2 Le commutateur à double amorçage .....    | 80  |
| 5.3 Le circuit EB .....                       | 83  |
| 5.4 Statut de la puce .....                   | 89  |
| CONCLUSION .....                              | 92  |
| BIBLIOGRAPHIE .....                           | 94  |
| ANNEXES .....                                 | 101 |

## LISTE DES FIGURES

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Figure I-1  | Conversion AN directe du signal RF .....  | 02 |
| Figure 1-1  | Les sorties des différents circuits EB .....  | 06 |
| Figure 1-2  | Spécifications dans le domaine du temps .....   | 07 |
| Figure 1-3  | Échantillonnage dans le domaine du temps .....  | 08 |
| Figure 1-4  | Exemple d'échantillonnage d'un signal .....   | 09 |
| Figure 1-5  | Exemple du sous-échantillonnage d'un signal .....   | 09 |
| Figure 1-6  | Modèle du bruit thermique introduit par le commutateur de l'EB .....                        | 10 |
| Figure 1-7  | (a) Symbole d'un circuit EB. (b) Son utilisation pratique.....                              | 14 |
| Figure 1-8  | Circuit EB simple avec rétroaction.....   | 15 |
| Figure 1-9  | Circuit EB à condensateurs commutés .....   | 15 |
| Figure 1-10 | Circuit EB à capacité de Miller .....   | 17 |
| Figure 1-11 | Circuit EB à gain défini par le rapport des résistances.....                                | 18 |
| Figure 1-12 | Circuit EB à gain défini par le rapport des capacités .....                                 | 19 |
| Figure 1-13 | La moitié d'un circuit EB complètement différentiel sans la phase de remise<br>à zéro ..... | 21 |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Figure 1-14 | L'architecture adoptée pour le circuit EB.....  | 23 |
| Figure 2-1  | Amplificateur à deux étages avec la compensation de Miller .....  | 26 |
| Figure 2-2  | Amplificateur cascode plié (folded) .....   | 27 |
| Figure 2-3  | Amplificateur opérationnel cascode télescopique.....  | 28 |
| Figure 2-4  | Le modèle petit signal du bruit thermique d'un transistor simple à source commune.....                                    | 29 |
| Figure 2-5  | Le modèle petit signal d'un l'amplificateur cascode télescopique à deux étages .....                                      | 32 |
| Figure 2-6  | Le circuit de rétroaction du mode commun pour le premier étage de l'amplificateur.....                                    | 35 |
| Figure 2-7  | Le circuit de polarisation de l'OTA .....   | 36 |
| Figure 2-8  | Le circuit cascode de polarisation interne de l'OTA .....   | 36 |
| Figure 2-9  | Modèle petit signal (small signal) d'un amplificateur .....   | 37 |
| Figure 3-1  | EB en MOS: (a) circuit simple (b) circuit RC équivalent.....  | 39 |
| Figure 3-2  | Circuit EB simple .....   | 40 |
| Figure 3-3  | Circuit EB avec un «dummy» .....  | 42 |
| Figure 3-4  | Un exemple d'une architecture en boucle fermée où le commutateur d'échantillonnage fonctionne avec une tension fixe ..... | 43 |
| Figure 3-5  | Échantillonnage avec «embase» (bottom-plate) .....  | 43 |
| Figure 3-6  | La résistante-ON d'un commutateurs NMOS en fonction du niveau du signal.....  | 47 |
| Figure 3-7  | Commutateur MOS avec le circuit local d'«amorçage» (boosting) de la   |    |



|             |  |    |
|-------------|--|----|
|             | tension de grille .....  | 48 |
| Figure 3-8  | Un autre circuit local d'«amorçage» (boosting) de grille pour un commutateur MOS .....                                       | 48 |
| Figure 3-9  | Un commutateur «amorcé» (bootstrapped) (a) ouvert (b) fermé .....  | 49 |
| Figure 3-10 | Un commutateur amorcé fiable à long terme .....  | 50 |
| Figure 3-11 | Un commutateur à double amorçage .....   | 51 |
| Figure 3-12 | Le modèle du commutateur utilisé .....   | 52 |
| Figure 3-13 | Les signaux d'horloge utilisés dans le circuit EB .....  | 55 |
| Figure 3-14 | Le circuit d'horloge utilisé dans l'EB .....   | 56 |
| Figure 4-1  | L'architecture du circuit EB.....  | 59 |
| Figure 4-2  | L'amplificateur utilisé pour concevoir l'EB .....  | 60 |
| Figure 4-3  | Circuit de polarisation de l'amplificateur.....  | 64 |
| Figure 4-4  | Caractéristiques fréquentielles de l'amplificateur.....  | 65 |
| Figure 4-5  | Taux de réaction de l'amplificateur .....  | 66 |
| Figure 4-6  | Temps de stabilisation de l'amplificateur.....   | 66 |
| Figure 4-7  | Commutateur utilisé: (a) transistor NMOS, (b) modèle Verilog-A .....   | 68 |
| Figure 4-8  | Signal de sortie de l'EB en remplaçant le commutateur $S(\Phi_2)$ par (a) un transistor normal (b) un transistor natif ..... | 70 |
| Figure 4-9  | Les signaux d'horloge utilisés dans le circuit EB .....  | 71 |
| Figure 4-10 | Paramètres temporels des signaux d'horloge.....  | 71 |
| Figure 4-11 | Simulation de signaux d'horloge.....   | 72 |
| Figure 4-12 | Transition simulée de signaux d'horloge .....  | 72 |

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Figure 4-13 | Anneaux d'armature des transistors .....   | 74 |
| Figure 4-14 | Assortiment (matching) des transistors .....   | 74 |
| Figure 4-15 | Assortiment des condensateurs .....  | 75 |
| Figure 5-1  | Simulation de la réponse en fréquence du dessin de masques de<br>l'amplificateur.....  | 79 |
| Figure 5-2  | Dessin des masques de l'amplificateur utilisé .....  | 80 |
| Figure 5-3  | Commutateur à double amorçage .....  | 81 |
| Figure 5-4  | Dessin de masques du commutateur à double amorçage.....  | 81 |
| Figure 5-5  | Simulation du commutateur (entrée et sortie)à double<br>amorçage (a) schématique, (b) dessin des masques .....   | 82 |
| Figure 5-6  | Dessin de masques de l'EB proposé.....   | 84 |
| Figure 5-7  | FFT du signal de sortie de l'EB avec un commutateur NMOS<br>à l'entrée.....  | 85 |
| Figure 5-8  | FFT du signal de sortie de l'EB avec une porte de transmission<br>à l'entrée .....   | 86 |
| Figure 5-9  | FFT du signal de sortie de l'EB avec un commutateur à<br>amorçage simple .....   | 86 |
| Figure 5-10 | FFT du signal de sortie de l'EB avec un commutateur à double amorçage<br>pour. (a) une fréquence d'entrée de 20MHz, (b) une fréquence d'entrée de<br>100KHz..... | 88 |
| Figure 5-11 | FFT du signal de sortie de l'EB implémenté .....   | 89 |
| Figure 5-12 | la puce du CAN envoyée pour fabrication.....   | 90 |

## LISTE DES TABLEAUX

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Tableau 4-1 | Directives d'optimisation .....  | 62 |
| Tableau 4-2 | Valeurs des tensions VDS des transistors de l'amplificateur.....                               | 62 |
| Tableau 4-3 | Les dimensions des différents dispositifs de l'amplificateur .....                             | 63 |
| Tableau 4-4 | Tensions de polarisations de l'amplificateur.....  | 64 |
| Tableau 4-5 | Optimisation des commutateurs (modèles Verilog-A).....   | 68 |
| Tableau 4-6 | Adaptation du circuit avec des transistors (CMOS 0.18 $\mu$ m).....                            | 69 |
| Tableau 5-1 | Résultats des performances de l'EB avec les différents types de<br>commutateurs utilisés ..... | 87 |

# LISTE DES ABRÉVIATIONS

|      |   |
|------|---|
| ADC  | Analog to Digital Converter                         |
| AN   | Analogique Numérique                                |
| BW   | BandWidth   |
| CAN  | Convertisseur Analogique Numérique                  |
| CMFB | Common Mode FeedBack                                |
| CMOS | Complementary Metal-Oxyde Semiconductor             |
|      | Taux de rejet du mode commun (Common Mode Rejection |
| CMRR | Ratio)  |
| EB   | Échantillonneur Bloqueur                            |
| ENOB | Effective Number Of Bits                            |
| FFT  | Fast Fourier Transform                              |
| GBW  | Gain BandWidth                                      |
| L    | Length  |
| LSB  | Least Significant Bit                               |

|      |  |
|------|--|
| MS   | Main Switch  |
| NMOS | Negatively doped Metal-Oxide Semiconductor                     |
| OTA  | Operational Transconductance Amplifier                         |
| PMOS | Positively doped Metal-Oxide Semiconductor                     |
| PSSR | Taux de rejet des alimentations (Power Supply Rejection Ratio) |
| RF   | Radio Frequency  |
| RMS  | Root Mean Square   |
| SC   | Switched Capacitor   |
| SCM  | Société Canadienne de Microélectronique                        |
| SFDR | Spurious Free Dynamic Range                                    |
| SH   | Sample and Hold  |
| SNDR | Signal to Noise and Distortion Ratio                           |
| SNR  | Signal to Noise Ratio  |
| SOC  | System On Chip   |
| SR   | Slew Rate  |
| W    | Width  |

## **LISTE DES ANNEXES**

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| ANNEXE A | DÉFINITIONS DES PERFORMANCES DE L'EB ..... | 101 |
| ANNEXE B | PROGRAMMES EN VERILOG-A .....              | 103 |

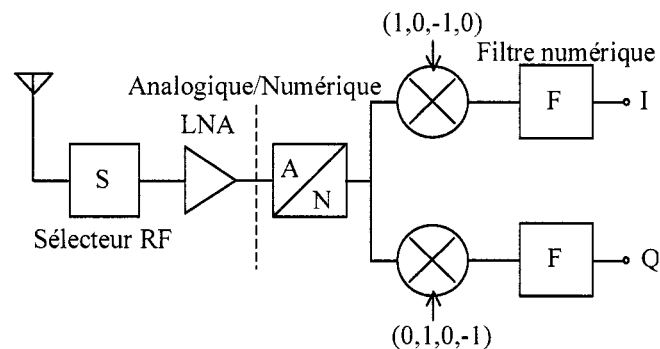
# INTRODUCTION

## I.1 Motivation

La communication sans-fil a été un domaine très actif pendant la dernière décennie, là où la tendance d'avoir plus de performances est basée sur l'utilisation d'une largeur de bande et d'un rapport signal/bruit (signal-to-noise ratio-SNR) plus élevés.

En même temps, les architectures des radios, dans beaucoup d'applications, évoluent vers la radio à base de logiciel, dont l'une des caractéristiques principales est le décalage de la frontière analogique/numérique plus près de l'antenne comme le montre la figure 1-1. En raison de ces tendances, il y a un besoin urgent de convertisseurs de données avec des taux de conversion et de résolution élevés. Une partie de cette mise à niveau nécessaire des performances vient avec l'évolution de la technologie. Le niveau croissant d'intégration mène à des systèmes avec moins de puces, le but final étant simplement une seule puce, le système sur puce (system-on-chip-SoC). Ceci signifie que les circuits analogiques et numériques doivent être intégrés sur la même matrice de silicium, ce qui apporte des défis additionnels dans la conception de circuits analogiques et numériques.

Ces tendances influencent les caractéristiques des convertisseurs analogique/numérique (CAN) dans les récepteurs radios, le but final étant un récepteur avec un CAN connecté directement au signal RF, cependant, ceci exigerait un CAN avec un taux d'échantillonnage dans l'ordre des fréquences RF d'entrée, qui peuvent monter à plusieurs giga Hertz, et d'une gamme dynamique capable de traiter des signaux avec des amplitudes de l'ordre de nano volt en présence de fortes interférences.



**Figure I-1.** Conversion AN directe du signal RF.

L'échantillonneur bloqueur (EB) frontal est un bloc fondamental dans les CAN. Son utilisation permet aux erreurs dynamiques des CAN d'être réduites, particulièrement celles qui apparaissent avec les signaux d'entrée à haute fréquence. D'autre part, puisque la gamme dynamique du convertisseur entier ne peut jamais excéder celle de l'EB frontal, les performances de ce dernier sont cruciales.

Le but de ce projet est de concevoir un EB frontal, pour être utilisé dans un CAN pipiné à 10 bit de résolution et possédant une fréquence d'échantillonnage de 50MHz. Il est conçu dans un procédé  $0.18\mu\text{m}$  CMOS, qui tolère seulement une tension d'alimentation de 1.8Volts.



Les considérations principales de conception sont de réduire au minimum la consommation de puissance, pour augmenter au maximum le rapport signal/bruit (signal-to-noise-ratio-SNR). Ce dernier peut être augmenté en réduisant les non linéarités des commutateurs utilisés, qui représentent la partie la plus importante dans le circuit du point de vue bruit, puisque le circuit peut être utilisé dans un émetteur récepteur mobile.

L'outil de programmation analogique Verilog-A est utilisé pour permettre une meilleure optimisation du circuit afin d'atteindre les performances spécifiées sans pour cela utiliser une grande surface.

## **I.2 Organisation du mémoire**

Ce mémoire est divisé en trois parties. La première, constituée du chapitre 1, qui introduit la théorie de l'échantillonneur bloqueur (EB), les différents paramètres intervenants, leurs sources d'imperfections et les architectures commune pour réaliser ces circuits. De plus, nous ferons un survol de la revue de littérature par le biais des principales publications récentes qui traitant le sujet.

La seconde partie, constituée des chapitres 2 et 3, traite les différents blocs de l'EB qui vont être utilisés dans le circuit à concevoir, l'amplificateur, les commutateurs et le générateur d'horloges. Le chapitre 2 est relatif aux choix de l'amplificateur opérationnel à utiliser dans l'EB et nous analysons sa théorie de fonctionnement afin d'avoir un compromis entre la puissance, le gain et la fréquence unitaire, à la fin on explique le modèle comportemental de ce bloc en Verilog-A. Nous discutons au chapitre 3 les commutateurs, leurs imperfections, et les différentes techniques pour les maîtriser. Nous

présentons aussi le modèle comportemental de ce bloc en Verilog-A. Nous traitons enfin la génération des horloges, et d'un facteur important qui est associé à savoir le non chevauchement de ses phases, qui doit être délicatement respecté.

La dernière partie, constituée des chapitres 4 et 5, traite de l'environnement de conception de l'EB, qui a fait l'objet de ces travaux. Dans le chapitre 4 les différentes étapes de conception sont présentées et expliquées. Le chapitre 5 présente les résultats finaux et les commentaires. Finalement, quelques conclusions faites pendant la conception sont présentées, aussi bien que quelques suggestions pour de futures améliorations.

Le mémoire se termine par les annexes où se trouvent la définition des différentes performances de l'EB, ainsi que les codes des blocs qui ont été conçus en Verilog-A.

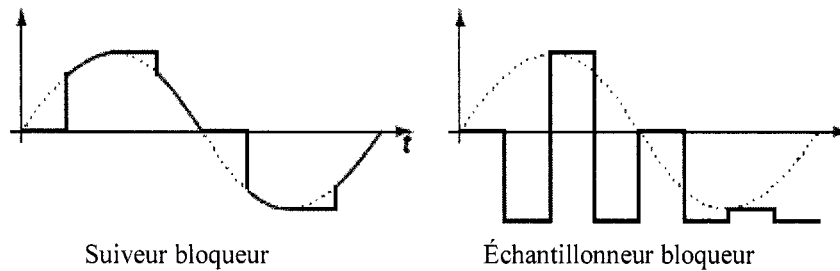
## **CHAPITRE 1**

# **LES CIRCUITS ÉCHANTILLONNEUR-BLOQUEURS**

### **1.1 Principe de fonctionnement**

La fonction principale de l'échantillonneur bloqueur (EB) est de prendre des échantillons du signal d'entrée et de les faire tenir sur la sortie pour une certaine période de temps. En général, les échantillons sont pris à intervalles uniformes de temps; ainsi, le taux d'échantillonnage du circuit peut être déterminé. Le fonctionnement d'un circuit EB peut être divisé en mode d'échantillonnage (parfois référé comme mode d'acquisition) et mode de blocage, dont les durées n'ont pas besoin d'être égales. En mode de blocage, la sortie du circuit est égale à la valeur précédemment prélevée de l'entrée. En mode d'échantillonnage, la sortie peut suivre l'entrée, dans ce cas le circuit s'appelle suiveur bloqueur, ou elle peut être remise à une certaine valeur fixe. Dans quelques circuits, la sortie est tenue au cours de toute la période de l'horloge d'échantillonnage comme le

montre la figure 1-1. Ceci est réalisé en ayant des circuits séparés pour effectuer les opérations d'échantillonnage et de blocage.



**Figure 1-1.** Les sorties des différents circuits EB.

Les spécifications les plus communes utilisées pour les circuits EB sont brièvement présentées dans le reste de cette section. L'importance de chaque paramètre par rapport à un autre dépend considérablement de l'application du circuit EB. Pour entièrement caractériser un circuit EB, des paramètres dans le domaine du temps et dans le domaine des fréquences doivent être définis.

- *Temps d'acquisition*: c'est le temps entre la commande de commutation du mode de blocage au mode d'échantillonnage jusqu'au moment où le circuit est prêt à prendre un nouvel échantillon (Fig. 1-2). Le temps d'acquisition est l'un des paramètres qui définit le taux maximum d'échantillonnage réalisable.
- *Temps d'ouverture* (ou le *décalai d'ouverture*): c'est le temps fixe entre la commande d'échantillonnage jusqu'au moment où la prise de l'échantillon est considérée réellement. La variation aléatoire du moment d'échantillonnage est connue comme l'*incertitude d'ouverture* ou la *gigue (jitter) d'ouverture*.
- *Temps de stabilisation du mode de blocage*: ce paramètre détermine le temps à partir du moment d'échantillonnage jusqu'au moment où la valeur du signal de sortie du

circuit s'établit à sa valeur d'état d'équilibre. Si le circuit EB est utilisé devant un CAN, ce dernier peut numériser la valeur du signal de sortie du circuit EB produite à ce moment. Le temps de stabilisation du mode de blocage a un impact important sur le taux maximum d'échantillonnage de l'EB.

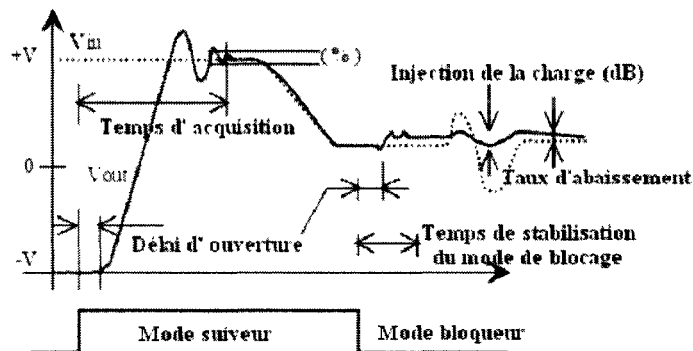


Figure 1-2. Spécifications dans le domaine du temps.

- *Taux d'abaissement*: une fuite sur le signal de sortie peut se produire en mode de blocage. Le changement de la sortie qui résulte de ce fait est spécifié par le *taux d'abaissement*.
- *pas de blocage* (ou *l'erreur piédestal*): il est habituellement défini pour les circuits suiveur-bloqueurs. C'est la différence entre les valeurs de la sortie à la fin du mode suiveur et celle pendant le mode de blocage. Le piédestal peut être dépendant du signal et produire ainsi une déformation harmonique.
- *Erreur de gain*: habituellement, les circuits EB ont un gain unitaire (c.-à-d. l'amplitude du signal de sortie est égale à l'amplitude du signal d'entrée), mais d'autres valeurs de gain peuvent être aussi bien employées. *L'erreur de gain* détermine la déviation du gain à partir de la valeur nominale.

- *Gamme dynamique*: c'est la différence en décibels entre la tension d'entrée maximale permise et la tension d'entrée minimale qui peut être prélevée avec un niveau d'exactitude indiqué.

En plus de ces spécifications dans le domaine du temps, nous avons introduit en annexe-A celles du domaine des fréquences.

## 1.2 Analyse spectrale de l'échantillonnage

Un circuit EB idéal prend des échantillons d'un signal d'entrée à intervalles uniformes  $T$ . Dans le domaine du temps, ceci correspond à multiplier le signal avec un train d'impulsions (équation 1-1).

$$y(t) = x(t) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT) \quad (1-1)$$

Où le  $\delta(t)$  représente la fonction delta de Dirac. Le résultat est un train d'impulsions dont les valeurs correspondent aux valeurs instantanées du signal d'entrée (Fig. 1-3). Le spectre du signal prélevé (équation 1-2) est une convolution du spectre d'entrée et du spectre du train d'impulsions, qui est également un train d'impulsions.

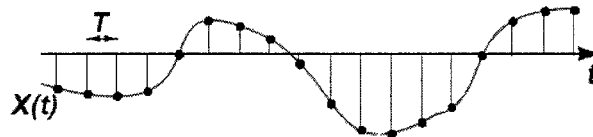


Figure 1-3. Échantillonnage dans le domaine du temps.

$$Y(f) = X(f) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{T} \delta\left(f - \frac{n}{T}\right) \quad (1-2)$$

Ceci est illustré sur la figure 1-4, où  $f_s$  est la fréquence d'échantillonnage et  $B$  est la largeur de bande du signal à échantillonner. Le spectre résultant est le spectre original

plus un nombre infini d'images du même spectre centré aux multiples de la fréquence d'échantillonnage. La figure montre également que, tant que la largeur de bande du signal d'entrée est moins que la moitié de la fréquence d'échantillonnage, les images ne recouvrent pas et le signal original peut être reconstitué ainsi par le filtrage.

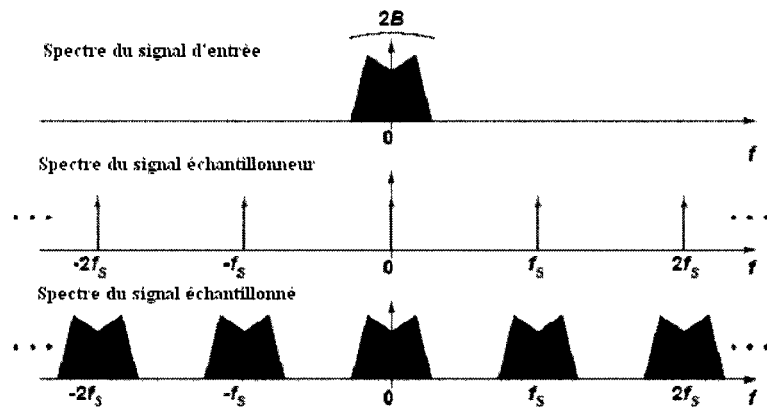


Figure 1-4. Exemple d'échantillonnage d'un signal.

Si cette condition (connue par le critère de Nyquist) n'est pas assurée, une partie du spectre d'image sera chevauché avec la bande désirée du signal, causant une déformation irréversible. Pour cette raison, le signal d'entrée doit habituellement être à bande limitée avant l'échantillonnage, afin d'éviter le chevauchement des autres signaux en dehors du signal désiré. En cas de sous-échantillonnage, le chevauchement est utilisé pour échantillonner les signaux à bande étroite et à haute fréquence (Fig. 1-5).

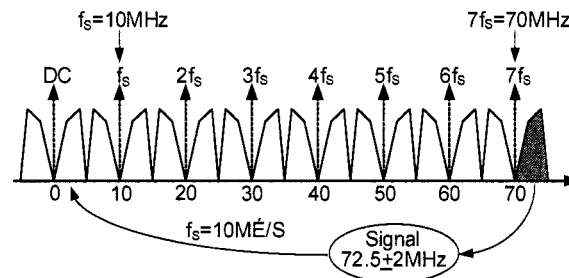


Figure 1-5. Exemple du sous-échantillonnage d'un signal.

## 1.3 Le bruit dans les circuits EB

### 1.3.1 Le bruit thermique

Les circuits d'échantillonnage regroupent généralement au moins un commutateur et un condensateur comme illustré à la figure 1-6. Le commutateur (dans l'état fermé) a toujours une résistance finie qui produit du bruit thermique.

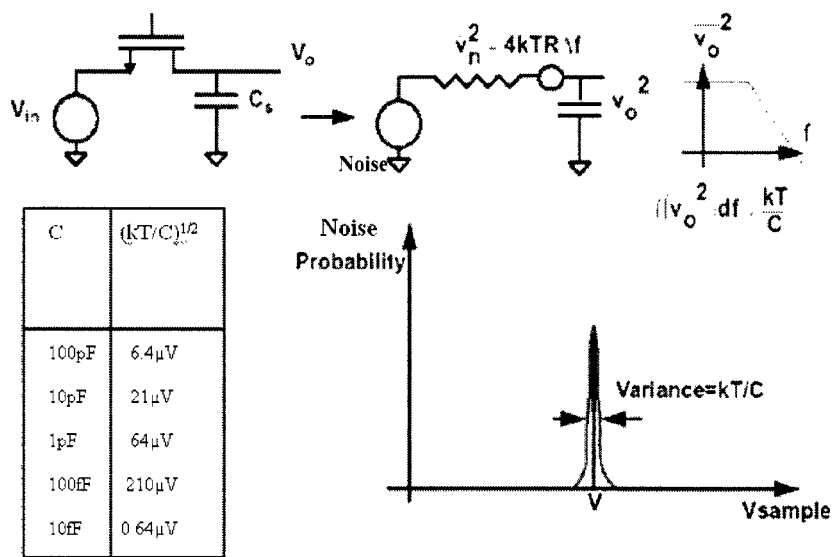


Figure 1-6. Modèle du bruit thermique introduit par le commutateur de l'EB (tiré de [10]).

La densité spectrale de puissance de ce bruit est donnée par:

$$\delta = 4kTRV^2 \text{ (Hz)} \quad (1-3)$$

où  $k$  est la constante de Boltzmann,  $T$  est la température absolue, et  $R$  est la résistance du commutateur dans l'état fermé. Le bruit dans l'échantillon de tension ( $\sigma^2$ ) est le bruit dans une résistance filtré par le circuit du filtre passe-bas constitué par le condensateur d'échantillonnage et la résistance du commutateur.



Ce processus de filtrage conduit à une puissance de bruit exprimée par:

$$\begin{aligned}
 \sigma^2 &= 4kTR \int_0^{\infty} \frac{1}{1+(f2\pi RC)^2} df \\
 &= \frac{4kTR}{(2\pi RC)^2} \Big|_0^{\infty} 2\pi RC \arctan(f2\pi RC) \\
 &= \frac{kT}{C}
 \end{aligned} \tag{1-4}$$

Ces résultats démontrent que la puissance du bruit thermique est proportionnelle au facteur  $kT/C$ . Un point intéressant est que la tension de bruit ne dépend pas de la valeur de la résistance du commutateur, et le seul paramètre qui peut être ajusté pour lutter contre le bruit est ainsi la valeur du condensateur d'échantillonnage. Bien que la largeur de bande désirée du signal est en général au moins un ordre de grandeur plus petite que la largeur de bande du bruit du circuit d'échantillonnage, le bruit échantillonné est encore déterminé par l'équation (1-4). Dans les CAN, une condition commune est que la puissance de bruit thermique soit plus petite que la puissance du bruit de quantification (qui est égale à  $V_{LSB}^2/12$ ) [16]. Ceci fixe la plus basse limite pour la valeur  $C$  du condensateur tel que montré à l'équation (1-5).

$$C > \frac{kT \cdot 12}{V_{LSB}^2} = \frac{kT \cdot 12}{V_{EM}^2 / 2^{2N}} \tag{1-5}$$

Où  $N$  est le nombre de bits et  $V_{EM}$  la tension correspondant à l'échelle maximum du CAN. Parfois la condition est plus rigoureuse, permettant seulement 1 dB de dégradation du SNR. Selon l'équation (1-5), dans le cas où la tension a une valeur maximale de 1-volt, les valeurs du condensateur exigées pour une résolution de 10 et 16 bits sont de 0.052 pF

et 210 pF respectivement. Notons que la valeur de condensateur minimale requise pour la résolution de 16 bits est trop grande pour l'intégration sur une puce. Pour surmonter ceci, le sur-échantillonnage est une solution efficace pour les applications à haute résolution. Dans ce cas, la taille du condensateur peut être réduite linéairement avec le rapport de sur-échantillonnage.

### 1.3.2 Gigue de l'horloge d'échantillonnage

La variation aléatoire de l'instant de l'échantillonnage est connue sous le nom de gigue (jitter). Elle provient notamment du bruit de phase du générateur de l'horloge et du bruit du circuit d'échantillonnage. Comment la gigue est transformée en une erreur d'amplitude dans les tensions échantillonnées, elle peut être expliquée comme suit : l'erreur dans la tension échantillonnée est égale au changement de la tension d'entrée entre l'instant d'échantillonnage idéal et l'instant d'échantillonnage réel. Le changement de tension est proportionnel à la gigue et au taux de changement du signal d'entrée (dérivée). Pour une entrée sinusoïdale, la dérivée est la fonction de cosinus multipliée par la fréquence, qui signifie que l'erreur de tension est proportionnelle à la fréquence et à l'amplitude du signal d'entrée.

$$\delta V = \frac{dV}{dt} \Delta t = 2\pi f V \quad (1-6)$$

### 1.3.3 Autres sources de bruit

La plupart des circuits EB ont besoin d'un tampon ou d'un amplificateur. Il est nécessaire en mode de blocage. Les sources de bruit internes des amplificateurs utilisés s'ajoutent en

puissance au bruit thermique du commutateur dans son état fermé. Dans l'échantillonnage passif, le bruit est à bande limitée par la constante de temps RC du circuit d'échantillonnage. Quand un amplificateur contribue à la fonction de transfert du circuit, ce qui est habituellement le cas en mode de blocage et, aussi en mode d'échantillonnage, sa largeur de bande finie est susceptible d'être le facteur dominant qui vient limiter la bande passante de l'échantillonneur. En plus du bruit blanc, les circuits d'EB souffrent également du bruit «flicker» ou  $1/f$ . Cependant, dans les applications à haute vitesse (une fréquence d'horloge de plusieurs mégahertz), le bruit blanc domine typiquement.

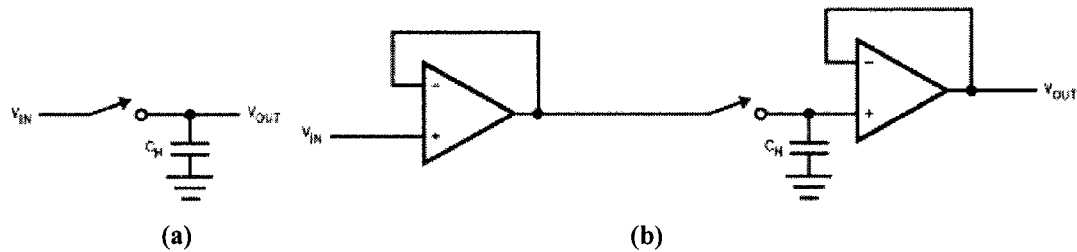
## **1.4 Architectures des circuits EB**

Les architectures des circuits EB peuvent être divisées en ceux à boucle ouverte et d'autres à boucle fermée. La différence principale entre les deux catégories c'est que dans les architectures à boucles fermées, le condensateur, sur lequel la tension est échantillonnée, est enfermée dans une boucle de rétroaction, au moins en mode de blocage.

### **1.4.1 Architectures à boucle ouverte**

Le circuit EB le plus simple se compose d'un commutateur et d'un condensateur comme il est illustré sur la figure 1-7a. En mode d'échantillonnage, le commutateur est fermé et la tension sur le condensateur suit le signal d'entrée. Pendant le mode de blocage le commutateur est ouvert et la valeur de tension d'entrée au moment d'ouverture du commutateur reste dans le condensateur. Ce circuit, cependant, n'est en mesure

d'alimenter aucune charge. Par conséquent, un tampon doit être utilisé pour alimenter la charge. Un tampon d'entrée peut également être nécessaire pour ajuster le niveau du signal à un niveau approprié au commutateur et pour réduire l'injection de charge du mode de blocage (Fig. 1-7b).

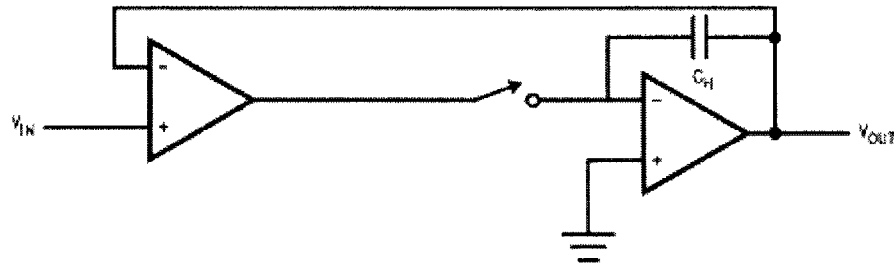


**Figure 1-7.** (a) Symbole d'un circuit EB (b) Son utilisation pratique.

L'avantage principal de cette architecture d'EB en boucle ouverte est sa grande vitesse. L'exactitude, cependant, est limitée par la déformation harmonique résultant du gain non linéaire des amplificateurs opérationnels et l'injection de charge du commutateur est dépendante du signal d'entrée.

#### 1.4.2 Architectures à boucle fermée

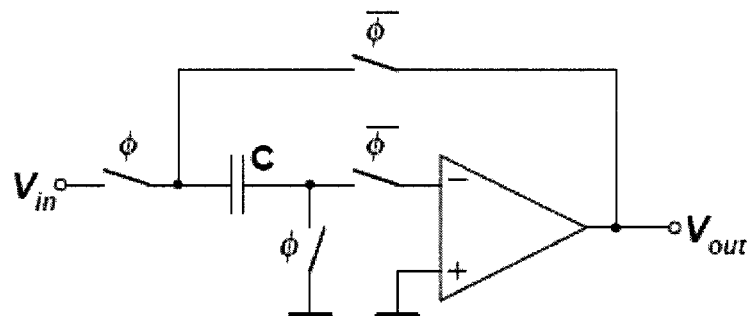
Une technique bien connue pour améliorer la linéarité est l'utilisation de la rétroaction négative. La rétroaction peut être employée dans les amplificateurs disposés en boucle ouverte, tel que montré à la figure 1-7b. Cependant, ceci n'aide pas à compenser la déformation induite par le commutateur. La figure 1-8 montre un circuit EB en boucle fermée explicitant cette idée [33, 26].



**Figure 1-8.** Circuit EB simple avec rétroaction.

Puisque la boucle de rétroaction enferme deux amplificateurs en mode suiveur, le circuit doit être fortement compensé afin d'éviter l'instabilité. Ceci réduit naturellement la vitesse du circuit. Un autre inconvénient potentiel est l'injection de charges du mode de blocage par l'intermédiaire des capacités parasites d'entrée de l'amplificateur.

Une architecture d'EB en boucle fermée, généralement utilisée dans des circuits à condensateurs commutés (switched-capacitor-SC), appelée EB «flip-around», est illustrée sur la figure 1-9. Elle effectue l'échantillonnage passivement, c.-à-d. qu'il est fait sans amplificateur opérationnel, ce qui rend l'acquisition du signal rapide. En mode de blocage, le condensateur d'échantillonnage est déconnecté de l'entrée et mis dans une boucle de rétroaction autour de l'amplificateur, comme dans le circuit représenté sur la figure 1-6.



**Figure 1-9.** Circuit EB à condensateurs commutés.

L'injection de charges des commutateurs qui dépende du signal d'entrée est évitée par une technique appelée «Bottom Plate», qui est fondé sur la synchronisation spéciale des signaux de commande du commutateur. Cette technique est discutée en détail dans le chapitre 3.

## 1.5 Exemples des circuits EB

Le compromis entre la vitesse et la linéarité entraîne l'adoption de l'une ou l'autre de deux approches lors de la conception des circuits EB CMOS à haute résolution et grande vitesse. La première approche qui est à boucle ouverte permet de maximiser la linéarité, et l'autre qui est à boucle fermée facilite l'obtention d'une haute vitesse. Cette section donne une courte description des architectures d'EB trouvées dans des publications récentes.

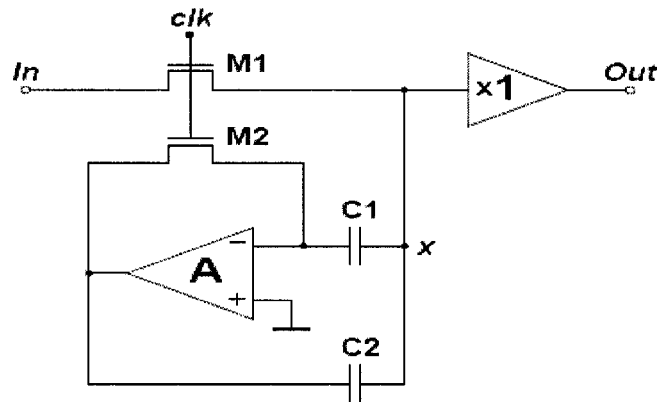
### 1.5.1 Circuit EB à capacité de Miller

Dans [21] une approche intéressante est employée pour réduire l'injection de charge dépendante du signal d'entrée. L'idée est d'employer l'effet de Miller (équation 1-7) qui consiste à augmenter la capacité efficace ( $C_{hd-eff}$ ) en mode de blocage afin de rendre négligeable le niveau de tension résultant de l'injection de charge.

$$C_{hd-eff} = (1 + A) \left( \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \right) \quad (1-7)$$

où A est le gain de boucle ouverte de l'amplificateur montré à la figure 1-10.

L'échantillonnage est rapide et les tailles des commutateurs peuvent être gardées petites, grâce à la petite taille du condensateur d'échantillonnage, qui n'est pas multipliée par l'effet de Miller en mode d'échantillonnage. Le circuit proposé est montré sur la figure 1-10. Son fonctionnement est comme suit. En mode d'échantillonnage les commutateurs (transistors) M1 et M2 conduisent et l'amplificateur est relié ainsi à la rétroaction de gain unitaire.

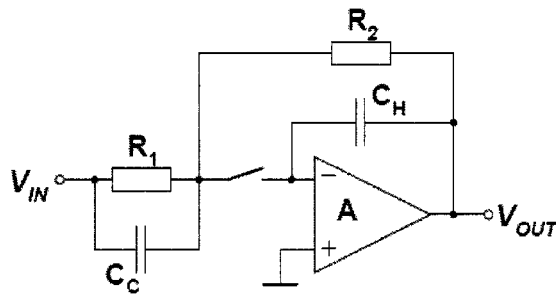


**Figure 1-10.** Circuit EB à capacité de Miller [21].

La capacité d'échantillonnage est constituée de la combinaison parallèle des condensateurs C1 et C2, tous les deux reliés à la sortie à basse impédance de l'amplificateur. En mode de blocage, M1 et M2 sont ouverts. Le transistor M2 fonctionne à un potentiel constant et ainsi la charge qu'il injecte dans C1 ne produit pas la déformation. Cependant, Le transistor M1 injecte une charge dépendante de l'entrée dans le noeud x. Puisque le chemin de rétroaction autour de l'amplificateur est ouvert, la valeur efficace de C2 est multipliée par  $(A+1)$ , où A est le gain de boucle ouverte de l'amplificateur (équation 1-7). En raison de la capacité accrue, la charge injectée produit un changement de tension négligeable sur le noeud x.

### 1.5.2 Circuit EB à gain défini par le rapport des résistances

Un circuit EB en boucle fermée proposé dans [14] est illustré sur la figure 1-11. En mode suiveur (le commutateur étant fermé) l'amplificateur est relié dans une configuration d'amplificateur inverseur de rétroaction et la tension de sortie du circuit est  $-(R_2/R_1)*V_{IN}$ . Quand le commutateur est ouvert cette tension est échantillonnée dans le condensateur de blocage  $C_H$ . Puisque le commutateur est mis à la masse virtuelle à travers l'entrée négative de l'amplificateur, il n'introduit pas une erreur de charge dépendante du signal d'entrée. La largeur de bande du mode suiveur du circuit est étendue en ajoutant le condensateur  $C_C$  parallèlement à la résistance  $R_1$  pour créer un zéro, qui est employé pour éliminer le pôle dû au  $C_H$ .



**Figure 1-11.** Circuit EB à gain défini par le rapport des résistances.

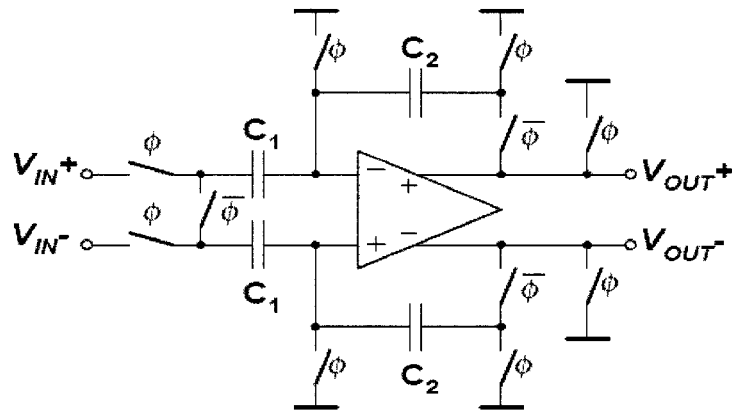
Puisque le gain du circuit est facilement ajustable, il peut être employé comme EB inter-étages dans les CAN pipeliné. Le circuit peut atteindre des taux d'échantillonnage très élevés (50 MS/s [14]). L'injection de charge en mode de blocage peut également devenir un problème, puisqu'il y a un chemin de couplage connectant l'entrée à la sortie par les résistances. En outre, l'assortiment des résistances est connu pour être plus problématique que celui des condensateurs. Ainsi, il est préférable d'utiliser un circuit dont le gain est



déterminé par un rapport de condensateurs dans les applications où un gain précis est nécessaire.

### 1.5.3 Circuit EB à gain défini par le rapport des capacités

Quand un circuit EB avec un gain précis (près de un) est nécessaire, un circuit à condensateurs commutés avec un gain défini par le rapport des condensateurs est la meilleure solution. La figure 1-12 illustre le circuit EB utilisé dans une architecture de CAN pipeliné [20]. La tension d'entrée est échantillonnée passivement dans les condensateurs  $C_1$  et en mode de blocage, la charge échantillonnée est transférée aux condensateurs  $C_2$ . Le rapport de la tension de sortie maintenue sur la tension d'entrée échantillonnée est défini par  $C_1/C_2$ . En mode d'échantillonnage les charges dans  $C_2$ , aussi bien que la sortie de l'amplificateur, sont remis à zéro. Le facteur de rétroaction du circuit dépend du rapport des condensateurs et ainsi du gain.



**Figure 1-12.** Circuit EB à gain défini par le rapport des capacités.

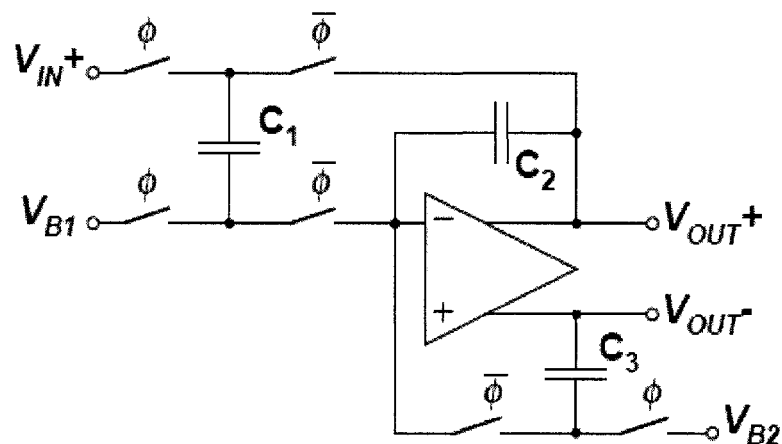
Une modification du circuit représenté sur la figure 1-12 permet un établissement (settling) plus rapide par le moyen d'une configuration d'échantillonnage modifiée. Au lieu de remettre à zéro le condensateur C2 en mode d'échantillonnage, on le dispose parallèlement à C1. En conséquence, la valeur de C1 doit être réduite par celle de C2 pour obtenir le même gain qu'avec le circuit original. La réduction de la valeur C1 augmente le facteur de rétroaction en mode de blocage, ce qui accélère l'établissement. L'amélioration est significative seulement avec des petites valeurs de gain. Une modification proposée dans [22] ajoute un commutateur d'échantillonnage entre les entrées de l'amplificateur. Maintenant, les principaux commutateurs d'échantillonnage, qui sont ouverts légèrement avant le nouveau commutateur, auront besoin de passer seulement un signal en mode commun, qui permet de les rendre petits. En conséquence l'injection déséquilibrée de charge est réduite. L'injection de charge dépendante du signal d'entrée est réduite aussi, puisque dans la nouvelle configuration, la chute de tension entre les entrées de l'amplificateur est seulement la moitié en comparaison de celle résultant de la technique utiliser dans [20] quand la même taille de commutateur est utilisée.

#### **1.5.4 Circuit EB sans la phase de remise a zéro**

L'exigence sur le temps de réaction (slew rate) d'un circuit EB est définie par la différence entre les niveaux successifs de sortie. Un circuit EB à sortie simple qui impose, en mode d'échantillonnage, une nouvelle valeur qui reste à proximité de son dernier niveau de blocage précédent est présenté dans [37]. Dans [28] l'idée est développée en prolongeant la durée la phase de blocage à toute la période d'horloge. Un

circuit entièrement différentiel a été utilisé plus tard dans [18] et sa conception est également rapportée dans [17].

Le circuit de la référence [28] est illustré sur la figure 1-12. Pour plus de clarté, les condensateurs et les commutateurs de seulement la moitié du circuit sont dessinés. L'échantillonnage est effectué passivement avec le condensateur  $C_1$  comme il a été fait pour le circuit de la figure 1-9. Pendant l'échantillonnage, le condensateur  $C_3$  est relié entre  $V_{OUT}$  et à la tension de polarisation  $V_{B2}$ , qui est également le niveau du signal d'entrée en mode commun de l'amplificateur. Dans la transition vers le mode de blocage, le condensateur d'échantillonnage  $C_1$  est relié parallèlement à  $C_2$  et la borne inférieure de  $C_3$  est commutée à l'entrée négative de l'amplificateur. Puisque les tensions sur les condensateurs  $C_2$  et  $C_3$  sont complémentaires, elles s'annulent quand les condensateurs sont reliés en configuration série au début du mode de blocage. Ceci exige naturellement que les condensateurs soient de même valeur.

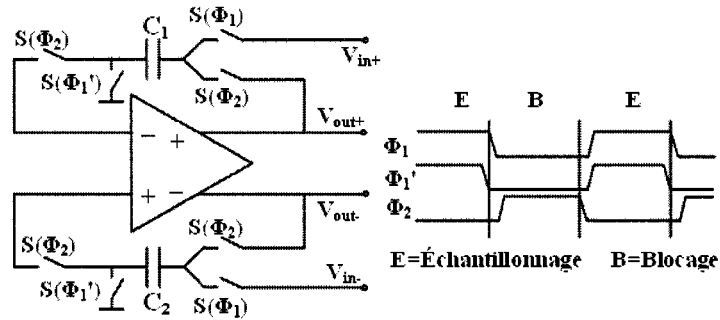


**Figure 1-13.** La moitié d'un circuit EB complètement différentiel sans la phase de remise à zéro.

L'annulation effectuée la remise à zéro du condensateur de blocage  $C_2$  et aucune phase additionnelle de remise à zéro n'est ainsi nécessaire. À la fin du mode de blocage, le condensateur  $C_1$  est déconnecté de la boucle de rétroaction, mais la tension de sortie reste tenue par le condensateur  $C_2$ . Ainsi la phase de blocage est efficacement prolongée pour chevaucher avec la période d'échantillonnage suivante. Ceci, cependant, n'allège pas la condition d'établissement (settling) du circuit, puisque la sortie doit être entièrement établie avant que  $C_1$  soit déconnecté. En raison du manque d'une phase de remise à zéro et du grand facteur de rétroaction, le circuit réalise des taux d'échantillonnage élevés. Un taux d'échantillonnage de 100 MS/s avec approximativement une résolution de 9-bit est réalisé dans [18].

Comme le circuit EB à concevoir est dédié pour un ADC pipeliné de 10bits et 50MS/s, on a pas utilisé l'architecture à capacité de Miller puisqu'elle n'est convenable que pour les applications à basse fréquences [15]. De plus, l'architecture à gain défini par un rapport des résistances a besoin d'un amplificateur à haute vitesse capable d'alimenter une charge résistive, ce qui est difficile à réaliser en CMOS [15]. Concernant le reste des architectures à condensateurs commutés (utilisant un rapport de capacités) présentées dans cette section, qui sont très souhaitables pour les applications à haute vitesse, l'inconvénient c'est la précision exigée dans les tailles des condensateurs. Ceci est difficile du point de vue implémentation. L'architecture à condensateurs commutés adoptée est illustrée sur la figure 1-14 [29, 36], qui est convenable pour une application à haute vitesse, sans avoir d'exigence sur la précision des tailles des condensateurs. Dans la figure 1-14, les condensateurs  $C_1$  et  $C_2$  sont les mêmes pour les deux phases

d'échantillonnage (les commutateurs  $S(\Phi_1)$  et  $S(\Phi_1')$  sont fermés), et de blocage (les commutateurs  $S(\Phi_2)$  sont fermés).



**Figure 1-14.** L'architecture adoptée pour le circuit EB.

En étudiant chaque élément dans le circuit afin de réduire au maximum la distorsion, un circuit EB bien optimisé peut être conçu avec moins d'exigences et plus de performances, le chapitre qui suit donnera une étude détaillée sur l'amplificateur opérationnel choisi.

## CHAPITRE 2

# L'AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL

L'amplificateur opérationnel, formant le noyau d'un EB à base de condensateurs commutés est le bloc le plus important pour construire des circuits performants. La résolution et la vitesse de l'EB sont habituellement déterminées par l'amplificateur. En général, le gain DC des amplificateurs en boucle ouverte limite le temps d'établissement de leur signal de sortie, alors que la largeur de bande et le temps de réaction déterminent la fréquence maximale de l'horloge de l'EB. Pour maximiser le rapport signal/bruit de l'amplificateur, la gamme dynamique (plage de variation) du signal de sortie doit être maximisée. Il est donc à noter que l'amplificateur requis pour concevoir un circuit EB à grande vitesse et à haute résolution doit être à gain DC très élevé, une largeur de bande grande et un temps de réaction haut. La manière la plus simple de répondre à ces exigences est d'utiliser les amplificateurs à deux étages (cascode, plié (folded) ou télescopique). L'inconvénient de ces topologies, particulièrement avec l'alimentation à

basse tension, est la plage dynamique du signal de sortie. Les topologies d'amplificateurs et leurs conception sont les matières principales des divers livres et publications [19, 11, 13].

## 2.1 Amplificateur à compensation de Miller

À partir de plusieurs amplificateurs à deux étages, la figure 2-1 montre un amplificateur à compensation de Miller [13]. Avec tous les transistors dans l'étage de sortie de cet amplificateur placés dans la région de saturation, le signal de sortie a une oscillation différentielle de  $2V_{DD}-4V_{DS-sat}$ , où  $V_{DD}$  est la tension d'alimentation et  $V_{DS-sat}$  est la tension de saturation d'un transistor. Pour un  $V_{DS-sat}$  typique de 200mV, l'oscillation différentielle résultante est  $2V_{DD}-0.8V$ , qui est meilleur que celui de la plupart des autres topologies. Le pôle non-dominant, résultant du noeud de sortie, est situé à :

$$P_1' = \frac{g_{m5} \cdot C_c}{C_L \cdot C_c + C_L \cdot C_{L1} + C_c \cdot C_{L1}} = \frac{g_{m5}}{C_L \left( 1 + \frac{C_{L1}}{C_c} \right) + C_{L1}} \quad (2-1)$$

Où  $g_{m5}$  est la transconductance de  $M_5$  (ou  $M_6$ ),  $C_{L1}$  est la capacité parasite entre la grille de  $M_5$  (ou  $M_6$ ) et la masse,  $C_c$  est le condensateur de compensation et  $C_L$  est la capacité de charge. Puisque ce pôle est déterminé principalement par une capacité de charge explicite, l'effet de la compensation Miller s'avère efficace du point de vue augmentation de la fréquence du gain unitaire en augmentant le condensateur de compensation  $C_c$ , ce qui représente l'avantage principal de cette architecture. La largeur de bande au gain unitaire (GBW) d'un amplificateur à compensation de Miller est donné approximativement par :

$$GBW = \frac{g_{m1}}{C_c} \quad (2-2)$$

Où  $g_{m1}$  est la transconductance de  $M_1$  (ou  $M_2$ ). En général, le gain DC de la boucle ouverte de la configuration de base n'est pas assez grand pour les applications à haute résolution. Un autre inconvénient de cette architecture est un faible rejet de bruit d'alimentation aux hautes fréquences en raison du raccordement de  $V_{DD}$  à travers les condensateurs grille/source ( $C_{gs}$ ) de  $M_5$ ,  $M_6$  et  $C_c$ .

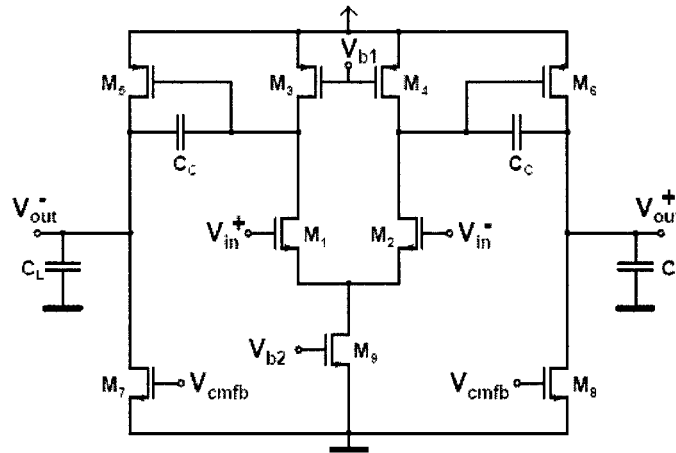


Figure 2-1. Amplificateur à deux étages avec la compensation de Miller.

## 2.2 Amplificateur cascode plié (folded)

La topologie d'amplificateur cascode plié est montrée à la figure 2-2. La plage de variation de la sortie de cette structure est contrôlée par son étage du type cascode. Tenant compte des marges de sécurité, et de  $V_{DS-sat}$  exigé à travers cette topologie, l'oscillation du signal de sortie différentiel est  $2V_{DD} - 8V_{DS-sat} - 4V_{marge}$ , où  $V_{marge}$  est une petite marge de sécurité supplémentaire à  $V_{DS-sat}$ . Avec une marge de tension de 100mV, ceci donne  $2V_{DD} - 2.0V$ , qui est beaucoup moins que celui d'un amplificateur à



compensation Miller. Le deuxième pôle de cet amplificateur est situé à  $g_{m7}/C_{par}$ , où  $g_{m7}$  est la transconductance de  $M_7$  (ou  $M_8$ ) et  $C_{par}$  est la somme des capacités parasites des transistors  $M_1$ ,  $M_7$  et  $M_9$  à la source du transistor  $M_7$ . La dissipation de puissance de l'amplificateur cascode plié est comparable à celle d'un amplificateur à deux étages. Son GBW est donné par l'équation 2-3.

$$GBW = \frac{g_{m1}}{C_L} \quad (2-3)$$

Où  $g_{m1}$  est la transconductance des transistors  $M_1$  (ou  $M_2$ ),  $C_L$  est la capacité de charge. Ainsi, le GBW est limité par la capacité de charge.

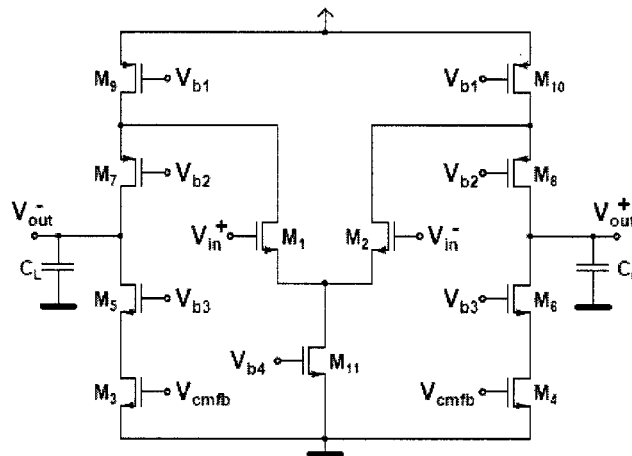
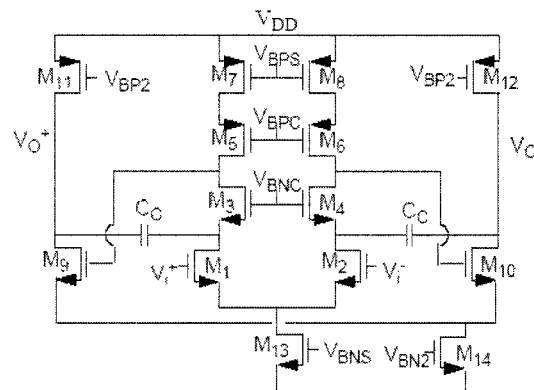


Figure 2-2. Amplificateur cascode plié (folded).

### 2.3 Amplificateur cascode télescopique

Les conditions du gain DC et de l'oscillation de sortie nécessitent l'utilisation d'un amplificateur à deux étages. La figure 2-3 montre un amplificateur à transconductance (Operational Transconductance Amplifier-OTA) complètement différentiel utilisé dans ce projet. Le premier étage est un amplificateur télescopique, suivi d'une paire

différentielle dans le deuxième étage. Avec cette architecture, un gain DC élevé peut être réalisé. Cette architecture facilite la conception d'un amplificateur à une basse consommation de puissance. Cependant son inconvénient est sa faible plage dynamique du signal différentiel de sortie, qui s'avère  $2V_{DD}-10V_{DS-sat}-6V_{marge}$ . Avec une marge de tension de 100mV, ceci donne  $2V_{DD}-2.6V$ , qui est beaucoup plus petite que ceux des deux amplificateurs à compensation Miller et le cascode plié. La réponse fréquentielle à large bande résulte du fait que le deuxième pôle, correspondant aux sources de transistors N, qui est déterminé par leurs transconductances, résulte seulement de deux transistors. Ainsi, le GBW est limité par la capacité de charge (équation 2-3). En raison de la simplicité de topologie et du calcul des dimensions de composants, l'amplificateur cascode télescopique est préféré si la plage dynamique du signal de sortie est assez grande pour une application spécifique.



**Figure 2-3.** Amplificateur opérationnel cascode télescopique.

Le signal de sortie de cette architecture peut être élargi en opérant les transistors  $M_7$ ,  $M_8$  et  $M_{13}$  dans la région linéaire tel que proposé à [11]. Afin de préserver des bons rapports

de rejet de mode commun (CMRR) et de source d'alimentation (PSRR) pour cette topologie, des circuits additionnels de rétroaction pour la compensation ont été ajoutés.

Nous examinerons dans les prochaines sections les différents paramètres qui caractérisent l'OTA soient le bruit, la vitesse et la dissipation de puissance.

### 2.3.1 Le bruit thermique

Le bruit thermique à l'entrée d'un transistor simple à source commune, montré dans la figure 2-4, peut donné approximativement par l'équation 2-4.

$$\overline{v_{n,m}^2} \approx \overline{i_{ds}^2} / g_m^2 = 4kT \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{g_m} \cdot n_{sc} \Delta f \quad (2-4)$$

Le facteur  $n_{sc}$  tient compte du bruit additionnel dans les dispositifs à canal court ( $L \leq 1\mu\text{m}$ ), et il est dépendant de la polarisation.

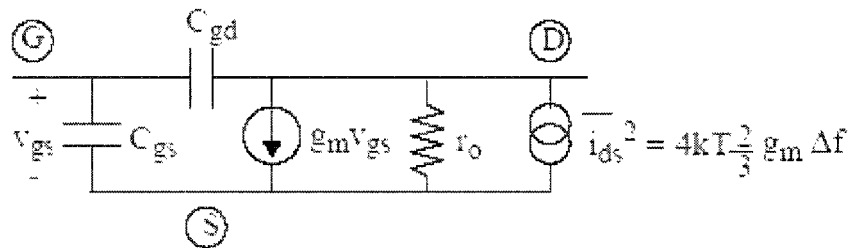


Figure 2-4. Le modèle petit signal du bruit thermique d'un transistor simple à source commune.

Le résultat de l'équation 2-4 peut être utilisé pour déterminer le bruit thermique à l'entrée de l'OTA. Le bruit des dispositifs du deuxième étage, en se referant à l'entrée de l'OTA, est atténué par le carré du gain du premier étage. En tant que tels, le bruit thermique à

l'entrée est dominé par les transistors d'entrée ( $M_1, M_2$ ) et les transistors de charge ( $M_7, M_8$ ), comme il est montré à la figure 2-3 et dans l'équation 2-5.

$$\begin{aligned}
 P_{n,OTA} &= 2 \cdot \left\{ v_{n1,m}^2 + \left( \frac{G_{m3}}{g_{m1}} \right)^2 v_{n3,m}^2 + \left( \frac{G_{m5}}{g_{m1}} \right)^2 v_{n5,m}^2 + \left( \frac{g_{m7}}{g_{m1}} \right)^2 v_{n7,m}^2 + \left( \frac{1}{A_{dc1}} \right)^2 \left[ v_{n9,m}^2 + \left( \frac{g_{m11}}{g_{m9}} \right)^2 v_{n11,m}^2 \right] \right\} \\
 &\approx 2 \cdot \left\{ 4kT \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{g_{m1}} \left[ 1 + \left( \frac{g_{m7}}{g_{m1}} \right) \right] \right\} \Delta f
 \end{aligned} \tag{2-5}$$

L'équation 2-5 nous permet de constater que la diminution du rapport ( $g_{m7}/g_{m1}$ ) réduit le bruit thermique de l'OTA. Puisque la transconductance  $g_m$  est donnée par l'équation 2-6, il est souhaitable de réduire au minimum le rapport  $V_{DS1-sat}/V_{DS7}$ .

$$g_m \approx \frac{2I_{DS}}{V_{DS-sat}} \tag{2-6}$$

### 2.3.2 Le bruit de clignotement

Le bruit de clignotement (flicker) est dû au fait que des porteurs minoritaires entrent et sortent aléatoirement dans le canal d'un dispositif MOS. Puisque les fluctuations dans la densité des porteurs de charges dans le canal ont une constante de temps relativement grande, la densité de puissance du bruit est inversement proportionnelle à la fréquence. C'est pourquoi le bruit de clignotement est connu aussi comme le bruit  $1/f$ . Ce bruit à l'entrée d'un transistor simple à source commune est donné par l'équation 2-7.

$$v_{fl,m} = \frac{K_F}{W \cdot L \cdot C_{OX} f} \cdot \Delta f \tag{2-7}$$

La constante  $K_F$  est un paramètre qui diffère d'un processus à un autre. De plus, le NMOS démontre un niveau de bruit plus élevé comparé au PMOS. Une stratégie directe pour

réduire le bruit de clignotement consiste à augmenter la surface de la grille, c.-à-d. largeur et longueur, du dispositif.

Pour la simplicité de la conception, la contribution de bruit de clignotement de l'OTA est réduite en augmentant les tailles des dispositifs d'entrée ( $M_1$ ,  $M_2$ ) et ceux de la charge ( $M_7$ ,  $M_8$ ). En augmentant la largeur et la longueur par le même facteur, la surface de la grille est augmentée sans faire changer le rapport de W/L. Pour un courant fixe, ceci garde la transconductance ( $g_m$ ) et la tension de saturation  $V_{DS}$  constantes.

### 2.3.3 Le gain DC

Le gain DC de l'amplificateur (figure 2-3) est le produit du gain des deux premiers étages.

$$A_{DC} = \{g_{m1} \cdot (g_{m3}r_{o3}r_{o1} \parallel g_{m5}r_{o5}r_{o7})\} \{g_{m9} \cdot (r_{o9} \parallel r_{o11})\} \quad (2-8)$$

La résistance de sortie du transistor,  $r_o$ , est proportionnelle à la longueur du canal du dispositif.  $M_7$ ,  $M_8$ ,  $M_{11}$  et  $M_{12}$  peuvent être faits à long canal pour maximiser  $r_{o7}$  et  $r_{o11}$  dans le gain DC.

### 2.3.4 L'établissement linéaire

L'OTA doit avoir une largeur de bande suffisante pour que l'établissement du signal soit linéaire dans la moitié de la période d'horloge, comme il est montré dans l'équation 2-9.

$$\omega_{uT} = \frac{1}{\tau} \geq 2f_s \cdot n_\tau \quad (2-9)$$

Où  $f_s$  est la fréquence d'échantillonnage, et  $n_\tau$  est le nombre des constantes de temps. La réponse en fréquence de l'amplificateur sera maintenant analysée pour identifier la façon dont les paramètres du circuit affectent la largeur de bande à gain unitaire. La figure 2-5 illustre le modèle petit signal de l'amplificateur télescopique.

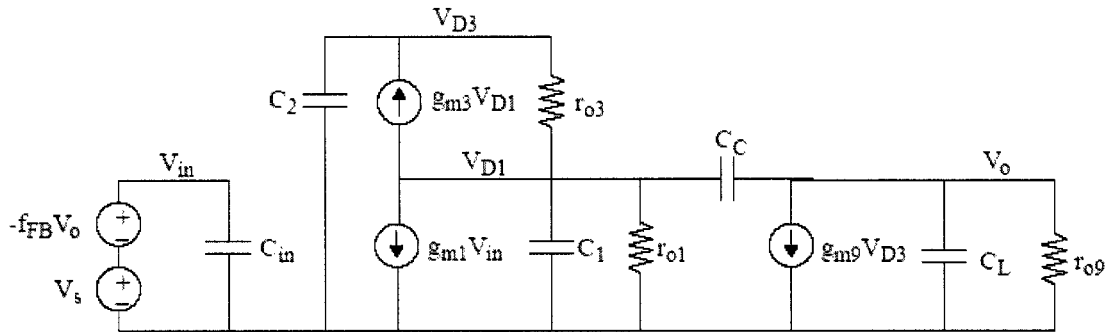


Figure 2-5. Le modèle petit signal de l'amplificateur cascode télescopique à deux étages.

Les condensateurs dans la figure sont définis ci-dessous.

$$C_m = C_{gs1} \quad (2-10a)$$

$$C_1 = C_{gd1} + C_{gs3} \quad (2-10b)$$

$$C_2 = C_{gd3} + C_{gd5} + C_{gs9} \quad (2-10c)$$

$$C_L = C_{gd9} + C_{gd11} + C_{C-bottom} \quad (2-10d)$$

$C_{C-bottom}$  représente les capacités parasites d'embase des condensateurs de compensation.

Assumons une résistance de sortie infinie,  $r_o$ , la fonction de transfert de l'OTA est donnée par l'équation 2-10 [7].

$$H(s) = \frac{\frac{g_{m1}}{C_2 C_T^2} (g_{m3} g_{m9} - C_2 C_C s^2)}{s^3 + \left[ \frac{g_{m3} (C_L + C_C) - f g_{m1} C_C}{C_T^2} \right] s^2 + \frac{g_{m3} g_{m9} C_C}{C_2 C_T^2} s + \frac{f g_{m1} g_{m3} g_{m9}}{C_2 C_T^2}} \quad (2-10)$$

$$\text{Où } C_T^2 = C_1 C_L + C_1 C_C + C_L C_C$$

Bien que l'équation 2-10 fournisse une solution quantitative complète, elle est compliquée pour des calculs à main. Quelques simplifications peuvent être faites afin de permettre au concepteur de trouver une approximation des endroits des pôles. En effet, la bande à gain unitaire en boucle fermée dans l'équation 2-9 peut être réécrite en termes des paramètres du circuit (équation 2-11).

$$\omega_{uT} \approx \frac{g_{m1}}{C_C} \cdot F_{FB} \quad (2-11)$$

Puisque le facteur de rétroaction  $F_{FB}$  est constant pour un gain fixe, et parce que le condensateur de compensation  $C_C$  est déterminé par les considérations du bruit thermiques, la transconductance minimale des dispositifs d'entrée  $g_{m1}$  peut être calculée à partir des équations 2-9 et 2-11. Aussi, les deux pôles non dominants de boucle ouverte peuvent être approximés par les équations 2-12 et 2-13.

$$|p_2| \approx \frac{g_{m9}}{C_{gd11} + C_L} \quad (2-12)$$

$$|p_3| \approx \frac{g_{m3}}{C_C + C_{gs3} + C_{sb3} + C_{gd1}} \quad (2-13)$$

Pour que l'amplificateur reste stable, les pôles non-dominants devraient être rendus beaucoup plus grand que la largeur de bande à gain unitaire. À partir des équations 2-11 et 2-12 on déduit l'équation 2-14.

$$g_{m9} \gg g_{m1} \cdot F_{FB} \cdot \frac{1}{C_C} \quad (2-14)$$

À partir des équations 2-11 et 2-13, les transconductances des dispositifs NMOS ( $M_3$ ,  $M_4$ ) devraient être rendues plus grandes que les transconductances des dispositifs d'entrée ( $M_1$ ,  $M_2$ ), ce qui donne l'équation 2-15.

$$g_{m3} \gg g_{m1} \cdot F_{FB} \quad (2-15)$$

### 2.3.5 Le temps de réaction

Quand une large impulsion est appliquée à l'entrée de l'amplificateur, sa sortie ne peut pas suivre le grand taux de changement de cette entrée. C'est dû à la limite dans le courant différentiel que l'amplificateur de classe A peut fournir. Cette réponse non linéaire est connue par le taux de réaction de l'amplificateur. L'amplificateur peut approcher une limite de réaction dans le premier ou le deuxième étage. La limite de réaction du premier étage est déterminée par la nécessité de charger le condensateur de compensation à la source de  $M_3$  et de  $M_4$ , alors que la limite de réaction du deuxième étage est fixée par la nécessité de charger les condensateurs de charge et de compensation. Ceci requiert qu'avec des spécifications d'établissement fixes, le taux de réaction puisse être amélioré en augmentant le  $V_{GS} - V_{TH}$  des transistors d'entrée ( $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_9$  et  $M_{10}$ ). Ceci exige l'augmentation du courant de polarisation, tel que montré par l'équation 2-16.

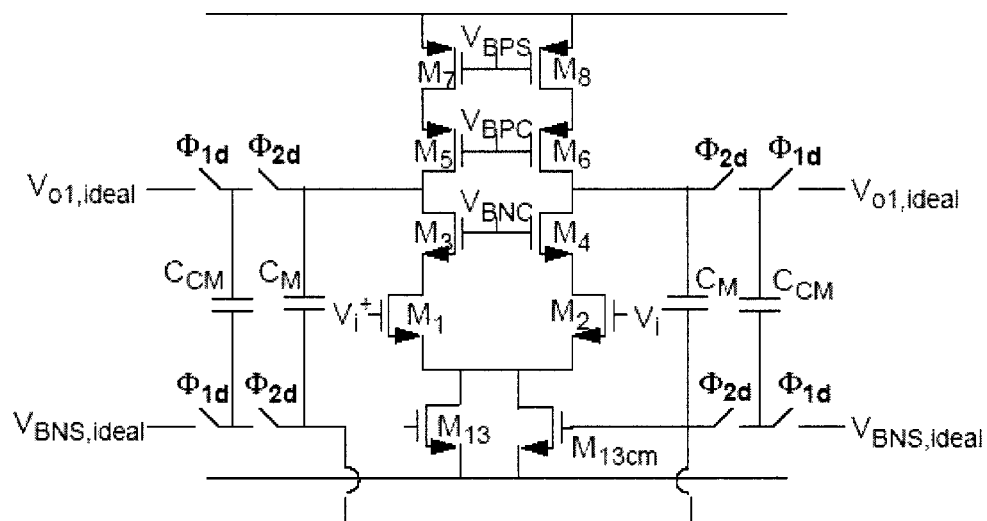
$$SR = \min\left(\frac{2I_1}{C_C}, \frac{2I_9}{C_C + C_L}\right) \quad (2-16)$$

### 2.3.6 Rétroaction du mode commun

La rétroaction du mode commun est exigée dans les amplificateurs complètement différentiels pour définir les tensions aux noeuds de sortie à haute impédance.



L'amplificateur utilise une rétroaction en mode commun dynamique ou à condensateur commuté. Le deuxième étage complètement différentiel élimine le besoin d'étage d'inversion dans la boucle de rétroaction du mode commun. La figure 2-6 illustre la boucle de rétroaction du mode commun pour le premier étage de l'amplificateur. Les condensateurs  $C_M$  sont utilisés pour saisir la tension du mode commun de la sortie. Pendant  $\Phi_{2d}$ , les condensateurs commutés  $C_{CM}$  définissent la tension DC appropriée sur les condensateurs de sensation. La boucle fonctionne par l'absorption du courant à partir de la source de courant  $M_{13cm}$ . La source totale du courant de queue a été divisée entre  $M_{13}$  et  $M_{13cm}$  pour une meilleure stabilité. Une boucle semblable est conçue pour le deuxième étage de l'amplificateur.

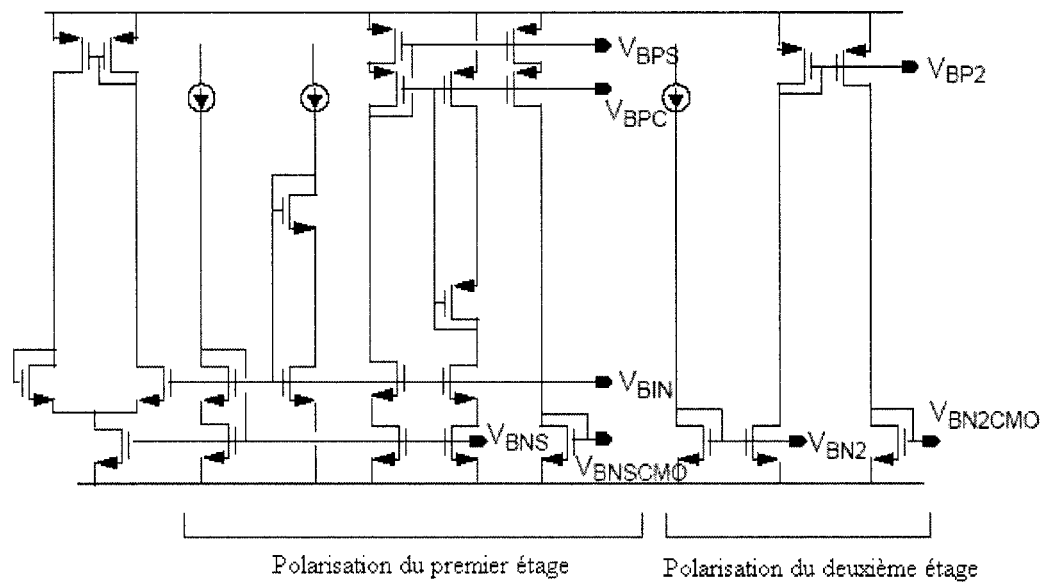


**Figure 2-6.** Le circuit de rétroaction du mode commun pour le premier étage de l'amplificateur.

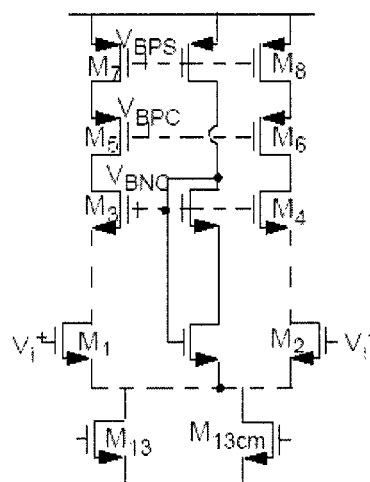
### 2.3.7 La polarisation

La figure 2-7 montre le circuit de polarisation de l'amplificateur. Une polarisation cascode à large oscillation (wide swing) est utilisée. Aussi, une polarisation interne est

utilisée pour les dispositifs NMOS cascode ( $V_{BNC}$ ) dans le première étage, comme représenté sur la figure 2-8. Pour fournir un bon isolement entre les deux étages de l'amplificateur, le premier OTA (où les performances sont les plus critiques) a son propre circuit de polarisation tandis que le deuxième étage a un autre circuit.



**Figure 2-7.** Le circuit de polarisation de l'OTA.



**Figure 2-8.** Le circuit cascode de polarisation interne de l'OTA.

## 2.4 La modélisation comportementale

Pour obtenir un comportement AC précis d'un modèle d'amplificateur en Verilog-A il est souhaitable de remplacer en premier lieu l'amplificateur par son modèle petit signal (small signal model), comme le montre la figure 2-9. Les paramètres du haut niveau du programme sont: la fréquence du gain unitaire, le gain DC, la tension d'offset, la résistance d'entrée, la résistance de sortie et le temps de réaction, concernant le dernier paramètre il est calculé en limitant le courant d'entrée.

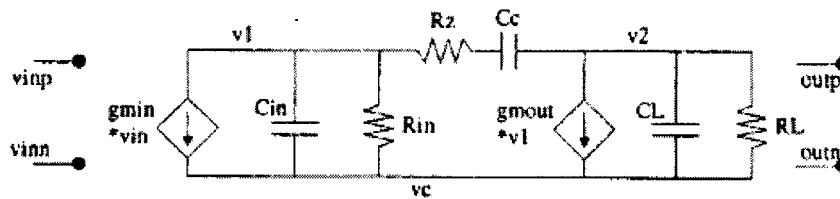


Figure 2-9. Modèle petit signal (small signal) d'un amplificateur.

En changeant ces paramètres le bloc réalisé peut être remplacé par un amplificateur réel avec les mêmes paramètres mais en réduisant le temps de simulation, ce qui permet d'optimiser l'échantillonneur bloqueur en moins de temps. L'intérêt dans cette nouvelle méthodologie est d'avoir un amplificateur avec un gain DC et une fréquence de gain unitaire qui sont simplement des paramètres qui peuvent être changés à partir de la fenêtre des propriétés du bloc, ce qui permet d'avoir les meilleurs paramètres de l'amplificateur à concevoir afin que l'EB puisse fournir les meilleures performances requises. Le programme en Verilog-A de l'amplificateur utilisé est fourni en annexe B.

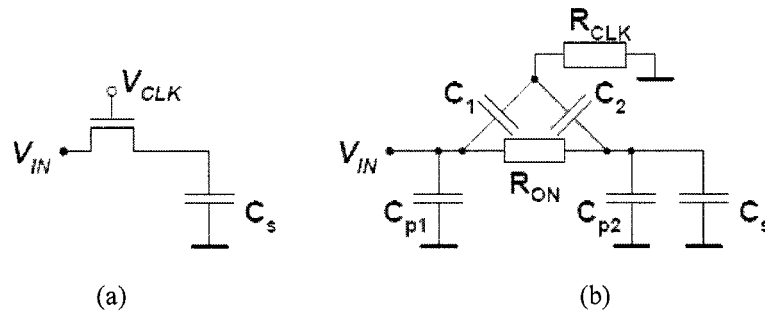
## CHAPITRE 3

# LES AUTRES BLOCS DU CIRCUIT EB

Habituellement, une fois utilisé comme commutateur, un transistor de type MOS opère dans la région de triode (ou la région linéaire). Alors le circuit équivalent pour le transistor est une résistance dont la valeur est commandée par la tension de la grille du transistor. Quand le commutateur est fermé, la valeur de la résistance varie de quelques ohms à quelques kilo-ohms et elle est souvent appelée résistance-ON. En revanche, la résistance d'un commutateur ouvert est si haute que dans la pratique le commutateur est un circuit ouvert, elle est souvent appelée résistance-OFF.

En plus de la résistance-ON finie, il y a également des capacités parasites liées au commutateur. Ce circuit d'échantillonnage simple en MOS est montré sur la figure 3-1a et son circuit RC équivalent, y compris les capacités parasites qui se trouvent sur la figure 3-1b.  $C_{p1}$  et  $C_{p2}$  sont dues aux capacités de la jonction drain/source, et à la capacité de la

jonction canal/substrat. Les capacités parasites des jonctions grille/source et grille/drain et celles de la jonction grille/canal sont représentées par les condensateurs  $C_1$  et  $C_2$ . La résistance  $R_{CLK}$  reflète un modèle de l'impédance de sortie de l'horloge.



**Figure 3-1.** EB en MOS: (a) circuit simple (b) circuit RC équivalent.

La valeur de  $R_{CLK}$  joue un rôle important dans l'injection de charge du mode de blocage dans les applications à haute fréquence, puisqu'elle forme avec  $C_1$  et  $C_2$  un filtre passe haut après que le commutateur soit ouvert.

### 3.1 L'injection de charge

La limitation principale sur la résolution de l'EB est due à ce qui est désigné sous le nom de l'injection de charge (clock feedthrough).

Cette erreur est due aux charges non désirés étant injectés dans le circuit quand les commutateurs s'ouvrent. Pour l'EB dans la figure 3-2, les commutateurs sont normalement réalisés par des transistors de type N seuls, ou avec des portes de transmission CMOS (qui se composent de transistors de type N en parallèle avec des transistors de type P, dont tous les deux doivent s'ouvrir). Quand les commutateurs MOS s'ouvrent, les erreurs de charge se produisent par deux mécanismes. Le premier est dû

aux charges du canal, qui doivent couler en dehors de cette région vers les jonctions du drain et de la source. Les charges du canal d'un transistor qui a un  $V_{DS}$  égal à zéro est donnée par l'équation (3-1).

$$Q_{CH} = WLC_{OX}V_{eff} = WLC_{OX}(V_{GS} - V_t) \quad (3-1)$$

La deuxième catégorie de charges (en général faible, à moins que  $V_{eff}$  soit très petit) est due à la capacité de chevauchement entre la grille et les jonctions. Considérons d'abord quand le commutateur sur la figure 3-2 s'ouvre.

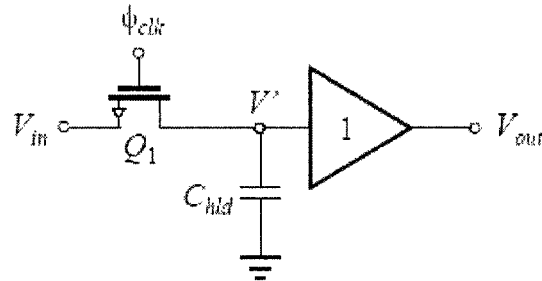


Figure 3-2. Circuit EB simple.

Si l'horloge est très rapide, la charge du canal due au commutateur passera à quantité égale vers les deux jonctions [31]. La charge  $Q_{CH}/2$  injectée dans  $C_{hld}$  fera changer  $V'$ , ce qui présente une erreur. Cette charge est donc donnée par

$$\Delta Q_{C_{hld}} = \frac{Q_{CH}}{2} = \frac{WLC_{OX}V_{eff}}{2} \quad (3-2)$$

D'où  $V_{eff}$  est donnée par

$$V_{eff} = V_{GS} - V_t = V_{DD} - V_t - V_m \quad (3-3)$$

Ici,  $V_{in}$  est la tension d'entrée au moment que le commutateur s'ouvre. Il faut noter qu'il est supposé que le signal d'horloge,  $\Phi_{CLK}$ , change entre  $V_{DD}$  et la tension la plus négative dans le circuit.

Le changement de la tension à travers le condensateur  $C_{hld}$  est trouvé de la manière suivante:

$$\Delta V = -\frac{\Delta Q_{C_{hld}}}{C_{hld}} = -\frac{WLC_{OX}V_{eff}}{C_{hld}} = -\frac{WLC_{OX}(V_{DD} - V_t - V_{in})}{C_{hld}} \quad (3-4)$$

Il est à noter que  $\Delta V$  est linéairement lié à  $V_{in}$ , qui a comme conséquence une erreur de gain pour le circuit EB. De plus,  $\Delta V$  est également lié linéairement à  $V_t$  qui à son tour est lié au signal d'entrée ( $V_{in}$ ) de façon non linéaire dû aux variations de la tension de source/substrat (en assumant que le substrat est relié à un des rails des tensions). Ce rapport non-linéaire avec  $V_{in}$  a comme conséquence la déformation de la sortie du circuit EB global. Il y a également un changement additionnel du  $\Delta V$  dû à la capacité de chevauchement de la grille.

Il y a eu un certain nombre de travaux proposés pour réduire au minimum le pas de blocage dépendant du signal d'entrée [24,12]. Une approche est de remplacer le commutateur de type N par une porte de transmission CMOS. L'idée derrière cette approche est que si la taille du transistor de type P est prise la même que le transistor de type N, alors l'injection de charge due à chaque transistor s'annulera quand la porte de transmission s'ouvre. Ce résultat est quelque peu vrai quand  $V_{in}$  est dans la région centrale entre  $V_{DD}$  et  $V_{SS}$ , en assumant la forme du signal d'horloge et exactement complémentaire. Malheureusement, ces conditions sont rarement possibles à réaliser dans la pratique. Quand les pentes finies des signaux d'horloge sont tenues en considération, on voit que l'ouverture des transistors est dépendante du signal d'entrée causant l'ouverture du transistor de type N à différents temps que le transistor de type P.

Une autre modification, souvent proposée pour réduire au minimum les erreurs d'injection de charge, est en ajoutant un commutateur «dummy» comme représenté sur la figure 3-3 [24]. La théorie derrière cette technique est que si la largeur de  $Q_2$  est prise exactement à la moitié de  $Q_1$ , et si les horloges sont rapides, alors les charges s'annulent. Dans la pratique, il est rarement possible d'avoir des horloges assez rapides en sorte que le rapport requis des largeurs soit exactement égal à 0.5. Quand le rapport requis n'est pas 0.5, il est difficile de rendre le rapport égal à l'optimum exigé pour l'annulation complète de charges. Cependant, quand les horloges sont rapides, cette technique habituellement peut réduire au minimum le pas de blocage d'environ un cinquième la valeur qu'il aurait sans lui.

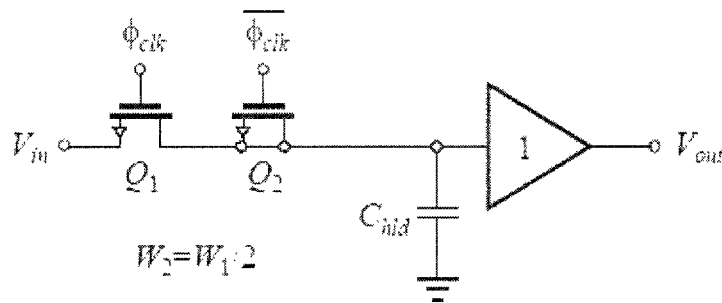


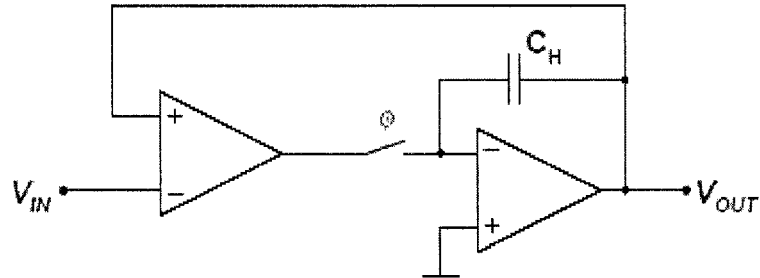
Figure 3-3. Circuit EB avec un «dummy».

### 3.2 La technique d'«embase» (bottom-plate)

Dans beaucoup d'architectures du circuit EB contenant une boucle de rétroaction, le commutateur d'échantillonnage est mis à une masse virtuelle pour éviter des erreurs dépendantes du signal d'entrée. Un exemple est illustré sur la figure 3-4. La boucle de rétroaction inclut deux opamps, qui ralentissent inévitablement le circuit. En utilisant plus

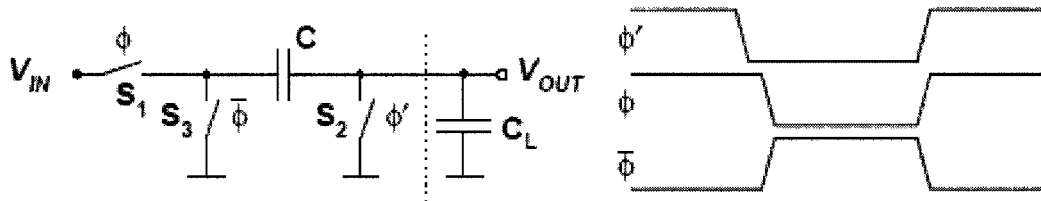


qu'un commutateur, l'échantillonnage avec un potentiel constant peut être réalisé sans enfermer le commutateur dans la boucle de rétroaction.



**Figure 3-4.** Un exemple d'une architecture en boucle fermée où le commutateur d'échantillonnage fonctionne avec une tension fixe.

Cette technique bien connue [12], appelée l'échantillonnage avec «embase» (bottom-plate) (également connue sous le nom de l'échantillonnage sériel), est illustrée sur la figure 3-5. Le condensateur  $C$  est le condensateur d'échantillonnage et le condensateur  $C_L$  est une combinaison parallèle de la capacité d'entrée du circuit suivant et des capacités parasites liés au commutateur  $S_2$  et au condensateur d'échantillonnage.



**Figure 3-5.** Échantillonnage avec «embase» (bottom-plate).

L'idée va comme suit. En mode d'échantillonnage les commutateurs  $S_1$  et  $S_2$  conduisent, alors que le commutateur  $S_3$  est ouvert ; ainsi, la tension d'entrée est échantillonnée dans le condensateur  $C$ . À l'instant d'échantillonnage le signal  $\Phi'$  descend, ce qui ouvre  $S_2$ , et laisse le noeud  $V_{OUT}$  flottant. Puisque le commutateur  $S_2$  est toujours mis à la terre la

charge qu'il injecte dans le noeud  $V_{OUT}$  est constante. Légèrement plus tard, le condensateur  $C$  est déconnecté de l'entrée en ouvrant le commutateur  $S_1$ . L'injection de charge et la variation de tension d'entrée pendant le temps entre l'ouverture  $S_2$  et  $S_1$  distordent la tension sur  $C$ . Cependant, cette distorsion n'est pas dangereuse, puisque le signal échantillonné est sous forme de charge au noeud  $V_{OUT}$ . Cette charge ne peut pas changer après que  $S_2$  soit ouvert, parce qu'il n'y a aucun autre chemin DC à partir de ce noeud. L'échantillonnage est accompli en mettant la borne à gauche du condensateur  $C$  à la terre par la fermeture du commutateur  $S_3$ . En mode de blocage le signal peut être pris du noeud  $V_{OUT}$  comme tension ou comme charge. Si  $V_{OUT}$  est relié à une haute impédance sa tension est juste une inversion de la tension d'entrée échantillonnée. Dans la pratique, le charge capacitive  $C_L$  cause une certaine atténuation et, si la capacité est dépendante du signal d'entrée, elle cause une distorsion harmonique. Alternativement, le noeud  $V_{OUT}$  peut être connecté à une masse virtuelle, ce qui nous permet de garder l'échantillon sous forme d'une charge.

### **3.3 La non-linéarité des commutateurs**

Au contraire de l'atténuation, la distorsion harmonique est intolérable dans la plupart des applications. Quand les amplitudes du signal sont hautes, la largeur de bande du signal et la précision sont limitées par la distorsion, qui provient du fait que la résistance-ON du commutateur et les capacités parasites ne sont pas constantes mais varient en fonctions des tensions du drain et de la source. Pour les commutateurs à canal court la résistance-ON est

$$R_{ON} = \frac{1 + \frac{V_D - V_S}{E_C L}}{C_{OX} \mu_{eff} \frac{W}{L} \left[ V_G - \frac{V_S}{2} - \frac{V_D}{2} - V_{TO} - \gamma \left( \sqrt{V_S - V_B - 2\phi_F} - \sqrt{2\phi_F} \right) \right]} \quad (3-5)$$

D'où  $V_G$ ,  $V_S$ ,  $V_D$ , et  $V_B$  sont les tensions sur la grille, la source, le drain, et les bornes du substrat du transistor. En examinant l'équation, trois différents termes dépendants du signal d'entrée peuvent être identifiés. Le premier (clairement le dominant) est la tension du grille/canal  $V_G - (V_S + V_D)/2$  dans le dénominateur. La seconde est la dépendance de tension de seuil sur la tension de source/substrat (effet de substrat) qui est observée sous la racine carrée dans le dénominateur. Le dernier est le terme au numérateur qui dépend de la tension du drain/source, le champ électrique critique  $E_C$ , et de la longueur du canal du commutateur. Nous analysons dans le reste de cette section les techniques qui améliorent la linéarité de commutateurs, et vérifions leurs circuits connus.

### 3.3.1 La linéarisation des commutateurs de base

Le commutateur de base généralement utilisée (porte de transmission) lui-même peut être considérée comme un circuit linéarisé; du moment où la tension s'élève, l'augmentation de la résistance-ON du transistor NMOS est compensée par la diminution de la résistance-ON PMOS et vice versa. De même, pendant que la tension monte, les capacités de jonction du drain et de la source du transistor NMOS diminuent, alors que dans le PMOS l'opposé se produit.

La taille relative des transistors (la largeur du PMOS comparé à celle du NMOS) peut être optimisée afin de réduire au minimum la distorsion, comme démontré avec des

simulations par l'auteur dans [34]. Le classement par taille optimum, cependant, est plutôt sensible aux paramètres de procédé de fabrication et n'est pas ainsi le même dans différents coins de processus. En conséquence, l'optimisation de tailles de transistors peut rapporter seulement des améliorations modérées de linéarités.

Dans un commutateur de base à transistor simple, le niveau DC du signal a un grand impact sur la distorsion harmonique, qui est particulièrement soulignée avec ce type de commutateurs. Avec les commutateurs NMOS il est avantageux de situer la gamme du signal aussi bas que possible, puisque la résistance-ON et la distorsion du commutateur augmentent rapidement vers des valeurs de tension élevées. Dans les conceptions de basse tension, cependant, la gamme du signal est habituellement une partie considérable de la tension d'alimentation et ainsi le niveau DC ne peut pas être placé très loin de la valeur mi-tension d'alimentation. Quelques technologies offrent des commutateurs à un seuil bas, ce qui peut être utilisé pour l'extension de la gamme du signal et pour réduire la distorsion. Dans les circuits à très basse tension une valeur supplémentaire gagnée sur la grille de quelques centaines de millivolts peut aider beaucoup. La basse tension de seuil, cependant, peut empêcher le commutateur d'être correctement ouvert, qui peut avoir comme conséquence une fuite de la charge stockée. Une manière efficace de réduire la résistance-ON du commutateur et d'étendre la gamme linéaire est d'utiliser une tension plus élevée (dans le cas du NMOS) que la tension utilisé pour commander la grille du transistor. Ceci est illustré sur la figure 3-6, où les résistances-ON des commutateurs NMOS avec différentes tensions sur la grille sont tracées en fonction du niveau du signal. Il y a plusieurs façons pour réaliser une tension plus élevée.

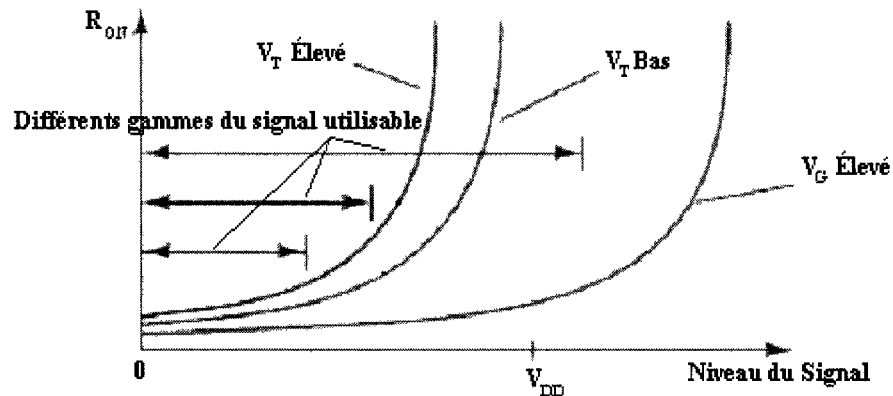


Figure 3-6. La résistance-ON d'un commutateurs NMOS en fonction du niveau du signal.

La plus simple est d'assurer la tension requise de l'extérieure de la puce, qui, cependant, est souvent trop coûteux du point de vue système. Ainsi, une meilleure solution est de produire la tension sur la puce. Puisque le courant est relativement faible, il peut être facilement implémenté avec une «pompe de charge». Quand ce principe est adhéré aussi loin que possible, chaque commutateur devrait avoir sa propre pompe de charge.

### 3.3.2 L'«amorçage» (boosting) de la grille

Un commutateur avec un circuit de pompe de charge locale est illustré sur la figure 3-7 [23]. Le condensateur  $C_1$  est chargé à  $V_{DD}-V_T$  quand le clk est haut. En même temps, la grille du transistor commutateur est connectée à la masse par l'intermédiaire du transistor  $M_3$ . Quand l'horloge descend,  $C_1$  fournit à la grille du transistor commutateur la tension  $2V_{DD}-V_T$ . Dans la pratique, la tension est légèrement inférieure en raison des capacités parasites.

Dans le circuit précédent le condensateur préchargeant est effectué par le transistor relié comme diode  $M_1$  de type NMOS. Ce commutateur limite la tension de pré-charge à  $V_{DD}-$

$V_T$ . Sur la figure 3-8 (un autre circuit de pompe de charge locale [3, 4]) le condensateur (maintenant  $C_2$ ) est préchargé par un commutateur  $M_2$  de type NMOS. Le condensateur peut être chargé à  $V_{DD}$  puisque la grille du  $M_2$  est commandée par une tension amplifiée produite avec  $M_1$  et  $C_1$  [25].

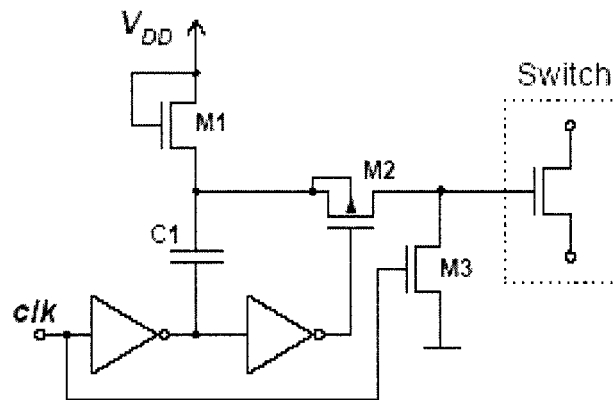


Figure 3-7. Commutateur MOS avec le circuit local d'«amorçage» (boosting) de la tension de grille [23].

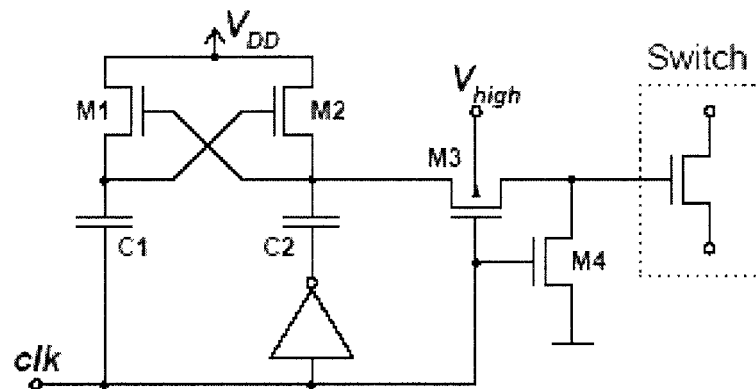


Figure 3-8. Un autre circuit local d'«amorçage» (boosting) de grille pour un commutateur MOS [3].

La bonne polarisation du PMOS  $M_3$  est produite avec une autre pompe de charge. Autres circuits d'«amorçage» peuvent être trouvés dans les références [8, 38, 32].

### 3.3.3 L'«amorçage» (bootstrapping) simple du commutateur

Pour éviter de violer les spécifications de fiabilité de la technologie, la tension grille-source du transistor (ou grille-drain) ne doit pas excéder la tension d'alimentation nominale. Tenant compte de cette condition, l'«amorçage» (boosting) du commutateur peut être réalisé en faisant suivre la tension de grille et la tension de source avec une tension de décalage (offset- $V_{DC}$ ), qui est, à son maximum, égale à la tension d'alimentation. Cette technique est illustrée sur la figure 3-9.

En plus de la fiabilité, un autre avantage de ce circuit est que la tension de grille-source du commutateur est constante et, en conséquence, une source importante de non-linéarité dans l'équation (3-5) est considérablement atténuée. Sur la figure 3-9 le circuit est implémenté avec un condensateur commuté, qui est préchargé dans chaque cycle d'horloge. Pendant la phase d'horloge, quand le transistor est inactif, le condensateur  $C_1$  est préchargé à  $V_{DC}$ .

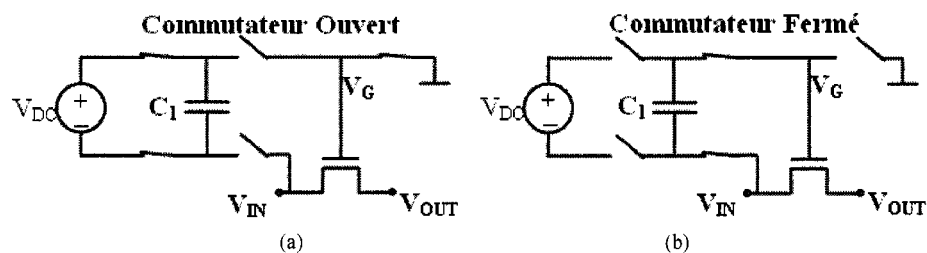


Figure 3-9. Un commutateur «amorcé» (bootstrapped) (a) ouvert (b) fermé [3].

Pour activer le commutateur, le condensateur est commuté entre la tension d'entrée et la grille du transistor. La tension de la grille, cependant, n'est pas exactement la somme de la tension d'entrée et de la tension de précharge, puisque les capacités parasites liées au transistor commutateur et aux commutateurs auxiliaires causent une certaine déformation.

Une implémentation pratique du commutateur amorcé est illustrée sur la figure 3-10 [1, 2]. La tension de décalage de ce circuit est réalisée avec le condensateur  $C_1$ , qui est préchargé à  $V_{DD}$  pendant la période d'ouverture du commutateur principale MS (Main Switch). Pour fermer ce commutateur, le condensateur préchargé est connecté entre sa source et sa grille par l'intermédiaire des commutateurs  $M_1$  et  $M_4$  disposés en série. L'ouverture de MS est effectuée en débranchant le condensateur  $C_1$  ( $M_4$  ouvert) de sa grille et la connectée à  $V_{SS}$  ( $M_5$  et  $M_6$  fermés). Le transistor  $M_5$  est nécessaire pour empêcher la tension grille-source de  $M_6$  d'excéder  $V_{DD}$ . Quelques autres commutateurs amorcés sont présentés dans [30], [9] et [27]. Ces circuits, cependant, ne sont pas visés pour des technologies submicroniques et ainsi pas nécessairement appropriés pour de basses tensions d'alimentation.

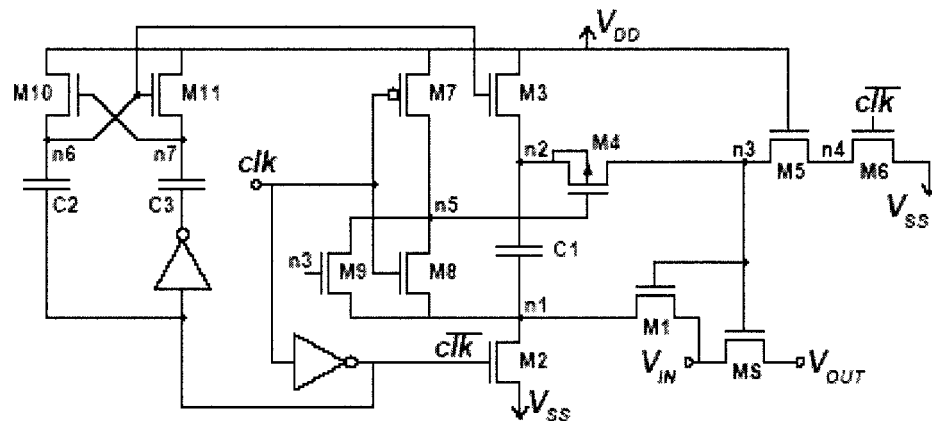


Figure 3-10. Un commutateur amorcé fiable à long terme [1, 2].

### 3.3.4 Le commutateur à double amorçage

En regardant l'équation (3-5), on constate que le terme dominant  $[V_G - (V_S + V_D)/2]$  n'est pas rendu exactement constant avec les techniques présentés jusqu'ici. En effet, bien que les tensions du drain et de source soient près l'un de l'autre, elles ne sont pas identiques en



raison du courant qui traverse le commutateur, ce qui limite la linéarité. Un circuit proposé dans [35] d'une façon à surmonter ce problème est illustré sur la figure 3-11. Pendant le mode ouvert, la grille du commutateur MS est reliée à  $V_{SS}$  par l'intermédiaire des transistors  $M_5$  et  $M_6$ , alors que les condensateurs  $C_{1a}$  et  $C_{1b}$  sont chargés par  $M_{2(a,b)}$  et  $M_{3(a,b)}$ . Lorsque MS est fermé, les condensateurs chargés à  $V_{DD}$  seront reliés simultanément entre les jonctions grille/drain et grille/source du commutateur MS par l'intermédiaire des transistors  $M_{1(a,b)}$  et  $M_{4(a,b)}$ .

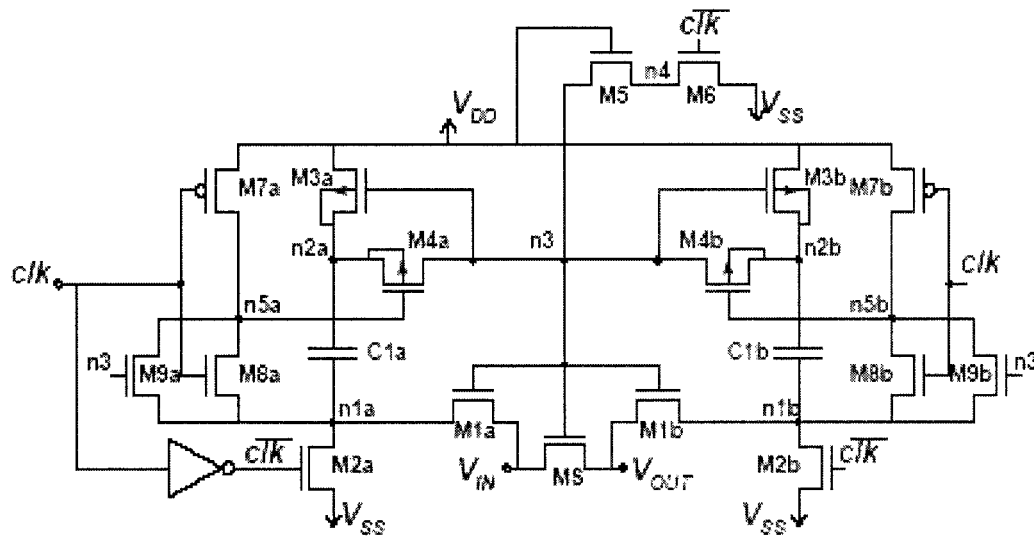


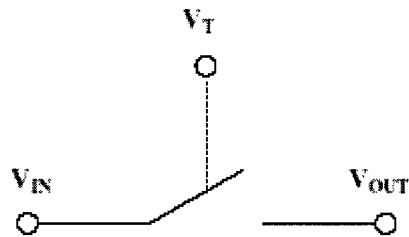
Figure3-11. Un commutateur à double amorçage [35].

L'idée derrière cette technique est de laisser la grille du transistor commutateur suivre la moyenne du drain et de la tension de source plutôt que l'une ou l'autre d'eux. Ceci est accompli en ajoutant un autre condensateur d'amorçage du côté de la sortie du transistor commutateur, et alors le nom approprié pour cette technique est ainsi double amorçage. La capacité totale n'a pas besoin d'être augmentée, puisque le condensateur d'amorçage original peut être divisé en deux parties égales sans sacrifier la précision. Il s'avère

d'après les simulations que l'amélioration de la linéarité peut être de l'ordre de 5 décibels au niveau du 2ème harmonique.

### 3.4 Modélisation comportementale des commutateurs

Le langage de programmation Verilog-A est un outil important dans la conception des circuits analogiques. Le plus grand avantage de cet outil est sa compatibilité avec le logiciel Cadence, ce qui nous permet de simuler des blocs Verilog-A en tant que des composantes électroniques. Cet avantage a été utilisé pour concevoir le circuit échantillonneur bloqueur de ce projet, ce qui était très bénéfique afin de détecter quels sont les transistors critiques qui introduisent les distorsions. Le modèle du commutateur illustré sur la figure 3-12 peut être vu comme une résistance à deux états, le premier c'est  $R_{ON}$  dans le cas où le commutateur est fermé, et pour le cas inverse c'est  $R_{OFF}$ .



**Figure3-12.** Le modèle du commutateur utilisé.

Les valeurs des résistances  $R_{ON}$  et  $R_{OFF}$  sont utilisées comme des paramètres ce qui facilite la simulation.  $R_{OFF}$  est toujours une résistance très élevée (dans l'ordre de centaines de Mégaohms), alors ce qui reste à changer c'est  $R_{ON}$  afin d'optimiser le circuit. La procédure

d'optimisation se fait comme suit. Les valeurs  $R_{ON}$  des commutateurs de l'EB donnant les meilleures performances peuvent être vu comme des résistances  $R_{DS}$  (résistance de drain/source) de transistors, et à partir de cette dernière on peut déduire les dimensions (W et L) de chaque transistor comme il est indiqué par l'équation 3-6.

$$R_{ON} = \frac{1}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{gs} - V_T)} \quad (3-6)$$

Le modèle Verilog-A des commutateurs utilisé est illustré en annexe B.

### 3.5 Génération du signal d'horloge

L'opération des différents blocs des circuits à base de condensateurs commutés est synchronisée avec un signal d'horloge. Tant que le front d'horloge d'échantillonnage arrive avant celui qui complète la phase de blocage, le circuit est très robuste contre les petites incertitudes de synchronisation aux fronts d'horloge. Dans la partie frontale d'un ADC (au niveau de notre circuit EB), où l'horloge est utilisée pour échantillonner un signal à temps continu, la situation est complètement différente.

N'importe quelle déviation du moment d'échantillonnage de sa valeur idéale a comme conséquence une tension d'erreur dans le signal échantillonné. L'erreur est égale au changement du signal entre ces deux moments. Ainsi, l'horloge d'échantillonnage doit être considérée comme un signal analogique sensible et doit être traitée avec délicatesse. Le moment d'échantillonnage est déterminé par le passage à zéro du signal d'horloge, qui correspond aux moments où la phase d'horloge est un multiple entier de  $2\pi$ . Les variations aléatoires de la phase, également connu sous le nom du bruit de phase, sont

une source d'erreurs de synchronisation. Le bruit de phase est habituellement indiqué avec la densité spectrale du bruit à bande latérale simple  $\mathcal{L}(f)$ , qui, étant un paramètre du domaine de fréquence, ne reflète pas toujours une bonne image de l'erreur de synchronisation. Un paramètre relatif du domaine de temps, la gigue, est défini comme une erreur RMS entre un point de temps de référence et le passage à zéro du signal d'horloge. La gigue cycle à cycle est défini comme la gigue qui change d'une période d'horloge à une autre, ce type d'erreur est souvent d'intérêt et le passage à zéro précédent est pris comme point de référence.

### 3.5.1 La gigue

L'erreur instantanée de tension provoquée par la gigue  $\Delta t$  peut être approximativement écrite comme le montre l'équation 3-7.

$$V_n \approx \Delta t \cdot \frac{dV_s(t)}{dt} = \Delta t \cdot A_s \cdot 2\pi f \cos(2\pi f t) \quad (3-7)$$

où  $V_s(t)$  est la forme d'onde du signal, qui dans la deuxième partie de l'équation 3-7 on a assumé que c'est une sinusoïde avec une amplitude  $A_s$  et une fréquence  $f$ . L'erreur de tension RMS peut être obtenue en mettant l'équation 3-7 à la puissance deux et en l'intégrant sur une période du signal, résultant avec l'équation 3-8.

$$\overline{V_n} = \Delta t \cdot A_s \cdot \sqrt{2\pi f} \quad (3-8)$$

En utilisant cette dernière, le rapport signal/bruit peut être calculé pour donner l'équation 3-9.

$$SNR = 20 \cdot \log(2\pi f \Delta t) \quad (3-9)$$

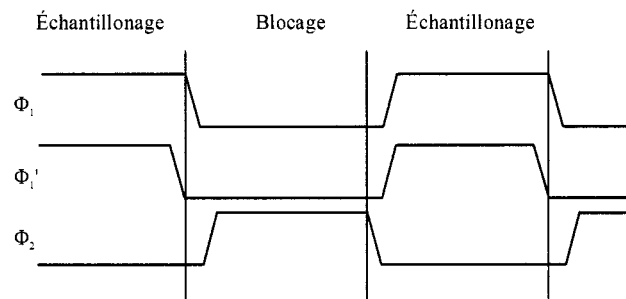
On peut noter que le SNR est indépendant de l'amplitude du signal et qu'il diminue quand la fréquence du signal augmente. La gigue maximum permet pour une valeur fixe du SNR est donnée par l'équation 3-10.

$$\Delta t \approx \frac{1}{f \cdot 10^{\frac{SNR+16}{20}}} \quad (3-10)$$

Où  $10^{16/20} \approx 2\pi$ . Il n'y a pas beaucoup de techniques pour réduire les effets de la gigue. Le sur-échantillonnage peut être utilisé pour étaler le bruit blanc résultant de la gigue sur une plus grande plage de fréquence, ce qui permet au SNR d'être amélioré avec décimation et filtrage à temps discret [7].

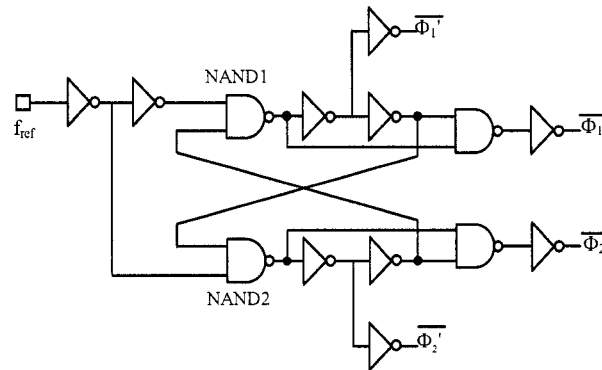
### 3.5.2 Le circuit d'horloge

L'architecture du circuit EB qui a été choisie parmi plusieurs autres topologies dans le chapitre 2 nécessite une horloge qui génère des signaux non-recouverts tel qu'illustré à la figure 3-13.



**Figure 3-13.** Les signaux d'horloge utilisés dans le circuit EB.

Pour produire des signaux pareils le générateur d'horloge peut être réalisé avec un circuit simple en utilisant des portes logiques comme il est montré sur la figure 3-14.



**Figure 3-14.** Le circuit d'horloge utilisé dans l'EB.

On se basant sur l'idée que le front descendant de l'horloge d'entrée passe par la porte NAND1 et les deux inverseurs qui la précède, alors que le front montant se propage par un seul inverseur puis par la porte NAND2. Les signaux  $\overline{\Phi_1}$  et  $\overline{\Phi_2}$  non recouverts résultants ont un temps non-recouvert égal à la somme du retard de la porte NAND1 (ou NAND2) et celui des deux inverseurs qui suivent. Les éléments qui introduisent le retard sont habituellement réalisés avec une chaîne de paire d'inverseurs. L'avantage principal de ce circuit est sa simplicité. Au moins une partie des tampons de sortie peut être incluse dans les éléments du retard, rendant le circuit tout à fait robuste. D'autre part, le temps de non recouvrement devient souvent plus grand que nécessaire en raison de la présence des tampons des sorties.

### 3.5.3 Les tampons de sortie

L'amortissement sur-puce des signaux d'horloge est nécessaire principalement pour deux raisons. D'abord, les charges capacitives dans les lignes d'horloge peuvent être grandes, exigeant que les amortisseurs maintiennent les bords d'horloge aigus. En second lieu,

l'horloge d'entrée habituellement ne peut pas être directement utilisée, mais elle est seulement une entrée pour le générateur d'horloge, qui produit les signaux non recouverts. Après le générateur d'horloge, les signaux sont amortis pour réaliser la capacité de charge exigée. Le circuit d'amortissement est l'endroit critique où un signal d'horloge, qui a à l'origine une gigue bas et qui peut facilement être aggravé.

## CHAPITRE 4

# MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION

Nous décrivons dans ce chapitre la méthodologie de conception adoptée dans ce projet et qui reflète la contribution apportée à la réalisation des circuits EB à hautes performances. Cette méthodologie consiste à utiliser les modèles Verilog-A des différents blocs de l'EB dans le processus d'optimisation du circuit afin de trouver les différentes sources de distorsion, cette technique nous aide à minimiser les imperfections pour que le circuit puisse atteindre les meilleures performances possibles. Il est à noter que l'EB conçu représente le bloc frontal dédié à un CAN pipeliné, et il est responsable de l'élimination de la plupart des erreurs dynamiques [5].

Dans ce chapitre aussi on va présenter la conception des différents blocs de l'EB qui ont été expliqués dans les chapitres précédents. Ce chapitre sera organisé de la façon suivante. D'abord, nous présentons la conception de l'amplificateur opérationnel différentiel, qui sera suivi par l'optimisation de l'EB avec les modèles Verilog-A, et la



simulation. En second lieu, nous aborderons la conception des commutateurs de l'EB en se basant sur l'utilisation de leurs modèles Verilog-A qui ont été conçus dans le chapitre 3, et présenterons l'application et l'optimisation de ces caractéristiques résultantes. Finalement, le générateur d'horloge et le dessin des masques seront détaillés.

#### 4.1 L'amplificateur opérationnel

En utilisant les modèles Verilog-A de l'amplificateur décrit dans le chapitre 2 et des commutateurs conçus au chapitre 3, le circuit EB idéal illustré sur la figure 4-1 sera analysé et optimisé. Les paramètres les plus critiques de l'amplificateur qui peuvent affecter d'une façon directe les performances de l'EB sont: le gain DC, la fréquence du gain unitaire et le taux de réaction. Plus les valeurs de ces paramètres seront élevées, plus les performances de l'EB seront hautes, alors il est important d'accorder une bonne attention à ces paramètres dans la procédure de conception, ou autrement dit, nous avons besoin d'un amplificateur ayant des valeurs de ces trois paramètres critiques aussi hautes que possibles.

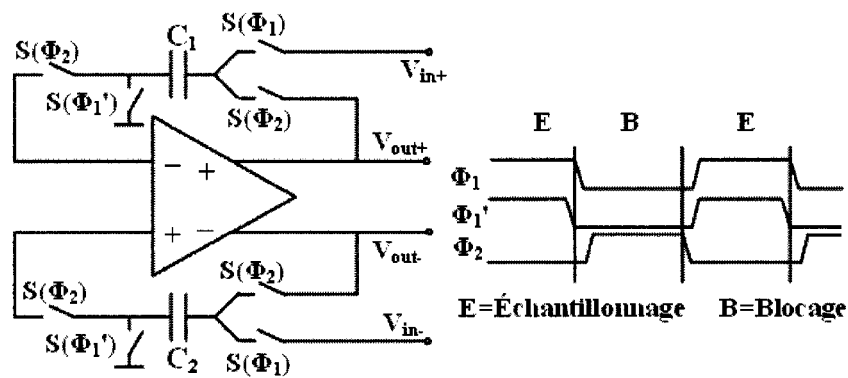


Figure 4-1. L'architecture du circuit EB.

Les prochaines sections récapituleront les points proéminents d'optimisation de l'amplificateur illustrée sur la figure 4-2 qui a été présenté dans le chapitre 2.

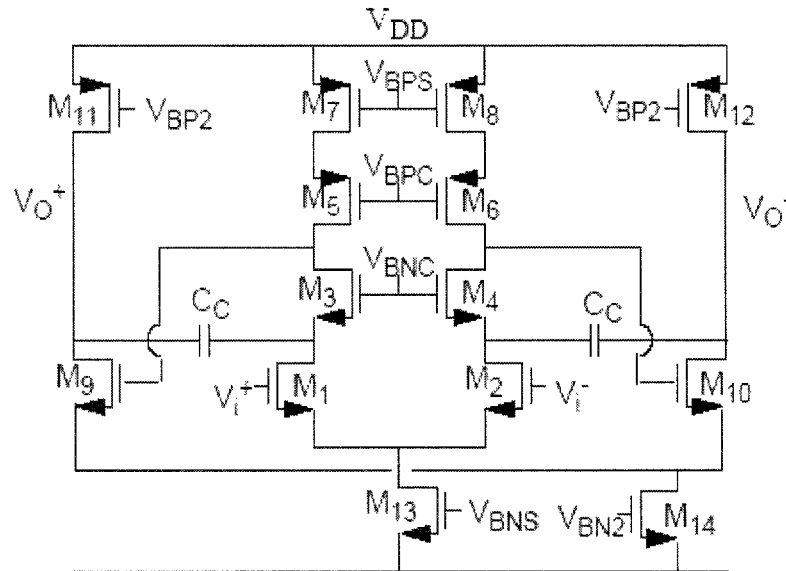


Figure 4-2. L'amplificateur utilisé pour concevoir l'EB.

#### 4.1.1 Le gain DC

La résistance de sortie d'un transistor peut être écrite sous la forme de l'équations (4-1a).

$$r_o \approx \frac{1}{\lambda I} \quad (4-1a)$$

$$r_o \propto L \quad (4-1b)$$

où  $\lambda$  est la constante d'impédance de sortie,  $I$  est le courant du canal et  $L$  est la longueur de la grille. Comme cette résistance est proportionnelle à la longueur du transistor, et ainsi qu'il a été démontré dans la section 2.3.3, les longueurs des transistors  $M_7$ ,  $M_8$ ,  $M_{11}$  et  $M_{12}$  (figure 4-2) doivent être augmenté pour élever le gain DC de l'amplificateur.

### 4.1.2 La fréquence du gain unitaire

Comme il est montré dans la section 2.3.4, la fréquence du gain unitaire est illustrée par l'équation 4-2.

$$\omega_{uT} \approx \frac{g_{m1}}{C_C} \cdot F_{FB} \quad (4-2)$$

où  $F_{FB}$  est le facteur de rétroaction,  $C_C$  est le condensateur de compensation et  $g_{m1}$  est la transconductance de  $M_1$ . Nous pouvons conclure qu'en augmentant  $g_{m1}$  (soit le courant  $I_1$ ) ou en diminuant la capacité  $C_C$ , la fréquence du gain unitaire augmentera. Il a également été prouvé dans la section 2.3.4, qu'afin de déplacer le deuxième et le troisième pôle aussi loin que possible du premier, le concepteur doit faire en sorte que les équations 4-3 et 4-4 soient toujours satisfaites.

$$g_{m9} \gg g_{m1} \cdot F_{FB} \cdot \frac{1}{C_C} \quad (4-3)$$

$$g_{m3} \gg g_{m1} \cdot F_{FB} \quad (4-4)$$

### 4.1.3 Le temps de réaction

Tel qu'il a été montré dans la section 2.3.5, le taux de montée (descente) maximal (SR) de l'amplificateur est égal à l'équation 4-5.

$$SR = \min\left(\frac{2I_1}{C_C}, \frac{2I_9}{C_C + C_L}\right) \quad (4-5)$$

En augmentant les courants de polarisation  $I_1$  et  $I_9$ , nous pouvons directement augmenter le taux de réaction de l'amplificateur.

#### 4.1.4 L'optimisation de l'amplificateur

Pour obtenir certaines directives sur lesquelles les différents paramètres devraient être changés afin d'augmenter les performances de l'amplificateur, le tableau 4-1 illustre les dépendances qui ont été dérivées.

**Tableau 4-1.** Directives d'optimisation.

|                          | $A_{DC}$   | $f_{ut}$     | $P_2$      | $P_3$        |
|--------------------------|------------|--------------|------------|--------------|
| $W_{1,2} \uparrow$       | $\uparrow$ | $\uparrow$   | /          | /            |
| $L_{1,2} \downarrow$     | $\uparrow$ | $\uparrow$   | /          | /            |
| $I_{1,2} \uparrow$       | $\uparrow$ | $\uparrow$   | /          | /            |
| $L_{7,8,11,12} \uparrow$ | $\uparrow$ | /            | /          | /            |
| $L_9 \downarrow$         | $\uparrow$ | /            | $\uparrow$ | /            |
| $L_3 \downarrow$         | $\uparrow$ | /            | /          | $\uparrow$   |
| $C_C \uparrow$           | /          | $\downarrow$ | /          | $\downarrow$ |

Basé sur le tableau 4-1, le processus d'optimisation est fait en changeant les dimensions des transistors, les courants et les tensions de polarisation afin de garder toujours le restant des transistors de l'amplificateur dans la région de saturation. Aussi il faut optimiser l'amplificateur pour qu'il atteigne les performances les plus élevées. La consommation en puissance totale de l'amplificateur doit être gardé au minimum. En utilisant ces compromis, le tableau 4-2 donne les tensions  $V_{DS}$  résultantes.

**Tableau 4-2.** Valeurs des tensions  $V_{DS}$  des transistors de l'amplificateur.

|                              |                               |                               |                                 |
|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| $V_{DS1,2} = 448.5\text{mV}$ | $V_{DS5,6} = -499.7\text{mV}$ | $V_{DS9,10} = 538.2\text{mV}$ | $V_{DS13,13m} = 304.7\text{mV}$ |
| $V_{DS3,4} = 295\text{mV}$   | $V_{DS7,8} = -252.2\text{mV}$ | $V_{DS11,12} = -900\text{mV}$ | $V_{DS14,14m} = 361.9\text{mV}$ |

Les dimensions des différentes composantes de l'amplificateur à deux étages sont illustrées dans le tableau 4-3. Notons que tous les transistors dans ce tableau opèrent dans la région de saturation.

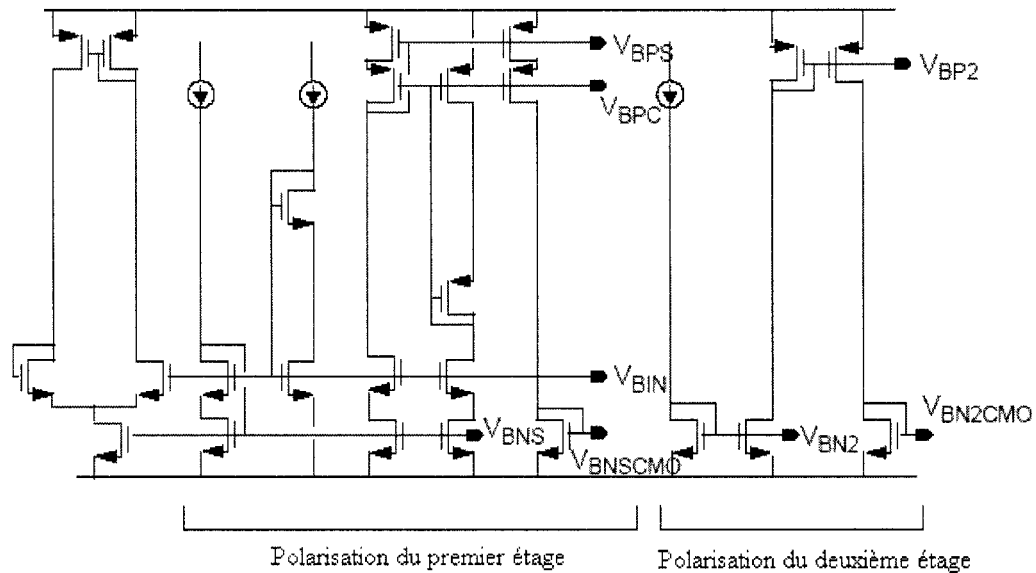
**Tableau 4-3.** Les dimensions des différents dispositifs de l'amplificateur.

| Dispositifs                                | Valeurs    |
|--|------------|
| $M_{1,2}$ ( $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ )    | 108/0.54   |
| $M_{3,4}$ ( $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ )    | 32/0.54    |
| $M_{5,6}$ ( $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ )    | 135/0.72   |
| $M_{7,8}$ ( $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ )    | 549/1      |
| $M_{9,10}$ ( $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ )   | 115.9/0.25 |
| $M_{11,12}$ ( $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ )  | 276.5/0.54 |
| $M_{13,13m}$ ( $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ ) | 40/0.54    |
| $M_{14,14m}$ ( $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ ) | 80/0.54    |
| $C_c$ (pF)                                 | 1          |

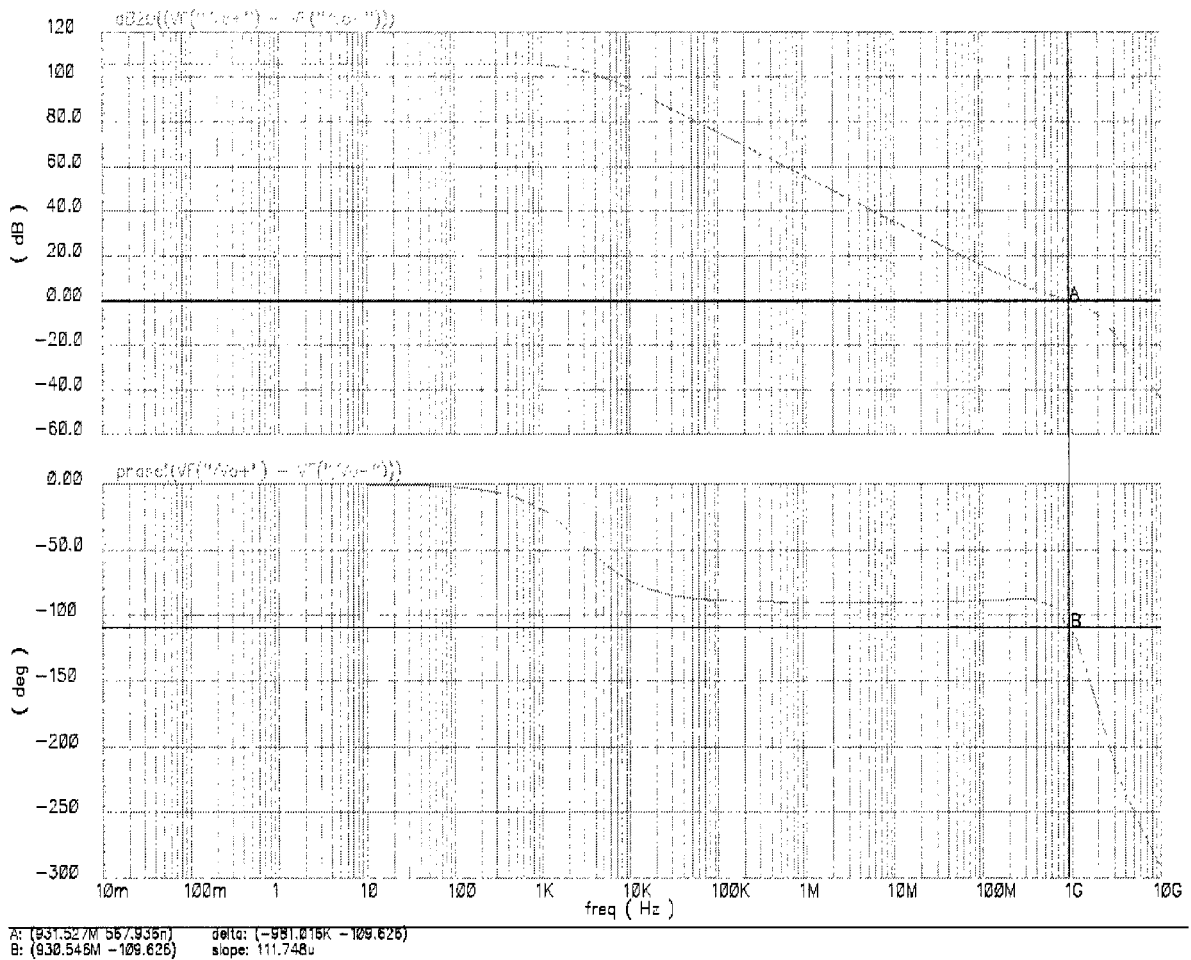
Afin de maximiser les performances de l'amplificateur, un circuit de polarisation robuste doit être conçu (figure 4-3). Pour le faire, nous avons utilisé un circuit à gamme dynamique élevée. Ce qui assure le bon fonctionnement du circuit avec la variation du processus de fabrication et d'alimentation. Aussi pour avoir une gamme dynamique élevée de l'amplificateur. Puisque cette application est pour un CAN, une spécification a été exigée sur le signal d'entrée pour avoir une amplitude différentielle crête à crête d'une valeur de 1.2V. Les valeurs des tensions de polarisations résultant après l'optimisation finale de l'amplificateur sont montrées au tableau 4-4.

**Tableau 4-4.** Tensions de polarisations de l'amplificateur.

|                               |                               |                                    |                                  |
|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| $V_{BPS} = 354 \text{ mV}$    | $V_{BNC} = 148.2 \text{ mV}$  | $V_{BNS\_CMO} = -344.2 \text{ mV}$ | $V_{BN2} = -266 \text{ mV}$      |
| $V_{BPC} = -27.53 \text{ mV}$ | $V_{BNS} = -340.2 \text{ mV}$ | $V_{BP2} = 136.4 \text{ mV}$       | $V_{BN2\_CMO} = -339 \text{ mV}$ |

**Figure 4-3.** Circuit de polarisation de l'amplificateur.

Les caractéristiques fréquentielles de l'amplificateur intégrant les résultats de tous les tableaux précédents sont montrées sur la figure 4-4. À partir de cette figure nous pouvons constater que le gain DC est égal à 106.1dB avec une fréquence du gain unitaire de 931MHz et une marge de phase d'environ 71°. La figure 4-5 montre que le taux de réaction de l'amplificateur a une valeur de 300V/μA. En ce qui concerne le temps de stabilisation, la figure 4-6 montre un bon rétablissement après un délai d'environ 3.8 ns. De plus, la consommation de puissance de l'amplificateur est de 6.9mW.



**Figure 4-4.** Caractéristiques fréquentielles de l'amplificateur.

Le rôle du CMFB est de fixer les tensions aux noeuds de sorties aux impédances élevées à leurs valeurs requises. Des transistors avec des tailles minimales ont été utilisés puisqu'ils sont mis dans ce circuit comme des commutateurs. Le condensateur  $C_M$  a une valeur de 200 fF et  $C_{CM}$  de 50fF pour les deux étages. Le niveau DC du signal de sortie doit être placé à 0V, puisque notre amplificateur fonctionne avec une source d'alimentation de  $\pm 900\text{mV}$ . Nous avons réussi à obtenir un niveau DC de  $50\mu\text{V}$  à la sortie.

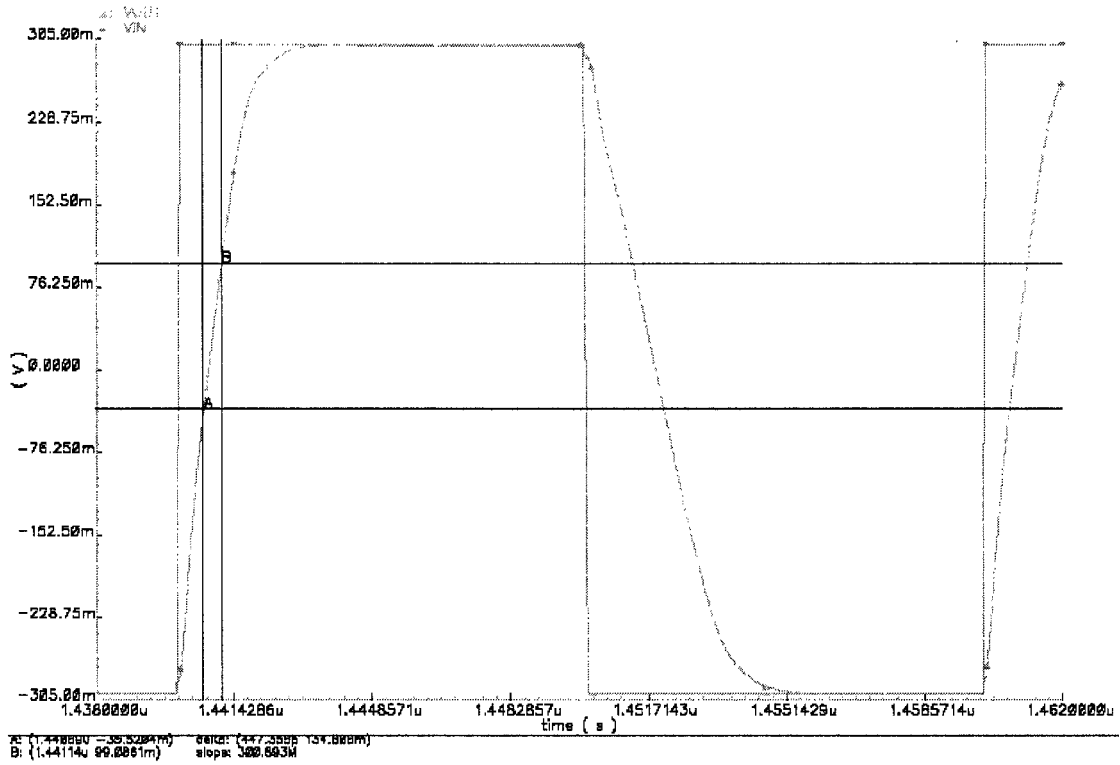


Figure 4-5. Taux de réaction de l'amplificateur.

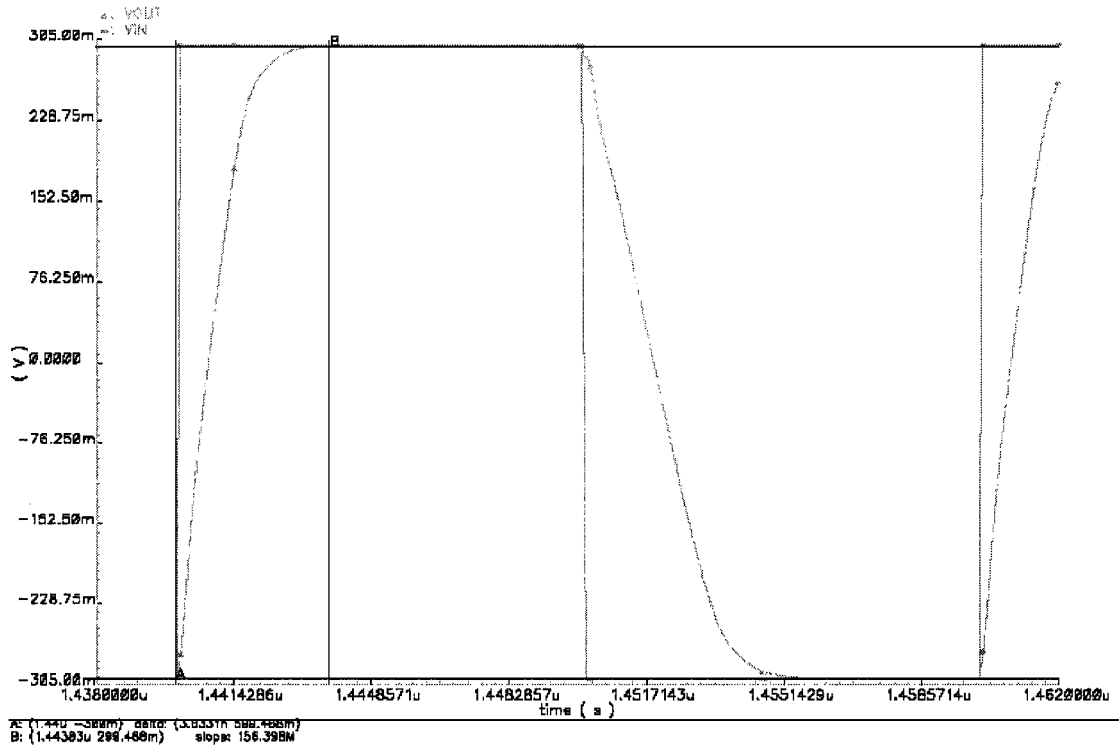


Figure 4-6. Temps de stabilisation de l'amplificateur.



## 4.2 Les commutateurs

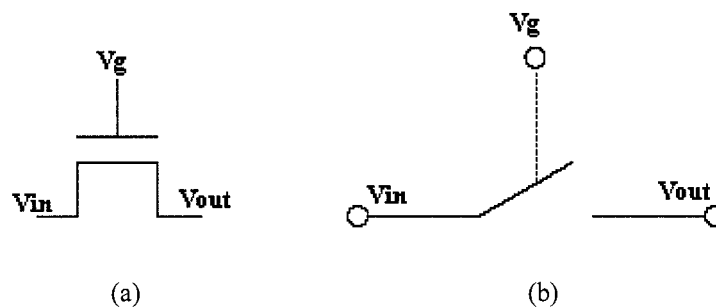
Une nouvelle méthodologie de conception des circuits EB s'avère d'une grande importance du moment où nous cherchons à atteindre de hautes performances, et surtout quand il s'agit d'un circuit opérant à une haute fréquence [6]. Nous présentons dans cette section le noyau d'une nouvelle technique de conception pour les EB qui a permis d'obtenir les résultats escomptés avec une fréquence d'échantillonnage de 50MHz et un signal d'entrée d'une largeur de bande de 20MHz.

La modélisation Verilog-A du circuit conçu peut nous aider à trouver les sources d'imperfection et en conséquence faire une meilleure optimisation. À partir de cette idée, nous avons accéléré l'optimisation des commutateurs de l'EB qui représentent la plus importante source d'imperfection. Nous avons pu constater qu'il existe un certain ensemble de valeurs  $R_{ON}$  des commutateurs pour lesquelles l'EB peut atteindre ces meilleures performances.

La procédure d'optimisation a commencé par le remplacement des commutateurs de l'EB (figure 4-1) par leurs modèles Verilog-A (figure 4-7). Les commutateurs ont une résistance ( $R_{ON}$ ) tel qu'illustré dans l'équation 4-6. On a connecté la sortie de l'EB à un bloc Verilog-A. Ce dernier prend des échantillons du signal de sortie à une fréquence de 50MHz et la met dans un fichier sous forme de matrice. Ce fichier peut être traité avec MATLAB afin de voir les performances de l'EB (le code de ce bloc se trouve en annexe B). En changeant les différentes valeurs  $R_{ON}$  des commutateurs nous avons pu optimiser l'EB pour qu'il puisse atteindre ces meilleures performances. Le tableau 4-5 résume les résultats de cette étape d'optimisation. Finalement on remplace le modèle Verilog-A de

chaque commutateur par un transistor ayant des valeurs de  $W$  et  $L$  ( $R_{ON}$ ) semblables à celles des modèles. Ensuite, on ajuste à nouveau les valeurs pour mieux adapter les transistors dans le circuit, cette étape est résumée dans le tableau 4-6.

$$R_{ON} = \frac{1}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{gs} - V_T)} \quad (4-6)$$



**Figure 4-7.** Commutateur utilisé: (a) transistor NMOS, (b) modèle Verilog-A.

**Tableau 4-5.** Optimisation des commutateurs (modèles Verilog-A).

|                                | $S(\Phi_1)$ | $S(\Phi_1')$ | $S(\Phi_2)$<br>Amplificateur (entrée) | $S(\Phi_2)$<br>Amplificateur (sortie) |
|--------------------------------|-------------|--------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| $R_{ON}(\Omega)$               | 26          | 2.72         | 37                                    | 207.5                                 |
| $W/L(\mu\text{m}/\mu\text{m})$ | 40/0.25     | 274/0.18     | 20/0.18                               | 10/0.5                                |

À partir de la figure 4-1, les commutateurs  $S(\Phi_1)$  sont les plus critiques puisqu'ils sont à l'entrée de l'EB. C'est pour cette raison qu'ils ont été remplacés par des commutateurs à double amorçage (section 3.3.4) afin de réduire la linéarité à l'entrée du circuit. Il est à noter que le commutateur principal (MS) de ce circuit a été remplacé par un transistor optimisé en Verilog-A tel qu'il est expliqué au début de cette section.

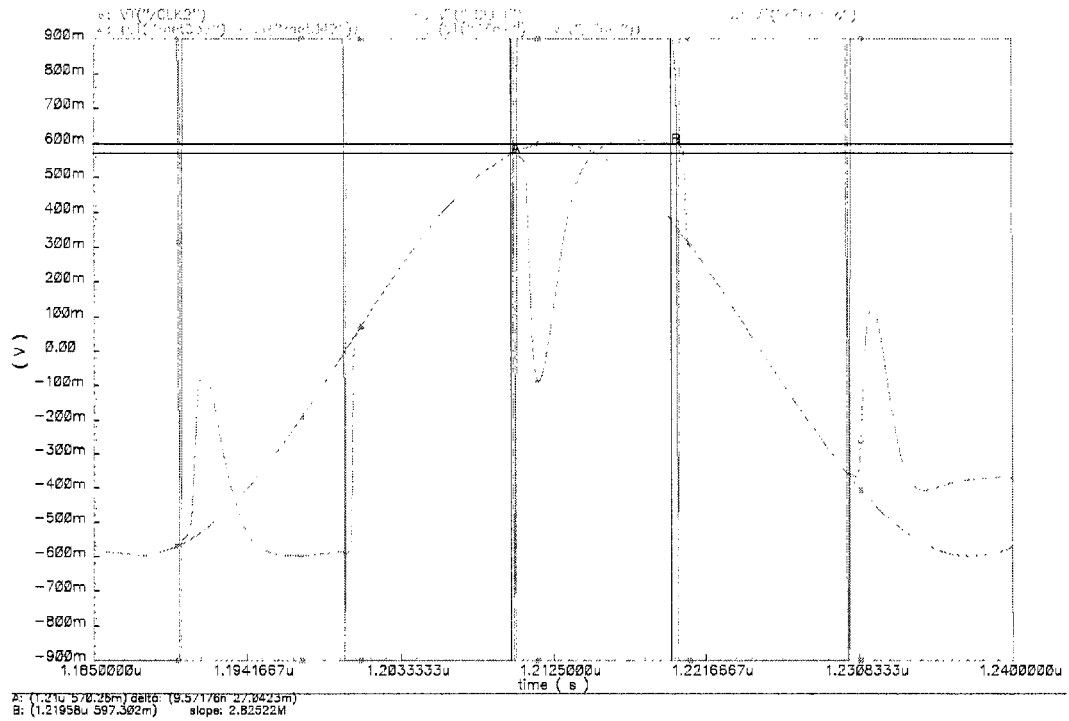
**Tableau 4-6.** Adaptation du circuit avec des transistors (CMOS 0.18 $\mu\text{m}$ ).

|                                | $S(\Phi_1)$ | $S(\Phi_1')$ | $S(\Phi_2)$<br>Amplificateur (entrée) | $S(\Phi_2)$<br>Amplificateur (sortie) |
|--------------------------------|-------------|--------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| $R_{on}(\Omega)$               | 20.7        | 2.49         | 25                                    | 186.8                                 |
| $W/L(\mu\text{m}/\mu\text{m})$ | 50/0.25     | 300/0.18     | 30/0.18                               | 4/0.5                                 |

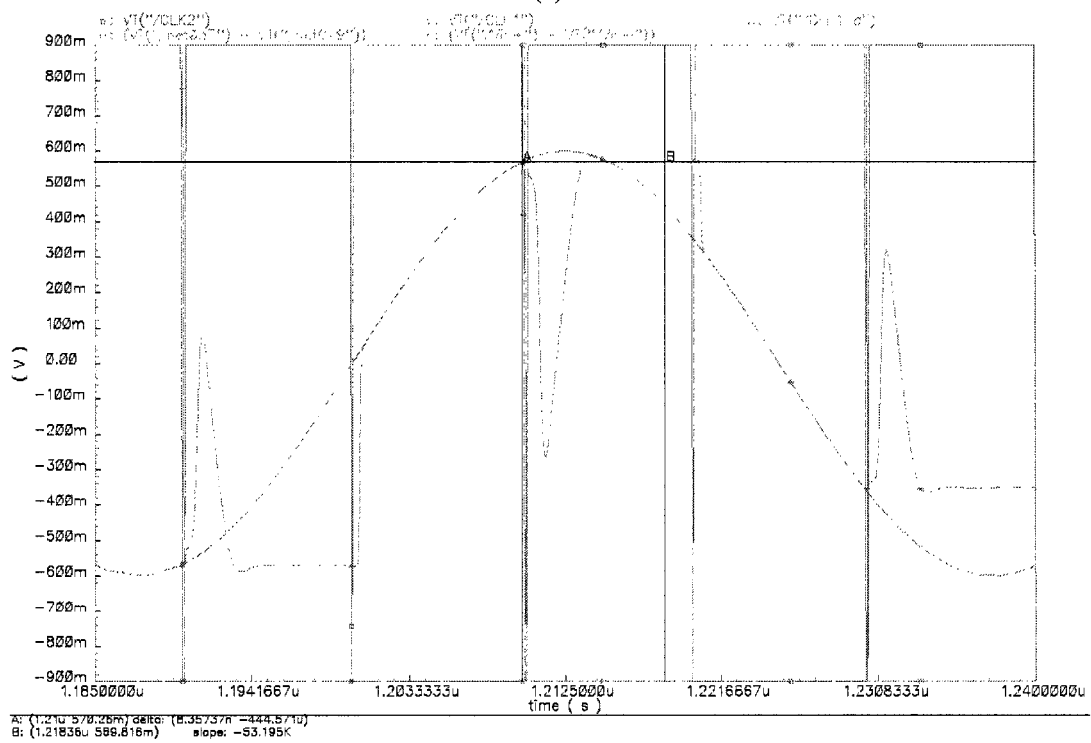
En outre sur la figure 4-1, les commutateurs  $S(\Phi_2)$  ont été remplacés pendant la phase d'optimisation par des transistors «Natifs». Ce type de transistors se trouve directement sur le substrat, et présente une tension de seuil ( $V_{th}$ ) de quelques dizaines de millivolts. Il est à noter que ce type de transistors, utilisé pour la première fois dans un circuit EB, a donné un meilleur résultat que celui obtenu par des transistors NMOS ou PMOS (figure 4-8). Ceci montre clairement l'effet de linéarisation de ce genre de commutateurs, en plus de la minimisation de l'erreur piédestal de l'EB. Cette erreur est défini dans la section 1-1 comme la différence des valeurs de la sortie à la fin du mode suiveur et pendant le mode de blocage. En utilisant un transistor NMOS, l'erreur piédestal était autour de 35mV en bloquant un échantillon de 588mV tandis qu'elle était réduite à seulement 440 $\mu\text{V}$  à l'aide d'un commutateur natif en bloquant le même échantillon.

### 4.3 L'horloge

Comme il a été expliqué au chapitre 3 l'architecture choisie du circuit EB nécessite un générateur d'horloge spécial afin de réaliser deux propriétés importantes. La première est le non chevauchement des phases d'horloge pour s'assurer que les phases



(a)

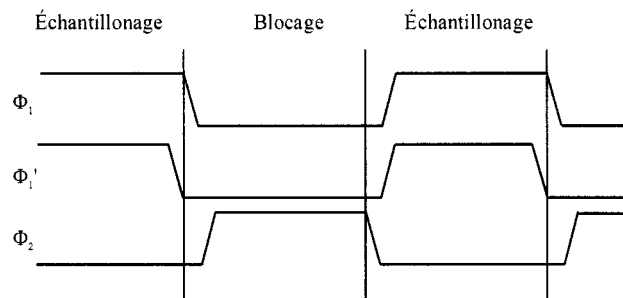


(b)

**Figure 4-8.** Signal de sortie de l'EB en remplaçant le commutateur  $S(\Phi_2)$  par  
 (a) un transistor normal (b) un transistor natif.

d'échantillonnage et du blocage ne se font jamais en même temps. La deuxième propriété est le signal retardé qui est important pour réaliser la technique d'embase (section 3.2).

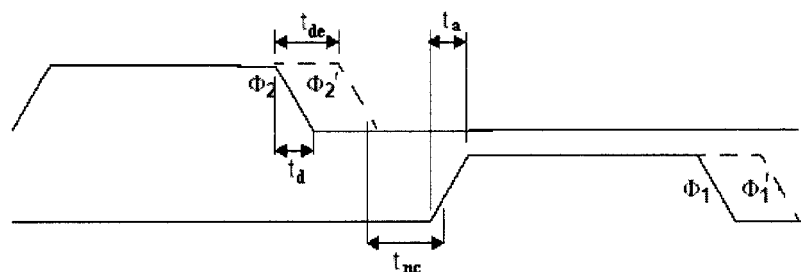
La figure 4-9 illustre les signaux d'horloge (non chevauchés) requis. Pour la réalisation du circuit d'horloge la librairie «vst\_n18\_sc\_tsm\_c4» fournie par la Société Canadienne de Microélectronique (SCM) a été utilisée. Cette dernière regroupe plusieurs boîtes noires qui contiennent différents circuits logiques et leurs dessins des masques.



**Figure 4-9.** Les signaux d'horloge utilisés dans le circuit EB.

Les simulations du circuit ont donné des résultats satisfaisants, comme il est montré sur la figure 4-10. Les paramètres temporels sont  $t_d = 50\text{ps}$  est le temps de transition de l'état logique haut à l'état logique bas,  $t_a = 50\text{ps}$  est le temps de la transition inverse,  $t_{de} = 500\text{ps}$  est le délai pour la technique d'embase, et  $t_{nc} = 100\text{ps}$  est le temps de non chevauchement.

Les résultats de simulation sont illustrés sur les figures 4-11 et 4-12.



**Figure 4-10.** Paramètres temporels des signaux d'horloge.

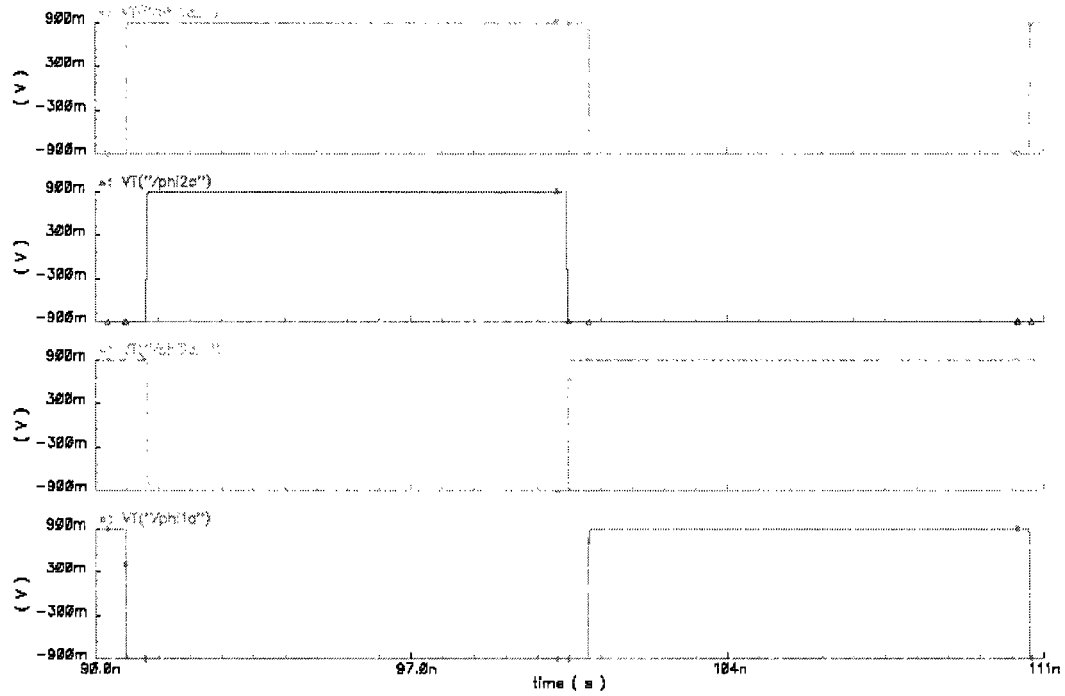


Figure 4-11. Simulation de signaux d'horloge.

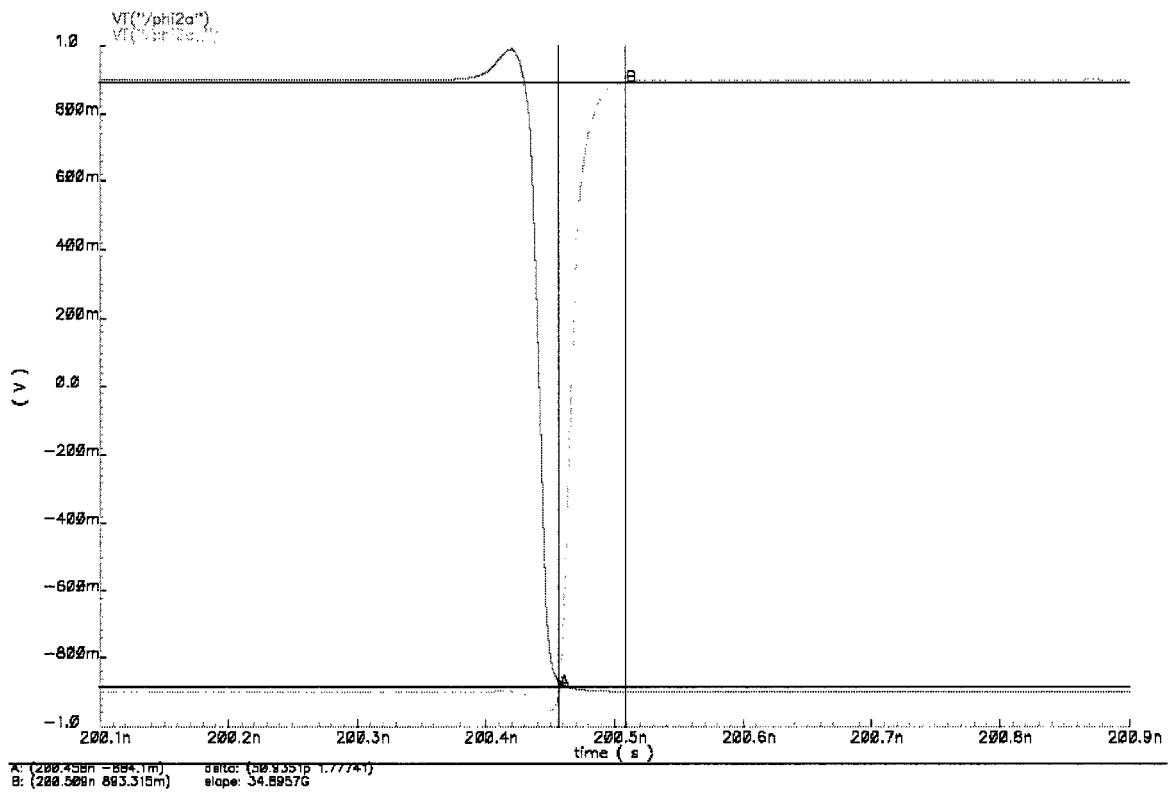


Figure 4-12. Transition simulée de signaux d'horloge.

## 4.4 Dessin des masques

Une importance particulière a été accordée à la réalisation du dessin des masques de l'EB afin de réduire le bruit et avoir la meilleure adaptation (matching) des transistors. Il est à noter que le dessin des masques a été élaboré en utilisant l'outil de Cadence «Layout-XL» qui peut générer à partir d'un schématique le dessin des masques de tout le circuit mais sans les connexions, ni les techniques de protection qui seront expliquées plus loin dans cette section. Néanmoins cet outil nous a permis d'accélérer l'implémentation du dessin des masques de l'EB et du CAN.

Durant l'implémentation du dessin des masques de l'EB, il faut tenir en compte la protection du circuit contre le bruit. La puce contient une partie numérique et une autre analogique. À chaque fois une grille dans la partie numérique change d'état, un «glitch» s'injecte à l'alimentation. En séparant l'alimentation des deux parties (analogique & numérique), nous empêchons alors ce bruit d'affecter les circuits analogiques. Au niveau des transistors chaque groupe peut être protégé séparément en le mettant à l'intérieur d'un anneau d'armature. Ce dernier consiste d'un dopage P relié à  $V_{SS}$  pour les transistors NMOS et un dopage de type N relié à  $V_{DD}$  pour les transistors PMOS. Un exemple illustre sur la figure 4-13 le cas d'un transistor NMOS.

Le matching des transistors est particulièrement nécessaire pour la réalisation des amplificateurs. Ceci permet de réduire les erreurs causées par l'effet du gradient à travers la puce lors du changement de température ou du dopage causé par le procédé de fabrication. La figure 4-14 illustre le matching des deux transistors M1 et M2.

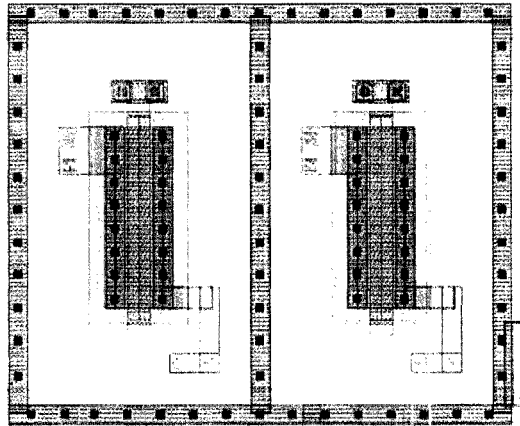


Figure 4-13. Anneaux d'armature des transistors.

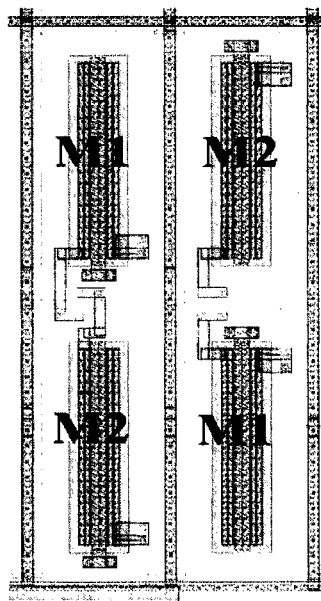


Figure 4-14. Le matching des transistors.

Très souvent, les circuits analogiques exigent des rapports de condensateurs précis. Les sources importantes des erreurs pour la réalisation des condensateurs sont dues à l'excès de gravure (qui rend la surface plus petite que la surface des masques) et au gradient de l'épaisseur d'oxyde à travers la surface de la puce. Le premier effet est habituellement



dominant et peut être réduit au minimum en réalisant des grands condensateurs à partir d'une combinaison parallèle de plus petits condensateurs unitaires semblables à ce qui est fait pour les transistors. La figure 4-15 illustre le matching des condensateurs tel qu'implémenté sur la puce.

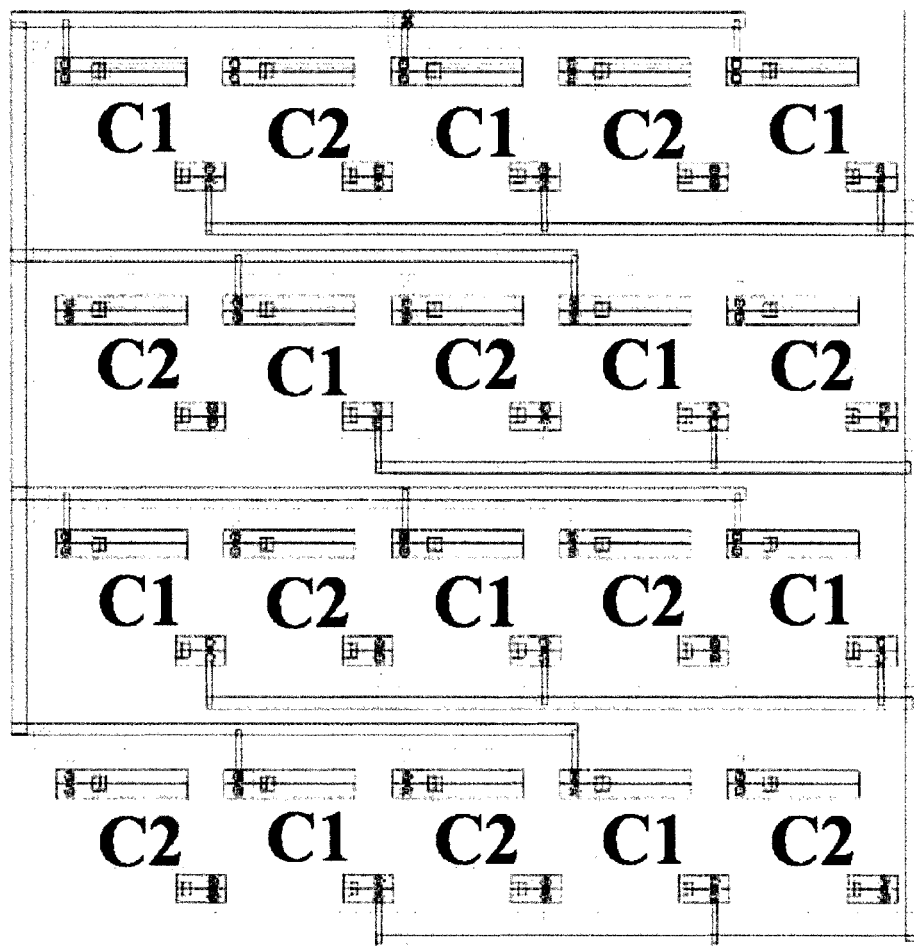


Figure 4-15. Le matching des condensateurs.

Nous avons survolé dans ce chapitre la méthodologie de conception de l'EB, en commençant par l'amplificateur et ces performances, et en expliquant la nouvelle

technique d'optimisation Verilog-A du circuit global. Nous avons ensuite rapporté l'implémentation et la simulation du circuit d'horloge, ainsi que les différentes techniques utilisées pour la réalisation du dessin des masques. Les résultats expérimentaux de l'EB font l'objet du prochain chapitre.

## CHAPITRE 5

# IMPLÉMENTATION & RÉSULTATS

Nous avons constaté durant l'implémentation du CAN que le dessin des masques d'un circuit analogique est très critique. Les capacités parasites peuvent détériorer le fonctionnement du circuit et le rendre complètement non fonctionnel. Pour résoudre ce problème chaque bloc a été implémenté, optimisé et testé indépendamment avant de tester le circuit global. Durant cette phase une optimisation au niveau du dessin des masques a été appliquée, ce qui a prit un temps de simulation très long et a rendu l'implémentation de la puce électronique plus compliquée.

Dans ce chapitre les résultats de simulation du dessin des masques de l'EB seront présentés. Ce dernier est conçu suivant la méthodologie de conception décrite au chapitre précédent. En premier lieu l'amplificateur opérationnel sera implémenté, optimisé et testé, puis le commutateur à double amorçage sera traité, et finalement les résultats de l'EB seront présentés et expliqués.

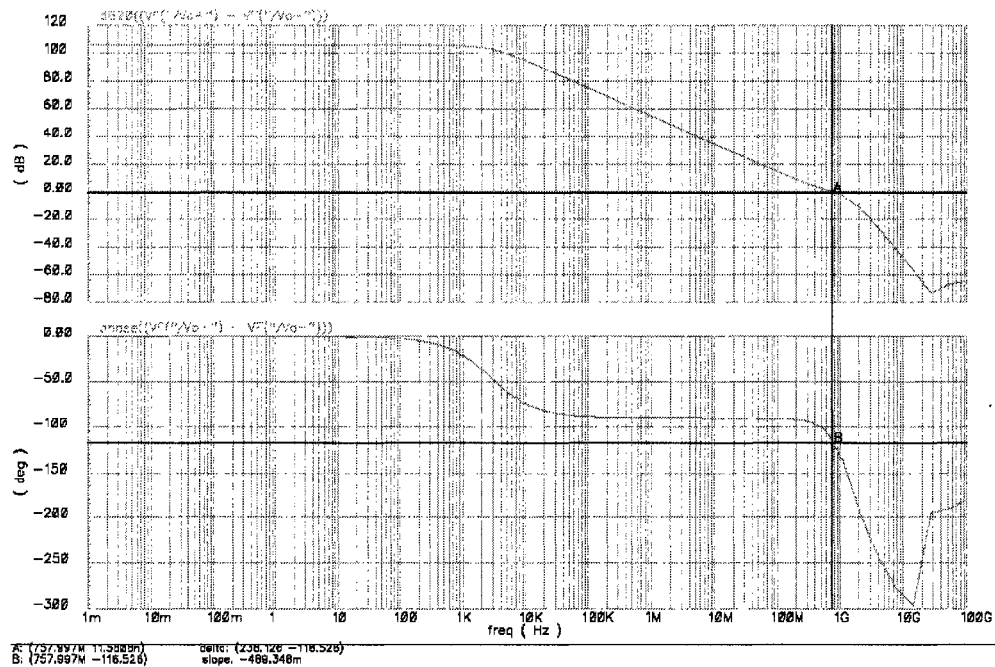
## 5.1 L'amplificateur opérationnel

L'implémentation de l'amplificateur est très critique car elle nécessite le matching des transistors qui est indispensable pour assurer le bon fonctionnement du circuit. Une bonne méthodologie de design peut nous économiser du temps (détection rapide d'erreurs) et faciliter la tâche d'implémentation. Nous avons remarqué que plus la symétrie sera présente dans le dessin des masques, plus l'implémentation sera facile et rapide. Il faut aussi tester chaque partie du circuit avant de combiner le circuit global. C'est pour cette raison que l'amplificateur a été subdivisé en plusieurs sous-blocs, chacun testé indépendamment. Finalement nous avons combiné tous les blocs pour aboutir au circuit global.

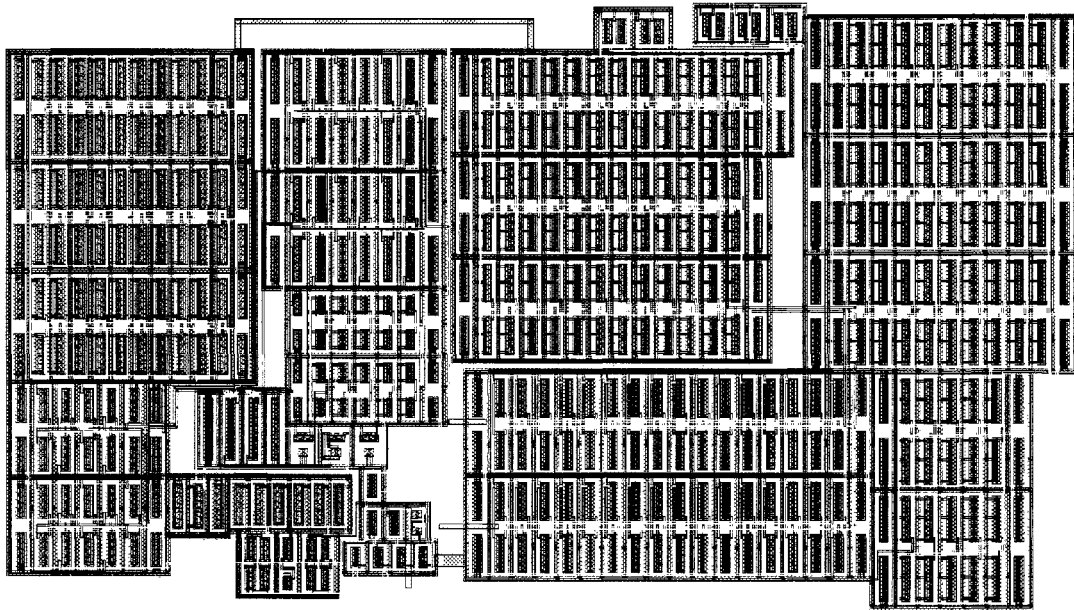
Les deux étages de l'amplificateur ont été implémentés avec une grande symétrie ce qui a résulté en circuits fonctionnels du premier test. Aussi les circuits de polarisation ont donné, dès la première implémentation, des tensions exactement comme celle du schématique. La simulation du circuit de rétroaction en mode commun (CMFB) a donné de bon résultats en tant que sous-bloc, mais en combinant tout l'amplificateur ce dernier n'avait pas fonctionné. Ceci a nécessité une optimisation au niveau du dessin des masques, ce qui est difficile à faire. Les transistors du CMFB ne nécessitent pas un assortiment, car ils fonctionnent en tant que commutateurs. Plusieurs changements ont été faites au niveau du dessin des masques du CMFB pour détecter la source de dysfonctionnement. Après un long test, nous avons constaté qu'en changeant les dimensions des commutateurs du CMFB (W de 250nm à 900nm) l'amplificateur s'est mis à fonctionner. La réponse en fréquence de l'amplificateur résultant est donnée à la figure

5-1. Nous avons constaté que le circuit a le même gain DC comme le schématique (106.1 dB) mais avec une dégradation dans la fréquence du gain unitaire de 930MHz à 758MHz et dans la marge de phase de  $71^\circ$  à  $63.5^\circ$ . Cette dégradation est due aux capacités parasites. Les résultats de cette simulation restent dans les marges sécuritaires du bon fonctionnement (stabilité) de l'amplificateur. Les condensateurs de compensation ont été réalisés aussi avec une grande symétrie ce qui a causé aucun problème de dysfonctionnement.

Le dessin des masques de l'amplificateur sans les condensateurs de compensation est illustré sur la figure 5-2, et il a une dimension de  $145\mu\text{m}$  par  $250\mu\text{m}$ . Une armature de protection a été implémentée pour l'amplificateur, et une autre pour les circuits de rétroaction en mode commun avec tous les condensateurs. La partie numérique et les commutateurs ont été implémentés sur le reste de la puce.



**Figure 5-1.** Simulation de la réponse en fréquence du dessin de masques de l'amplificateur.



**Figure 5-2.** Dessin des masques de l'amplificateur utilisé.

## 5.2 Le commutateur à double amorçage

Le commutateur à double amorçage placé à l'entrée de l'EB tel que nous l'avons expliqué au chapitre 3 est illustré à la figure 5-3. Ce type de commutateur nécessite une bonne symétrie, puisque le circuit placé entre la grille et le drain du commutateur principale (MS) est identique à celui entre la grille et la source du même commutateur. Les capacités parasites doivent être les mêmes des deux cotés du commutateur MS afin de minimiser les distorsions.

Le dessin des masques du commutateur à double amorçage implémenté avec une grande symétrie est illustré à la figure 5-4. Les simulations de ces dessins de masques ont donné les mêmes résultats que celles du schématique comme le montre la figure 5-5, où la différence de tension entre la grille et le drain (source) reste toujours égale à  $V_{DD}$ .

(900mV) pendant que le commutateur principale (MS) est fermé, et à  $V_{SS}$  (-900mV) pendant qu'il est ouvert.

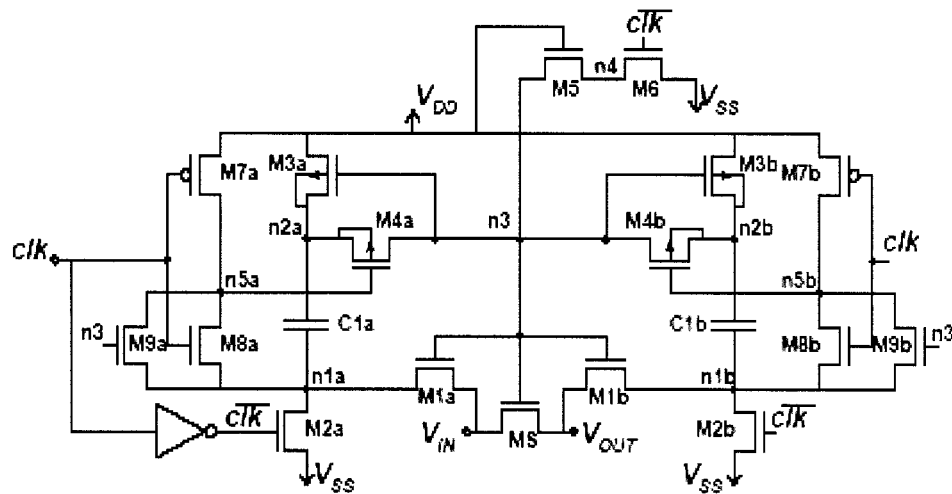


Figure 5-3. Commutateur à double amorçage [35].

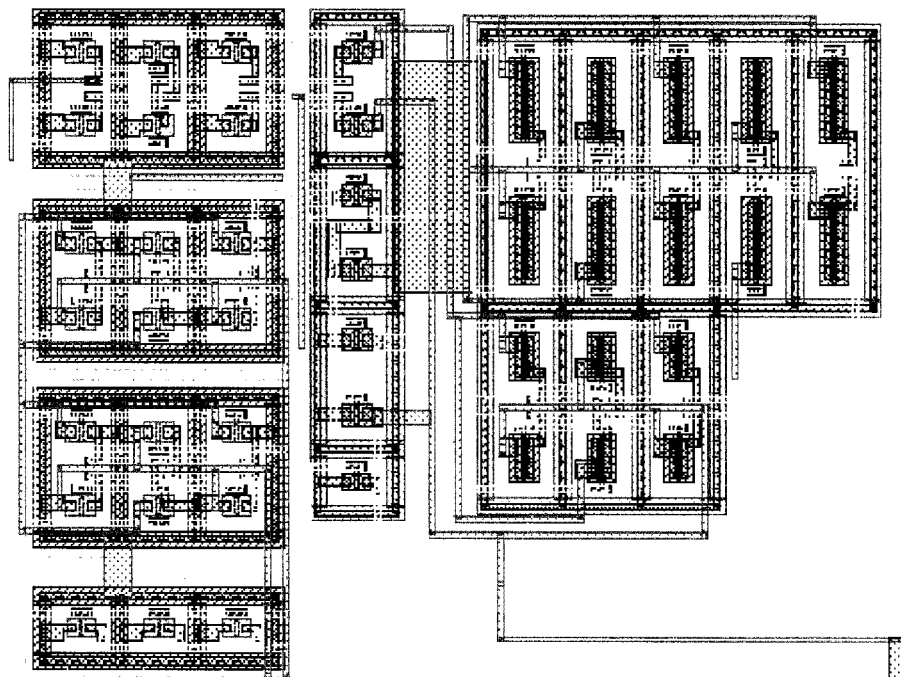
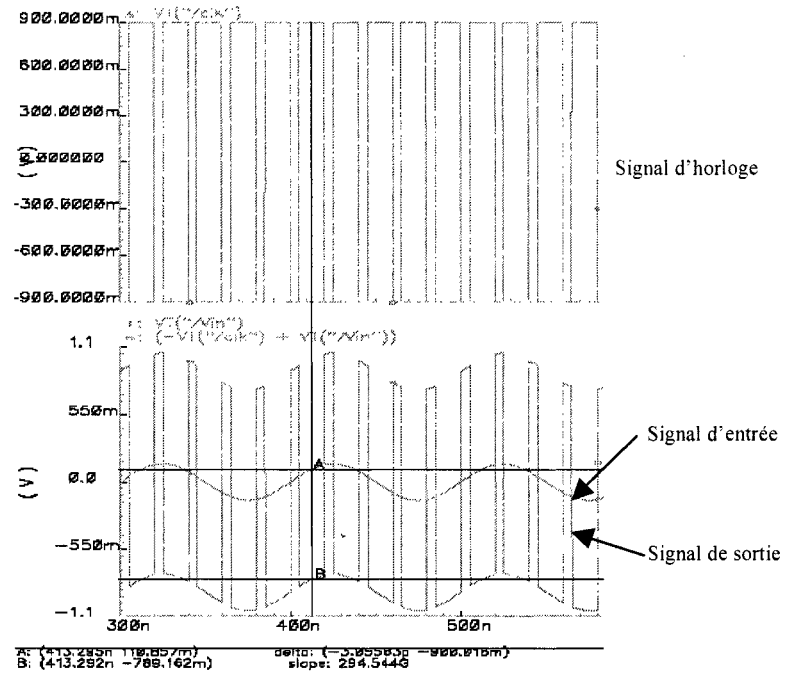
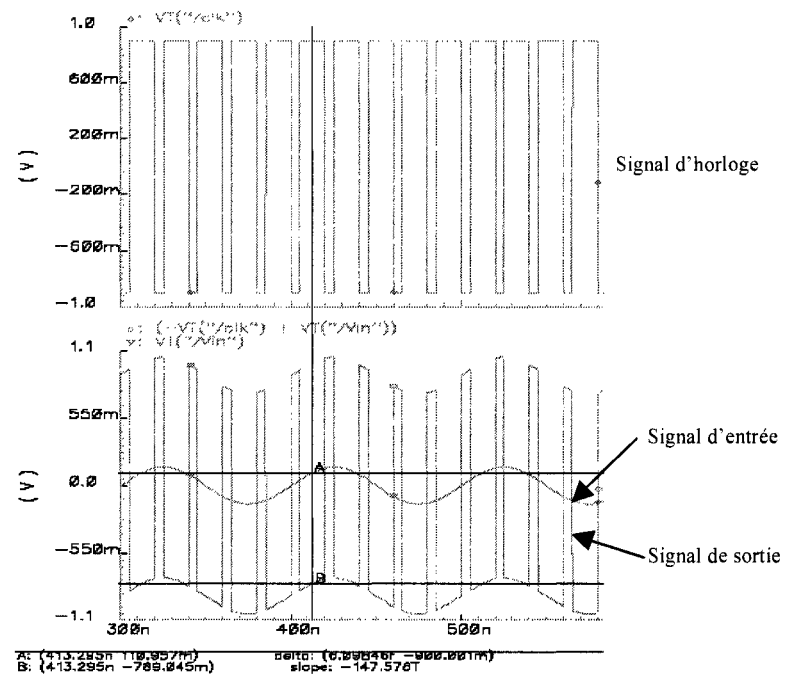


Figure 5-4. Dessin de masques du commutateur à double amorçage.



(a)



(b)

Figure 5-5. Simulation du commutateur (entrée et sortie) à double amorçage (a) schématique, (b) dessin des masques.



### 5.3 Le Circuit EB

Après que tous les sous-blocs ont été implémentés, optimisés et testés nous les avons combiné pour implémenter l'EB conçu dans le chapitre précédent. Le dessin des masques du circuit global de l'EB est illustré sur la figure 5-6. Il est à noter que l'amplificateur et les condensateurs ont été protégés par des anneaux d'armature pour assurer une seconde protection au circuit global.

Avant de présenter le résultat de l'EB conçu, nous avons remplacé les commutateurs à double amorçage  $S(\Phi_1)$  par les différents types de commutateurs présentés au chapitre 3. En remplaçant  $S(\Phi_1)$  par un transistor NMOS simple, puis une porte de transmission et finalement un commutateur à amorçage simple, nous avons pu montrer les performances de l'EB pour chaque technique. Afin de mieux visualiser les résultats, nous avons placé un bloc conçu en Verilog-A sur la sortie du circuit. Ce bloc permet de mettre les résultats sous forme de matrice dans un fichier, puis les analyser avec MATLAB. Le but est d'avoir un circuit avec le moins de distorsion possible (Maximiser le SFDR ou l'ENOB – annexe A).

La figure 5-7 représente le spectre de densité du signal de sortie en utilisant seulement un transistor NMOS à la place de  $S(\Phi_1)$ . Le signal d'entrée a une fréquence de 20MHz échantillonné à 50MHz. Le résultat a donné un SFDR de 44.6dB comme le montre la figure, qui est l'équivalent d'un ENOB de 6.4bits (annexe A). Il est à noter que ce type de commutateurs placé à l'entrée de l'EB a les mêmes dimensions que nous avons calculé dans le chapitre précédent ( $50\mu\text{m}/0.25\mu\text{m}$ ).

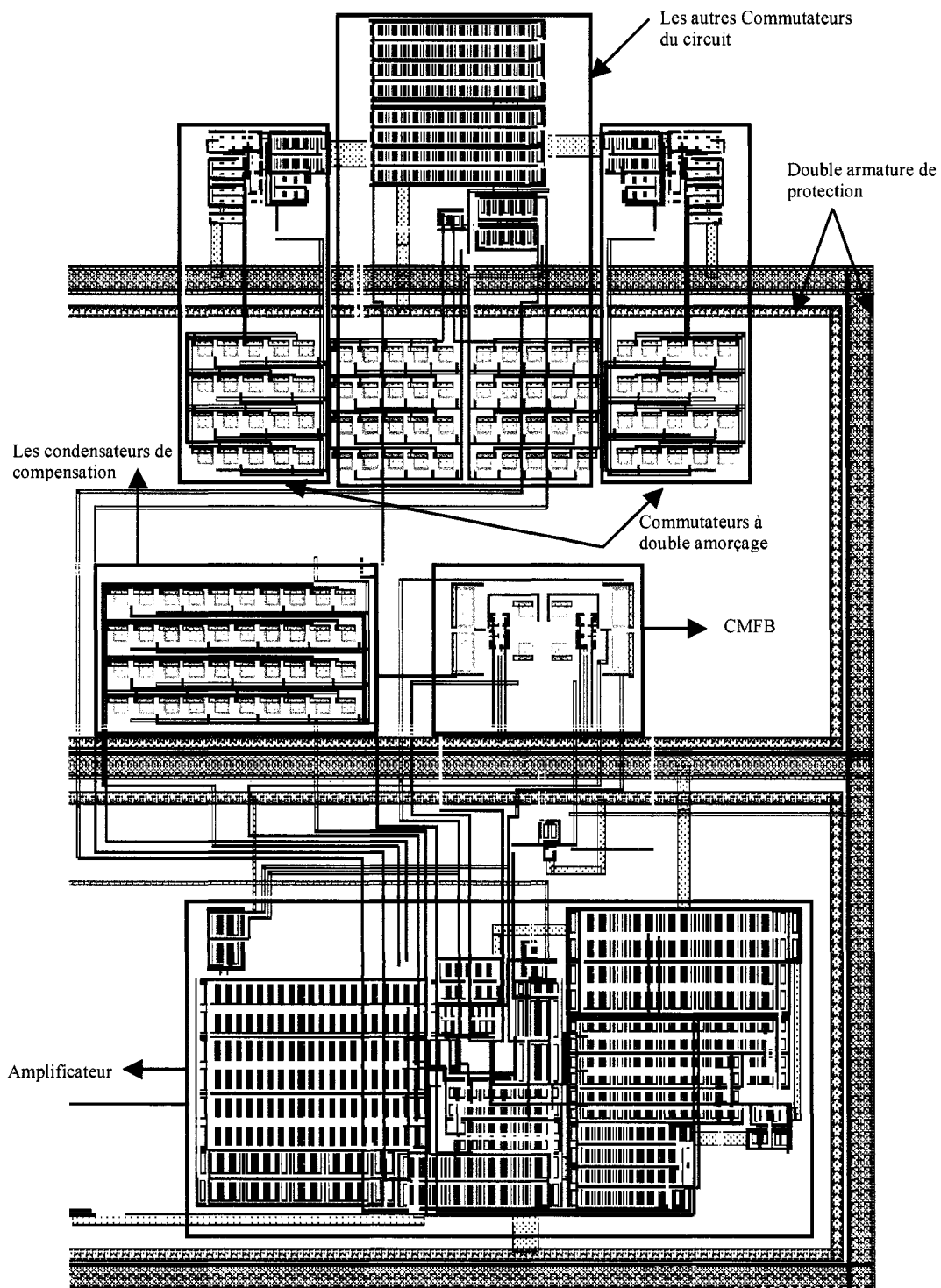
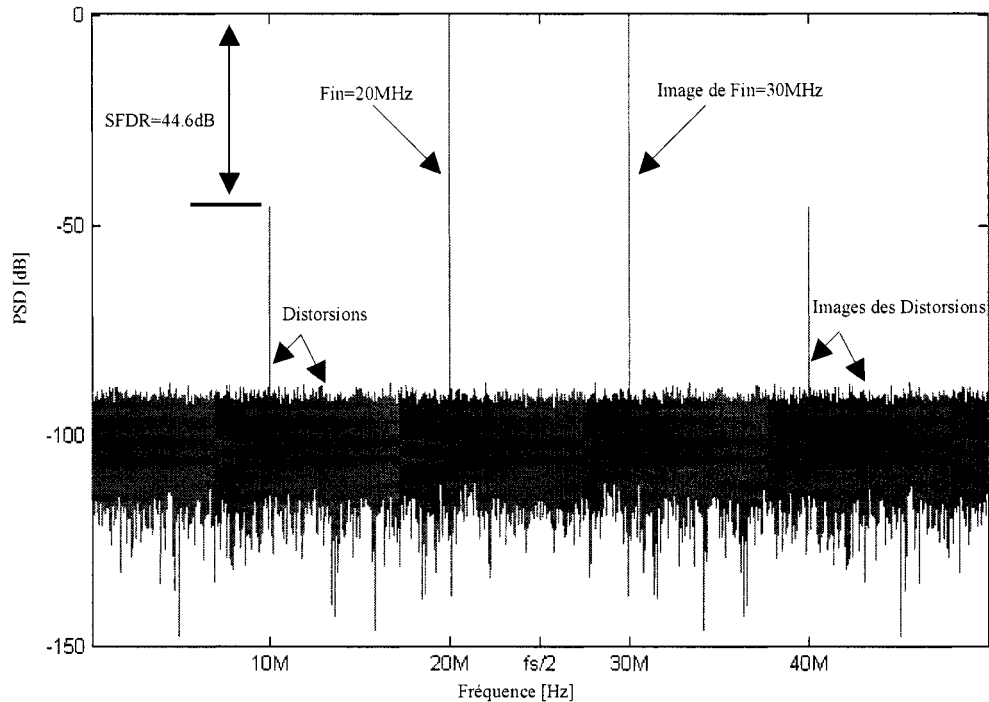


Figure 5-6. Dessin de masques de l'EB proposé.



**Figure 5-7.** FFT du signal de sortie de l'EB avec un commutateur NMOS à l'entrée.

La figure 5-8 représente le spectre de sortie en remplaçant  $S(\Phi_1)$  par une porte de transmission (section 3.3.1). Ce type de commutateur a donné un SFDR de 61.6dB comme le montre la figure, qui est l'équivalent d'un ENOB de 9.2bits. Le signal d'entrée est le même utilisé avec le commutateur précédent. Il est à noter que le transistor NMOS de ce commutateur a les mêmes dimensions calculés dans le chapitre précédent ( $50\mu\text{m}/0.25\mu\text{m}$ ), par contre le PMOS a le double des dimensions du NMOS ( $100\mu\text{m}/0.25\mu\text{m}$ ).

La figure 5-9 montre le spectre du signal de sortie en utilisant le commutateur à amorçage simple (section 3.3.3) au lieu du  $S(\Phi_1)$ . Le résultat donne un SFDR de 82.1dB, qui est l'équivalent d'un ENOB de 12.6bits.

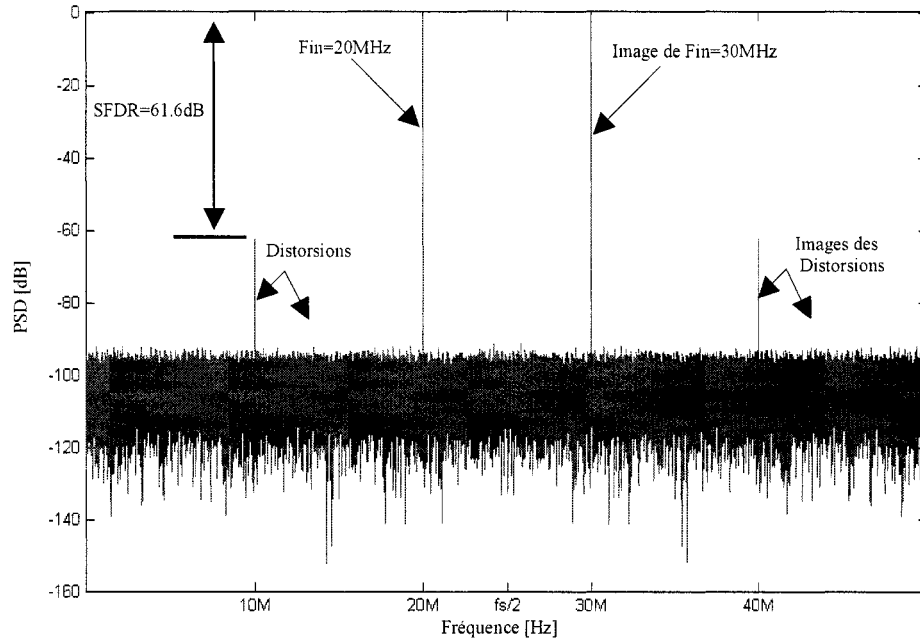


Figure 5-8. FFT du signal de sortie de l'EB avec une porte de transmission à l'entrée.

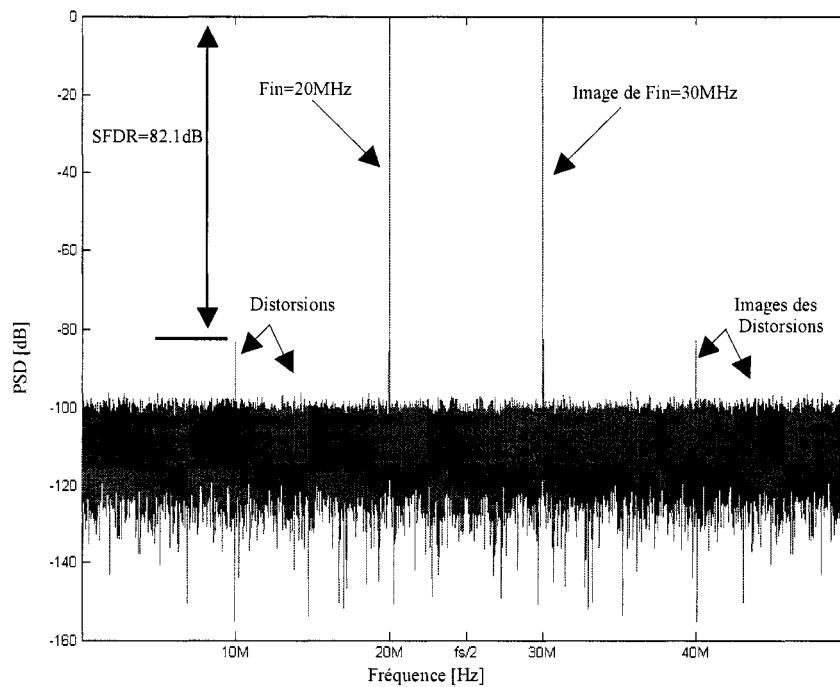
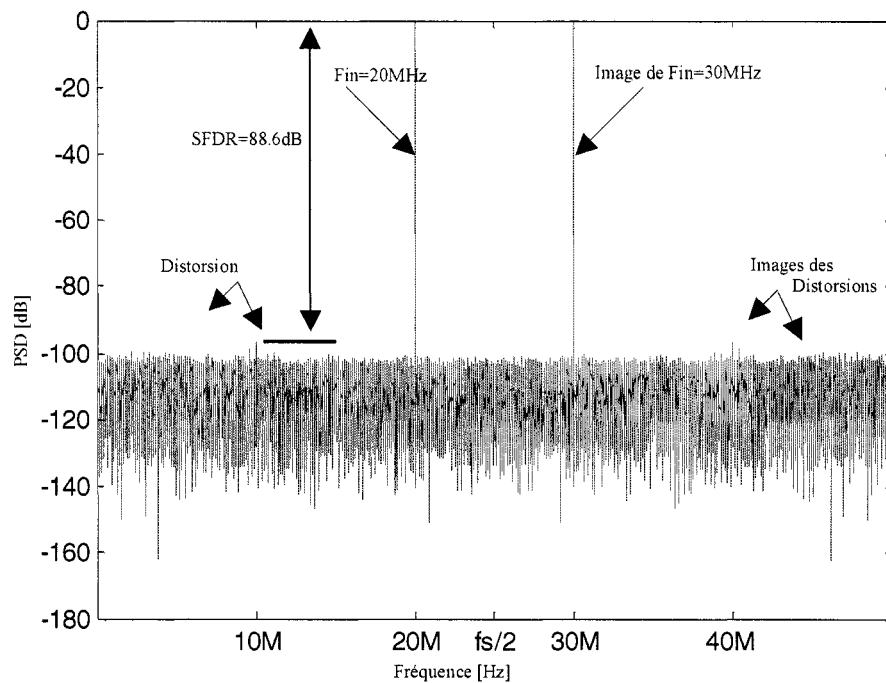


Figure 5-9. FFT du signal de sortie de l'EB avec un commutateur à amorçage simple.

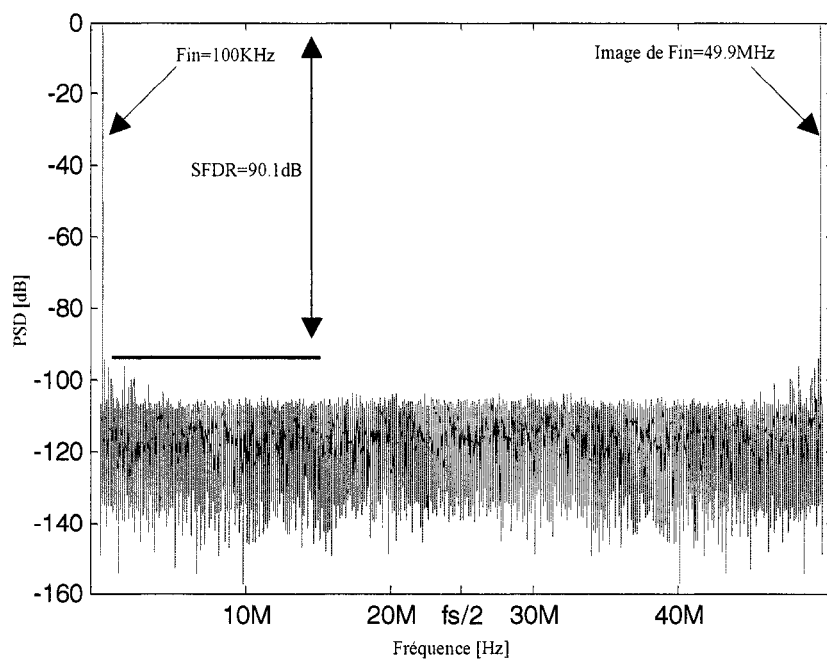
Finalement, nous avons appliqué la même technique d'amorçage simple sur les deux cotés (grille/source, grille/drain) du commutateur  $S(\Phi_1)$  afin d'avoir une meilleur linéarisation (section 3.3.4). Nous avons abouti au circuit conçu dans ce projet. Ce type de commutateurs (double amorçage) donne le spectre illustré à la figure 5-10. Les résultats montrent un SFDR de 88.6dB, qui équivaut un ENOB de 13.7bits. Le signal d'entrée a la même fréquence de test (20MHz) qui est échantillonné avec une fréquence de 50MHz. Afin de mieux visualiser le bon fonctionnement de l'EB dans la largeur de bande 20MHz nous avons testé le circuit avec un signal d'entrée à 100KHz. Les résultats ont montrés un SFDR de 90.1dB, qui est l'équivalent d'un ENOB de 14.1bits. Le tableau 5-1 résume les résultats du circuit avec les différents types de commutateurs utilisés. L'utilisation des différents commutateurs  $S(\Phi_1)$  sans optimisation Verilog-A donne une dégradation de plus de 18dB en SFDR, ce qui vaut une perte de plus de 3bits dans les performances. Cette dégradation confirme l'avantage de la nouvelle technique d'optimisation se basant sur les modèles Verilog-A tel que nous l'avons fait dans ce projet.

**Tableau 5-1.** Performances simulées de l'EB avec les différents types de commutateurs utilisés.

| Paramètre  | Transistor simple<br>20MHz | Porte de transmission<br>20MHz | Amorçage simple<br>20MHz | Amorçage double<br>20MHz | Amorçage double<br>100KHz |
|------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| SFDR [dB]  | 44.9                       | 61.6                           | 82.1                     | 88.6                     | 90.1                      |
| SNDR [dB]  | 40.2                       | 57.4                           | 78                       | 84.1                     | 86.7                      |
| SNR [dB]   | 49.3                       | 65.2                           | 85.2                     | 91.2                     | 93.4                      |
| ENOB[bits] | 6.4                        | 9.2                            | 12.6                     | 13.7                     | 14.1                      |



(a)



(b)

**Figure 5-10.** FFT du signal de sortie de l'EB avec un commutateur à double amorçage pour,

(a) une fréquence d'entrée de 20MHz, (b) une fréquence d'entrée de 100KHz.

Jusqu'ici les simulations réalisées concernent le schématique seulement. Après l'implémentation du dessin des masques de l'EB et son optimisation, la simulation a donnée les résultats illustrés sur la figure 5-11. Une dégradation de performances causée par les capacités parasites a affaibli le SFDR de 8dB, qui est l'équivalent de 2bits en ENOB.

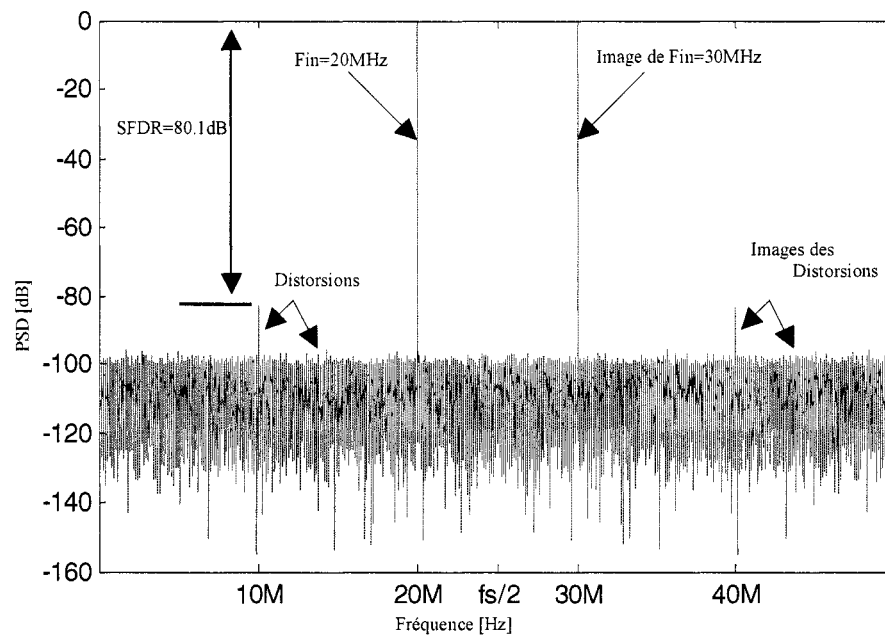
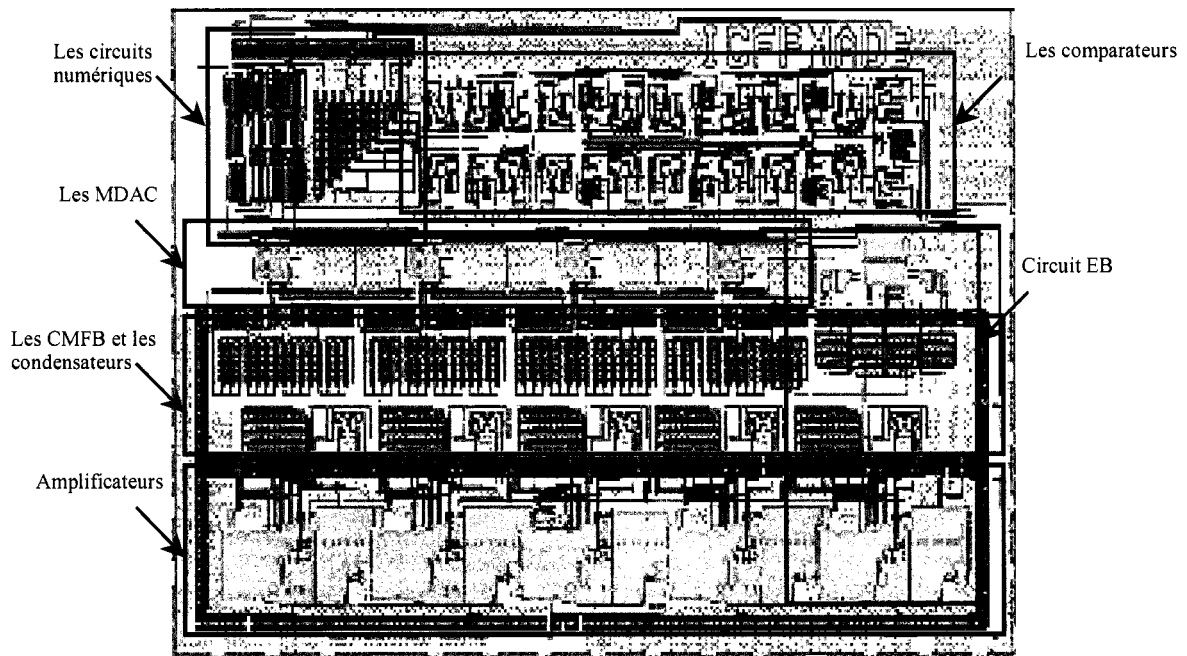


Figure 5-11. FFT du signal de sortie de l'EB implémenté.

## 5.4 Statut de la puce

Nous avons implémenté une puce (figure 5-12) qui contient un CAN pipeliné à 10 bits opérant à une fréquence de 50 MHz, et avec le module EB frontal conçu dans ce projet à l'entrée. Le dessin des masques de cette puce a été envoyé en fabrication à la SCM au mois de Mai, et nous prévoyons de recevoir un prototype au début du mois de Décembre.

Après l'optimisation du dessin des masques global de la puce nous avons pu atteindre plus de 9 bits en performance du CAN. Notons que cette optimisation a été faite car, et c'est le cas dans cette puce, le premier test a été complètement non fonctionnel. Il y a plusieurs causes qui ont empêché le circuit de fonctionner, tel que les condensateurs parasites et les erreurs dans les interconnexions entre les différents blocs. Une bonne optimisation nécessite des semaines de simulations. Dans le cas de cette puce nous avons pu atteindre 9 bits de performance après plus de 2 mois d'optimisations et simulations.



**Figure 5-12.** La puce du CAN envoyée pour fabrication.

Dans ce chapitre les différentes étapes d'implémentation de l'amplificateur, le commutateur à double amorçage et le circuit EB ont été présentées. Aussi nous avons montré les résultats de simulation du circuit schématisé et du dessin des masques. Ces



résultats expliquent la différence entre les performances de toutes les techniques expliquées au chapitre 3. Le circuit est implémenté suivant la conception faite au chapitre précédent. Quelques changements ont été faits sur le dessin des masques afin d'avoir les mêmes performances que le schématique. Nous avons réussi à minimiser la dégradation, causée par les capacités parasites, à seulement 2bits, pour atteindre un ENOB de 12bits. La prochaine étape dans ces travaux sera la validation expérimentale. Des améliorations sont proposées dans la conclusion globale de ce mémoire.

## CONCLUSION

Dans ce projet une nouvelle méthodologie de conception a été utilisée pour implémenter un circuit échantillonneur-bloqueur (EB) frontal à hautes performances opérant à une fréquence d'échantillonnage de 50MHz et avec un signal d'entrée d'une largeur de bande de 20MHz. Ce circuit dédié à un convertisseur analogique numérique (CAN) pipeliné de 10 bits a été implémenté avec la technologie CMOS 0.18 $\mu$ m.

La méthodologie proposée se résume dans la modélisation Verilog-A de l'amplificateur et des commutateurs utilisés dans l'architecture à base de condensateurs commutés qui a été adopté dans ce projet. Ces modèles nous ont permis de trouver les sources d'imperfection et par conséquent faire une meilleure optimisation. Il a été observé que les performances de l'EB convergeaient vers un certain seuil en changeant les dimensions des commutateurs, ce qui nous mène à conclure que cette technique est importante dans le processus d'optimisation.

Des performances d'environ 14 bits ont pu être atteintes pour un signal d'entrée d'une largeur de bande de 20MHz après l'optimisation de l'EB en utilisant les modèles Verilog-A, et aussi en appliquant les différentes techniques de linéarisation des

commutateurs tel que le double amorçage. La simulation du circuit implémenté n'a pas fonctionné du premier coup à cause des capacités parasites ce qui a nécessité une optimisation au niveau du dessin des masques. Une dégradation de 2 bits a été obtenue après l'optimisation du circuit qui a une consommation de puissance totale de 7mW.

L'énergie dissipée par l'EB conçu est principalement consommée par l'amplificateur. Nous suggérons d'utiliser un amplificateur de haute performance pour réduire la consommation d'énergie de l'EB. Cependant, la basse tension d'alimentation nécessite d'utiliser le rail à rail pour avoir une bonne marge dynamique du signal de sortie. Ceci est difficile à réaliser pour opérer tous les transistors de l'amplificateur en saturation.

Concernant la fréquence d'échantillonnage, qui est dans le cas de ce projet 50MHz, il est important d'adapter les circuits présents pour dépasser les 100MHz. L'architecture de l'EB qui a été implémenté dans ce projet n'exploite pas l'amplificateur pendant toute la période de l'horloge. En effet, durant la phase d'échantillonnage ( $\Phi_1$ ), l'amplificateur n'est pas utilisé. Pour augmenter la fréquence d'échantillonnage, on peut utiliser deux condensateurs, quand l'un prend l'échantillon de l'entrée, l'autre fait le blocage. C'est ainsi que l'amplificateur serait utilisé dans les deux phases et on pourrait atteindre une fréquence d'échantillonnage supérieure à 100MHz.

Un autre point important sur les commutateurs NMOS utilisés est que leurs substrats sont connectés à  $V_{ss}$ . En connectant les substrats aux sources, l'effet du substrat peut être éliminé et par conséquent l'EB aura moins de distorsions (plus hautes performances). Cependant l'implémentation d'un transistor NMOS avec le substrat connecté à la source nécessite de faire un «Deep N-Well» autour du transistor en question.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] ABO, A. M., et GRAY, P. R. (1998). "A 1.5V, 10-bit, 14MS/s CMOS Pipeline Analog-to-Digital Converter," *Symposium on VLSI Circuits Digest of Technical Papers*, pp. 166 – 169.
- [2] ABO, A. M., et GRAY, P. R. (1999). "A 1.5-V, 10-bit, 14-MS/s CMOS Pipeline Analog to Digital Converter," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 34, pp. 599–606.
- [3] CHO, T. B., et GRAY, P.R. (1995). "A 10 b, 20 Msample/s, 35 mW Pipeline A/D Converter," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 30, pp. 166–172.
- [4] CHO, T. B. (1995). "*Low-Power, Low-Voltage Analog-to-Digital Conversion Techniques using Pipelined Architectures*," Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley.

- [5] CHOUIA, Y., EL-SANKARY, K., SALEH, A., SAWAN, M., et GHANOUCI, F. (2004). "14 b, 50MS/s CMOS Front-End Sample and Hold Module Dedicated to a Pipelined ADC", the 47th IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems. pp. I-353 - I-356.
- [6] CHOUIA, Y., EL-SANKARY, K., SALEH, A., SAWAN, M., et GHANOUCI, F. (2004). "A new technique for designing high performance front-end Sample and Hold circuits", soumit pour "The 16th International Conference on Microelectronics (ICM)".
- [7] CLINE, D. (1995). "Noise, Speed and Power Trade-Offs in Pipelined Analog-to-Digital Converters," Ph.D. dissertation, University of California at Berkeley. (ERL Memo # M95/94).
- [8] DE WIT, M. (1992). "Sample and hold circuitry and methods," U.S. Patent 5 170 075, Texas Instruments Inc.
- [9] GORECKI, J. L. (1992). "Dynamic Input Sampling Switch for CDACS," U.S. Patent 5084634, Burr-Brown Corporation.
- [10] GRAY, P. R. "MOS Sample/Hold Amplifiers," <http://kabuki.eecs.berkeley.edu/~pgray/> pp.10.

- [11] GULATI, K., et LEE, H.-S. (1998). "A High-Swing CMOS Telescopic Operational Amplifier," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 33, no. 12, pp. 2010–2019.
- [12] HAIGH, D. G., et SINGH, B. (1983). "A switching scheme for switched capacitor filters which reduces the effect of parasitic capacitances associated with switch control terminals," in *Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, pp. 586–589.
- [13] HOGERVORST, R., et HUIJSING, J. H. (1999). "Design of Low-Voltage Low-Power Operational Amplifier Cells," Kluwer Academic Publishers.
- [14] ISHIKAWA, M., et TSUKAHARA, T. (1989). "An 8-bit 50-MHz CMOS Subranging A/D Converter with Pipelined Wide-Band S/H," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 24, pp. 1485–1491.
- [15] JOHNS, D. A., et MARTIN, K. (1997). "Analog Integrated Circuit Design," pp.343-347.
- [16] JOHNS, D. A., et MARTIN, K. (1997). "Analog Integrated Circuit Design," pp.449-450.

- [17] KIM, K. Y. (1996). *A 10-bit, 100 MS/s Analog-to-Digital Converter in 1- $\mu$ m CMOS*, Ph.D. Dissertation, University of California, Los Angeles.
- [18] KIM, K. Y., KUSAYANAGI, N., et ABIDI, A. A. (1997). "A 10-b, 100-MS/s CMOS A/D Converter," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 32, pp. 302–311.
- [19] LAKER, K. R., et SANSEN, W. M. C. (1996). *Design of Analog Integrated Circuits and Systems*, McGraw-Hill International Editions, Singapore.
- [20] LEWIS, S. H., et GRAY, P. R. (1987). "A Pipelined 5-Msample/s 9-bit Analog-to-Digital Converter," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. sc-22, pp. 954–961.
- [21] LIM, P. J., et WOOLEY, B. A. (1991). "A High-Speed Sample-and-Hold Technique Using a Miller Hold Capacitance," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 26, pp. 643–651.
- [22] LIN, Y.-M., KIM, B., et GRAY, P. R. (1991). "A 13-b 2.5-MHz Self-Calibrated Pipelined A/D Converter in 3- $\mu$ m CMOS," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 26, pp. 628–635.

- [23] MALOBERTI, F., FRANCESCONI, F., MALCOVATI P., et NYS, O. (1995). "Design Considerations on Low-Voltage Low-Power Data Converters," *IEEE Trans. Circuits and Systems-I*, vol. 42, pp. 653–863.
- [24] McCREARY, J. L., et GRAY, P. R. (1975). "All-MOS charge redistribution analog-to-digital conversion techniques. I," *Solid-State Circuits, IEEE Journal*, Volume: 10, Pages: 371-379.
- [25] NAKAGOME, Y., TANAKA, H., TAKEUCHI, K., KUME, E., WATANABE, Y., KAGA, T., KAWAMOTO, Y., MURAI, F., IZAWA, R., HISAMOTO, D., KISU, T., NISHIDA, T., TAKEDA, E., et ITOH, K. (1991). "An Experimental 1.5-V 64-Mb DRAM," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 26, pp. 465–478.
- [26] NAYEBI, M., et WOOLEY, B. A. (1989). "A 10-bit Video BiCMOS Track-and-Hold Amplifier," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 24, pp. 1507–1516.
- [27] NAYLOR, J. R., et SHILL, M. A. (1992). "Bootstrapped FET Sampling Switch," U.S. Patent 5172019, Burr-Brown Corporation.
- [28] NICOLLINI, G., CONFALONIERI, P., et SENDEROWICZ, D. (1989). "A Fully Differential Sample and Hold Circuit for High-Speed Applications," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 24, pp. 1461–1465.



- [29] SALL, E. (2003). "A 1.8 V 10-bit 80 MS/s low power track-and-hold circuit in a 0.18 $\mu$ m CMOS process," *Circuits and Systems 2003. ISCAS '03. Proceedings of the 2003 International Symposium on*, Volume: 1, Pages: I-53 - I-56.
- [30] SAUER, D. J. (1996). "Constant Impedance Sampling Switch for an Analog to Digital Converter," U.S. Patent 5 500 612, David Sarnoff Research Center Inc.
- [31] SHIEH, J.-H., PATIL, M., et SHEU, B. J. (1987). "Measurement and analysis of charge injection in MOS analog switches," *Solid-State Circuits, IEEE Journal*, Volume: 22, Issue: 2, Pages: 277-281.
- [32] SINGER, L., et BROOKS, T. L. (2000). "Two-Phase Bootstrapped CMOS Switch Drive Technique and Circuit," U.S. Patent 6 118 326, Analog Devices Inc.
- [33] STAFFORD, K. R., GRAY, P. R., et BLANCHARD, R. A. (1974). "A Complete Monolithic Sample/Hold Amplifier," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. SC-9, pp. 381-387.
- [34] WALTARI, M., et HALONEN, K. (1999). "A 220-MSample/s CMOS Sample-and-Hold Circuit Using Double-Sampling," *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 18, pp. 21-31.

- [35] WALTARI, M., SUMANEN, L., KORHONEN, T., et HALONEN, K. (2002). “A selfcalibrated pipeline ADC with 200MHz IF-sampling frontend,” Solid-State Circuits Conference, 2002. Digest of Technical Papers. ISSCC. IEEE International, Vol.: 2, Pages: 250 – 493.
- [36] WALTARI, M., SUMANEN, L., KORHONEN, T., et HALONEN, K. (2002). “A self-calibrated pipeline ADC with 200MHz IF-sampling frontend”. Solid-State Circuits Conference, 2002. Digest of Technical Papers. ISSCC. IEEE International, Vol.: 2, Pages: 250 – 493.
- [37] WANG, F.-J., et TEMES, G. C. (1997). “A Fast Offset-Free Sample-and-Hold Circuit,” in proc *IEEE 1988 Custom Integrated Circuits Conference*, pp. 5.6.1–5.6.3.
- [38] WU, C-Y., WEY, W-S., et YU, T-C. (1995). “A 1.5 V CMOS Balanced Differential Switched-Capacitor Filter with Internal Clock Boosters,” in *Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, pp. 1025–1028.

## ANNEXE A

# DÉFINITIONS DES PERFORMANCES DE L'EB

### A.1 SNR

«Signal to Noise Ratio» ou le rapport du Signal/Bruit (SNR) est une mesure du bruit à large bande présent dans le signal du CAN ou de l'EB. SNR compare l'importance de la vague de sinus d'entrée à la somme de toutes autres fréquences, excepté ceux qui représentent des harmoniques de la fréquence fondamentale. Il est défini tel qu'illustré dans l'équation (A-1) et (A-2).

$$SNR = 10 \times \log_{10} \left( \frac{\text{puissance du signal}}{\text{puissance du bruit}} \right) [dB] \quad (A-1)$$

$$SNR = 20 \times \log_{10} \left( \frac{\text{amplitude du signal}}{\text{amplitude du bruit}} \right) [dB] \quad (A-2)$$

## A.2 SNDR

«Signal to Noise and Distortion Ratio» ou le rapport de Signal/Bruit et Distorsion (SNDR) mesure toute l'énergie dans la partie spécifiée du spectre, y compris le bruit thermique, le bruit de quantification et les «spurs» présent dans le signal du CAN ou l'EB. Il est défini par l'équation (A-3) ou (A-4).

$$SNDR = 10 \times \log_{10} \left( \frac{\text{puissance du signal}}{\text{puissance du (bruit + distorsion)}} \right) [dB] \quad (A-3)$$

$$SNDR = 20 \times \log_{10} \left( \frac{\text{amplitude du signal}}{\text{amplitude du (bruit + distorsion)}} \right) [dB] \quad (A-4)$$

## A.3 SFDR

«Spurious Free Dynamic Range» (SFDR) est définie comme le rapport entre la composante fréquentielle maximale du signal sur la plus grande composante fréquentielle de distorsion. Il est défini par l'équation (A-5).

$$SNDR = 20 \times \log_{10} \left( \frac{\text{la composante maximale du signal}}{\text{la plus grande composante de distorsion}} \right) [dB] \quad (A-5)$$

## A.4 ENOB

«Effective Number Of Bits» (ENOB) est une indication globale d'exactitude pour un taux spécifique d'échantillonnage. On la calcule à partir de l'équation A-6.

$$ENOB = (SNDR - 1.763) / 6.02 [bits] \quad (A-6)$$

## ANNEXE B

### PROGRAMMES DE MODÉLISATION EN VERILOG-A

#### B.1 Le Commutateur

```
// VerilogA for S_H, switch, veriloga

`include "constants.h"
`include "discipline.h"

module switch(vclk, vin, vout);
inout vclk;
electrical vclk;
inout vin;
electrical vin;
inout vout;
electrical vout;

parameter real vtrans_clk = 0.45;
parameter ron = 80;
parameter roff = 1e10;

    analog begin

        if (V(vclk) > vtrans_clk) begin
            I(vin, vout) <+ V(vin, vout)/ron;
        end
        else begin
            I(vin, vout) <+ V(vin, vout)/roff;
        end
    end
end
```

```

        end
    endmodule

```

## B.2 L'amplificateur différentiel

```

// VerilogA for S_H, opamp_diff, veriloga

`include "constants.h"
`include "discipline.h"

`define PI      3.14159265358979323846264338327950288419716939937511

module opamp_diff(vout_n, vout_p, vsupply_n, vsupply_p, vin_n, vin_p);
output vout_n;
electrical vout_n;
output vout_p;
electrical vout_p;
inout vsupply_n;
electrical vsupply_n;
inout vsupply_p;
electrical vsupply_p;
input vin_n;
electrical vin_n;
input vin_p;
electrical vin_p;

parameter real gain = 10e3;
parameter real freq_unitygain = 0.25e9;
parameter real vin_offset = 0.0;
parameter real iin_max = 1e-5;
parameter real slew_rate = 0.5e9;
parameter real rout = 80;
parameter real gmout = 0.0523;

    real cc;
    real gm_nom;
    real rc;
    real vmax_in;
    real vmax_out;
    real vmin_out;
    real vin_val;
    real vout_val;

    electrical v1, v2;

    analog begin

        @ ( initial_step or initial_step("dc") ) begin

```

```

        cc = iin_max/(slew_rate);
        gm_nom = 2 * `PI * freq_unitygain * cc;
        rc = gain/gm_nom;
        vmax_in = 10*iin_max/gm_nom;
    end

    vin_val = V(vin_p, vin_n) + vin_offset;
    vout_val = V(v2);
    vmax_out = V(vsupply_p);
    vmin_out = V(vsupply_n);

    // GM stage
    //
    I(v1) <+ V(v1)/100e6;
    if (vin_val > vmax_in)
        I(v1) <+ iin_max;
    else if (vin_val < -vmax_in)
        I(v1) <+ -iin_max;
    else
        I(v1) <+ gm_nom*vin_val;

    //
    // Dominant Pole
    //
    I(v1, v2) <+ ddt(cc*V(v1, v2));
    I(v1, v2) <+ V(v1, v2)/(rc);

    //
    // Output Stage
    //

    I(v2) <+ gmout*V(v1);
    I(v2) <+ V(v2)/rout;

    if (vout_val > vmax_out)
        V(vout_p) <+ vmax_out;
    else if (vout_val < vmin_out)
        V(vout_p) <+ vmin_out;
    else
        V(vout_p) <+ V(v2);

    V(vout_n) <+ -V(vout_p);

end

endmodule

```

### B.3 Le module de stockage de données

```
// VerilogA for S_H, sah_out_probe, veriloga

`include "constants.h"
`include "discipline.h"

module sah_out_probe(in0, in1);
input in0 ;
electrical in0 ;
input in1 ;
electrical in1 ;

parameter real log_to_file = 1 ;
parameter real sampleTime = 20e-9 ;

integer fhandle;
analog begin
    @(initial_step) begin
        if(log_to_file) begin
            fhandle = $fopen("~/C%l%D.m");
            $fstrobe(fhandle, "Vout = [");
        end
    end

    @(timer(1.0195e-6,sampleTime)) begin

        if(log_to_file) begin
            $fstrobe(fhandle,"%g",V(in0,in1) );
        end
    end

    @(final_step) begin
        $fstrobe(fhandle, "]");
        $fclose(fhandle);
    end
end

endmodule
```